

UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA

\*\*\*\*\*



**FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE  
ET SCIENCES DE LA MATIÈRE**

N° d'ordre :

N° de série :

\*\*\*\*\*

**DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE**

.....

**Mémoire**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MAGISTER**

**Spécialité : Physique**

**Option : Physique énergétique thermique**

Présenté par :

**BOUZAFFA Mohammed**

**Thème**

**Étude expérimentale du bilan énergétique d'une  
serre tunnel à couverture de polyéthylène**

**Soutenu publiquement le : 24/06/2010.**

**Devant le jury composé de :**

<b>Mr. BOUGUETTAIA Hamza</b>	<b>Professeur</b>	<b>Université d'Ouargla</b>	<b>Président</b>
<b>Mr. SETTOU Nour Eddine</b>	<b>Professeur</b>	<b>Université d'Ouargla</b>	<b>Examineur</b>
<b>Mr. AIADI Kamel Eddine</b>	<b>M.C</b>	<b>Université d'Ouargla</b>	<b>Examineur</b>
<b>Mr. HASSINI Nour Eddine</b>	<b>Professeur</b>	<b>Université d'Oran</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Mr. DOBBI Abdelmadjid</b>	<b>M.A</b>	<b>Université d'Ouargla</b>	<b>Co-Rapporteur</b>

**2009-2010.**

**Résumé :**

L'étude que nous avons effectuée apporte une contribution, basée sur l'expérimentation, à la compréhension des phénomènes qui régissent le comportement des serres.

Elle repose sur les résultats expérimentaux obtenus, durant l'année 2008 /2009, sur une serre tunnel à couverture de polyéthylène.

Ce travail a pour rôle de compléter les diverses approches théoriques sur le bilan thermique des serres par un modèle basé sur l'ensemble des équations théoriques qui intègrent les processus d'échanges thermiques entre la couverture, l'air extérieur, l'air intérieur, la végétation et le sol, à savoir les modes de transferts:

Conduction, convection, évaporation, condensation et rayonnements solaires.

Les équations de bilan énergétique diffèrent des autres approches par les particularités suivantes:

- Il effectue une analyse globale des bilans thermiques échangés entre les composants de la serre.
- Le calcul des différents flux du bilan de la serre repose sur des données réelles (mesures de température et d'humidité).
- Les équations tiennent compte des conditions météorologiques du lieu de la serre.

Cette étude peut améliorer notamment la représentation du bilan thermique des serres dans les différentes régions d'Algérie.

**Mots clés :** serre agricole - microclimat - bilan énergétique - polyéthylène.

**Abstract:**

The study that we have carried out brings a contribution, based on experimentation, in comprehension of phenomena that govern the comportment of greenhouses.

It rests on the obtain experimentations results, during the year of 2008/2009 on the tunnel greenhouse in polyethylene coverage.

This work has as a role to supplement the various theoretical approaches on the heat balance of the greenhouses by a model based on the whole of the theoretical equations which integrate the processes of heat exchange between the cover, the exterior air ,the interior air, vegetation and the ground, has to know: solar conduction, convection, evaporation, condensation, solar radiations.

The equations of energy balance differ from the other approaches by the following characteristics:

- It makes an analysis total of the heat balances exchanged between the components of the greenhouse.
- The calculation of various flows of the assessment of the greenhouse rests on real data (moisture and temperature measurements),
- The equations take account of the instantaneous weather conditions of the place of the greenhouse.

This study can improve the representation particularly at balance thermal of greenhouses in different regions of Algeria.

**Keywords:** greenhouse – microclimate – balance energetic – polyethylene.

#### ملخص:

الدراسة المتناولة تعتمد على التجريب، قصد فهم الظواهر المتعلقة بتصرف و تعديل مناخ البيوت البلاستيكية، وهي تركز أساسا على النتائج التجريبية المقاسة خلال سنة 2009/2008 على بيت بلاستيكي مغطى بالبولي إيثيلين. هذا العمل يهدف إلى إتمام مختلف التقريبات النظرية للموازنة الحرارية للبيوت البلاستيكية بواسطة نموذج يعتمد على مجموعة من المعادلات النظرية التي تتم مختلف التحولات الحرارية بين كل من: الغلاف، الهواء الخارجي، الهواء الداخلي، النبات، التربة مع مراعاة أنواع الانتقالات الحرارية: (التوصيل، الحمل، التبخير، التكثيف، الإشعاع الحراري). معادلات الموازنة الحرارية تتغير وفق مختلف التقريبات بواسطة الخصائص التالية:

- التحليل الإجمالي للموازنة الحرارية المتبادلة بين عناصر ومكونات البيت البلاستيكي.
- حساب مختلف التدفقات الحرارية لموازنة البيت البلاستيكي يعتمد على النتائج الحقيقية: (قياس الحرارة والرطوبة).
- المعادلات تؤخذ حسب العوامل المناخية لمكان وموضع البيت البلاستيكي .

هذه الدراسة يمكن أن تحسن خصوصا صورة التعديل الحراري لمناخ البيوت البلاستيكية لمختلف مناطق الوطن (الجزائر).

**الكلمات الدالة:** البيت البلاستيكي – المناخ – الموازنة الطاقوية – البولي إيثيلين.

UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA

\*\*\*\*\*



**FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE  
ET SCIENCES DE LA MATIÈRE**

N° d'ordre :

N° de série :

\*\*\*\*\*

**DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE**

.....

**Mémoire**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MAGISTER**

**Spécialité : Physique**

**Option : Physique énergétique thermique**

Présenté par :

**BOUZAFFA Mohammed**

**Thème**

**Étude expérimentale du bilan énergétique d'une  
serre tunnel à couverture de polyéthylène**

**Soutenu publiquement le : 24/06/2010.**

**Devant le jury composé de :**

<b>Mr. BOUGUETTAIA Hamza</b>	<b>Professeur</b>	<b>Université d'Ouargla</b>	<b>Président</b>
<b>Mr. SETTOU Nour Eddine</b>	<b>Professeur</b>	<b>Université d'Ouargla</b>	<b>Examineur</b>
<b>Mr. AIADI Kamel Eddine</b>	<b>M.C</b>	<b>Université d'Ouargla</b>	<b>Examineur</b>
<b>Mr. HASSINI Nour Eddine</b>	<b>Professeur</b>	<b>Université d'Oran</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Mr. DOBBI Abdelmadjid</b>	<b>M.A</b>	<b>Université d'Ouargla</b>	<b>Co-Rapporteur</b>

**2008 – 2009.**

---

**Résumé :**

L'étude que nous avons effectuée apporte une contribution, basée sur l'expérimentation, à la compréhension des phénomènes qui régissent le comportement des serres.

Elle repose sur les résultats expérimentaux obtenus, durant l'année 2008 /2009, sur une serre tunnel à couverture de polyéthylène.

Ce travail a pour rôle de compléter les diverses approches théoriques sur le bilan thermique des serres par un modèle basé sur l'ensemble des équations théoriques qui intègrent les processus d'échanges thermiques entre la couverture, l'air extérieur, l'air intérieur, la végétation et le sol, à savoir les modes de transferts:

Conduction, convection, évaporation, condensation et rayonnements solaires.

Les équations de bilan énergétique diffèrent des autres approches par les particularités suivantes:

- Il effectue une analyse globale des bilans thermiques échangés entre les composants de la serre.
- Le calcul des différents flux du bilan de la serre repose sur des données réelles (mesures de température et d'humidité).
- Les équations tiennent compte des conditions météorologiques du lieu de la serre.

Cette étude peut améliorer notamment la représentation du bilan thermique des serres dans les différentes régions d'Algérie.

**Mots clés :** serre agricole - microclimat - bilan énergétique - polyéthylène.

**Abstract:**

The study that we have carried out brings a contribution, based on experimentation, in comprehension of phenomena that govern the comportment of greenhouses.

It rests on the obtain experimentations results, during the year of 2008/2009 on the tunnel greenhouse in polyethylene coverage.

This work has as a role to supplement the various theoretical approaches on the heat balance of the greenhouses by a model based on the whole of the theoretical equations which integrate the processes of heat exchange between the cover, the exterior air ,the interior air, vegetation and the ground, has to know: solar conduction, convection, evaporation, condensation, solar radiations.

The equations of energy balance differ from the other approaches by the following characteristics:

- It makes an analysis total of the heat balances exchanged between the components of the greenhouse.
- The calculation of various flows of the assessment of the greenhouse rests on real data (moisture and temperature measurements),
- The equations take account of the instantaneous weather conditions of the place of the greenhouse.

This study can improve the representation particularly at balance thermal of greenhouses in different regions of Algeria.

**Keywords:** greenhouse – microclimate – balance energetic – polyethylene.

#### ملخص:

الدراسة المتناولة تعتمد على التجريب، قصد فهم الظواهر المتعلقة بتصرف و تعديل مناخ البيوت البلاستيكية، وهي تركز أساسا على النتائج التجريبية المقاسة خلال سنة 2009/2008 على بيت بلاستيكي مغطى بالبولي إيثيلين. هذا العمل يهدف إلى إتمام مختلف التقريبات النظرية للموازنة الحرارية للبيوت البلاستيكية بواسطة نموذج يعتمد على مجموعة من المعادلات النظرية التي تتم مختلف التحولات الحرارية بين كل من: الغلاف، الهواء الخارجي، الهواء الداخلي، النبات، التربة مع مراعاة أنواع الانتقالات الحرارية: (التوصيل، الحمل، التبخير، التكثيف، الإشعاع الحراري). معادلات الموازنة الحرارية تتغير وفق مختلف التقريبات بواسطة الخصائص التالية:

- التحليل الإجمالي للموازنة الحرارية المتبادلة بين عناصر ومكونات البيت البلاستيكي.
- حساب مختلف التدفقات الحرارية لموازنة البيت البلاستيكي يعتمد على النتائج الحقيقية: (قياس الحرارة والرطوبة).
- المعادلات تؤخذ حسب العوامل المناخية لمكان وموضع البيت البلاستيكي .

هذه الدراسة يمكن أن تحسن خصوصا صورة التعديل الحراري لمناخ البيوت البلاستيكية لمختلف مناطق الوطن (الجزائر).

**الكلمات الدالة:** البيت البلاستيكي – المناخ – الموازنة الطاقوية – البولي إيثيلين.

---

**DÉDICACE :**

*À mes parents ;*

*Pour tous les efforts et sacrifices consentis pour mon devenir, vous méritez infiniment plus.*

**BOUZAFFA Mohammed.**

---

---

## REMERCIEMENTS :

Tout d'abord merci à dieu.

La réalisation de ce travail n'aurait pas abouti sans l'aide, à des degrés divers de certaines personnes envers lesquelles nous éprouvons de profonds sentiments de reconnaissance.

Nous remercions :

- Monsieur **HASSINI Nour-Eddine promoteur**, qui a su patiemment et courageusement diriger ce mémoire.

- Monsieur **DOBBI Abdelmadjid Co-promoteur**, pour tous les conseils et l'assistance spirituelle qu'il nous a apportés.

Dont les conseils nous ont agréablement motivé à toujours aller de l'avant.

- Les membres du jury Monsieur **BOUGUETTAIA Hamza**, Monsieur **SETTOU Nour-Eddine** et Monsieur **AIADI Kamel-Eddine** qui ont accepté apprécier en premier ce travail.

- Monsieur **BABI. Y**, qui ma aider pour me diriger le long de ce travail.

- Monsieur **BOUZAFFA. S**, pour tout le soutien que vous m'avez apporté dans l'élaboration de ce travail, surtout dans la phase de collecte et de saisie de données, Dieu vous le rendra au centuple.

- Monsieur le Directeur de l'office national de la Météorologie d'Ouargla, le personnel des Services Météorologiques Monsieur **DOUADI. A**, Monsieur **DAKKICHE. Ali**, pour la cordialité des échanges et la facilité qu'ils nous ont accordée dans la phase de collecte de données.

- Notre Frères, pour tous les conseils et l'assistance spirituelle qu'il nous a apportés.

- Nos amis (es) du Projet «énergétique», Mlle et Mme, Monsieur **CHETTI**, et Monsieur **SOUDANI**, pour la cordialité des échanges fructueux que nous avons eus.

- Nos amis du Département de physique, physique énergétique, agents de laboratoire et agents de bibliothèque, etc...

- Je tiens à exprimer à l'endroit des enseignants ayant contribué à ma formation l'expression de ma sincère et entière reconnaissance.

- Tout le personnel de l'Université **KASDI MERBAH** Ouargla.

- Je remercie enfin tous ceux qui, de près ou de loin, ont par leurs conseils, propositions ou suggestions, manifesté un intérêt ou apporté une aide, contribué à l'avancement et à la réussite de ce travail.

**BOUZAFFA Mohammed.**

---

**Liste des tableaux :**

	<b>Page</b>
(I.1) : Caractéristique optique de transmission des matériaux de couverture.	4
(I.2) : Les valeurs moyennes de la masse volumique $\rho$ , de la chaleur massique $C_p$ et de la conductivité $\lambda$ du sol.	7
(I.3) : Coefficient global de transmission thermique (k), de quelques matériaux en ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ). (à condition standard : $T_e = -10^\circ C$ ; $T_i = 20^\circ C$ ; vent 4 m/s).	8
(II-1) : Les propriétés physiques de PEbd et de PEhd.	11
(II-2) : Les polyéthylènes et leurs densités.	11
(II-3) : Les ordres de grandeur des propriétés du PE.	13
(III.1) : Nombre de <i>Nusselt</i> le long d'une plaque plane.	22
(III.2) : Modes de convection et types d'écoulement.	23
(III.3) : Part du rayonnement diffus selon la hauteur du soleil h.	26
(V. 1) : Les températures extérieures maximales mensuelles : (absolues et moyennes) (2008/2009).	49
(V. 2) : Les températures intérieures maximales mensuelles : (absolues et moyennes) (2008/2009).	50
(V. 3) : Les températures extérieures minimales mensuelles : (absolues et moyennes) (2008/2009).	50
(V. 4) : Les températures intérieures minimales mensuelles : (absolues et moyennes) (2008/2009).	50
(V. 5) : Les températures moyennes mensuelles : (intérieure et extérieure) (2008).	51
(V. 6) : Humidités extérieure maximales mensuelles : (absolues et moyennes) (2008/2009).	51
(V. 7) : Humidités extérieure minimales mensuelles : (absolues et moyennes) (2008/2009).	52
(V. 8) : Humidités intérieure minimales mensuelles : (absolues et moyennes) (2008/2009).	52
(V. 9) : Humidités intérieure minimales mensuelles : (absolues et moyennes) (2008/2009).	52
(V. 10) : Evolution du taux de transmission dans le global ( $\tau_g$ ).	70
(V. 11) : Variation du coefficient convectif du coté intérieur.	72

---

(V. 12): Variation du coefficient convectif du coté extérieur.	73
(VI.1): Evolutions mensuelles des températures extérieures : (Ouargla et Oran) 2008.	77
(VI.2): Evolutions mensuelles des écarts des températures extérieures : (moyennes, maximales et minimales) de (Ouargla - Oran) 2008.	78
(VI.3) : Evolutions mensuelles des écarts (maximales – minimales) des températures extérieures (Ouargla et Oran) 2008.	80
(VI.4): Evolutions mensuelles des écarts (maximales – minimales) des températures extérieures (Ouargla - Oran) 2008.	81
(VI.5): Evolutions mensuelles des humidités extérieures (Ouargla et Oran) 2008.	84
(VI.6): Evolutions mensuelles des écarts des humidités extérieures : (Ouargla - Oran) 2008.	85
(VI.7): Evolutions mensuelles des écarts (maximales – minimales) des humidités extérieures (Ouargla et Oran) 2008.	87
(VI.8) : Evolutions mensuelles des écarts (maximales – minimales) des humidités extérieures (Ouargla - Oran) 2008.	87

---

## Liste des figures :

	<b>Page</b>
(II.1) : Obtention de polyéthylène.	10
(II.2) : Facteurs optiques.	15
(II.3) : Spectres solaires.	15
(III.1) : Atténuation du rayonnement solaire.	25
(IV.1) : Schéma des flux échangés.	42
(IV.2) : Schéma des flux échangés de la couverture.	44
(IV.3) : Schéma des flux échangés de l'air intérieur.	45
(IV.4) : Schéma des flux échangés de la Végétation.	45
(IV.5) : Schéma des flux échangés du sol intérieur.	45
(V) : La serre expérimentale.	46
(V.1) : Evolution des températures maximales sous serre tunnel et à l'extérieur pendant les six mois de (juin à novembre 2008).	54
(V.2) : Evolution des températures minimales sous serre et à l'extérieur pendant les six mois de (juin à novembre 2008).	54
(V.3) : Evolution des températures maximales et minimales sous serre tunnel pendant les six mois de (juin à novembre 2008).	55
(V.4) : Evolution de l'humidité relative maximales sous serre tunnel et à l'extérieur pondent les trois mois de (août à octobre2008).	56
(V.5) : Evolution de l'humidité relative minimales sous serre tunnel et à l'extérieur pondent les trois mois de (août à octobre2008).	57
(V.6) : Evolution de l'humidité relative maximale et minimale sous serre tunnel pondent les trois mois de (août à octobre2008).	57
(V.7a) : Evolution de la température et de l'humidité suite aux mouvements d'ouverture de la serre durant les deux journées du (1et le 2 novembre 2008).	58
(V.7b) : Evolution de la température et de l'humidité suite aux mouvements de fermeture de la serre durant les deux journées du (23et le 24 décembre 2008).	58
(V.8) : Evolution de la température et de l'humidité relative suite à l'action de l'aération (1et 2 juillet 2008).	59
(V.9) : Evolution de la température de l'air à l'intérieur et à l'extérieur de la serre (1 et 2 novembre 2008).	59
(V.10) : Evolution de la T et de l'humidité de l'air sous serre (23 mars 2009).	60

---

(V. 11) : Evolution de la température et de l'humidité de l'air sous serre dans la journée du printemps (16 Avril 2009).	60
(V. 12): Evolution de la température et de l'humidité de l'air sous serre en phase diurne dans la journée du (16 avril 2009).	61
(V. 13): Evolution de la température et de l'humidité de l'air sous serre en phase nocturne dans la journée du (16 avril 2009).	62
(V. 14) : Evolution de la température moyenne sous serre fermée en Avril.	62
(V. 15) : Evolution de la température moyenne nocturne sous serre fermée en printemps (Avril 2009).	63
(V. 16): Evolution de la température moyenne diurne sous serre fermée en printemps (Avril 2009).	63
(V. 17): Evolution de la température moyenne sur la façade Ouest (paroi 1) sous serre fermée en été (14 à 30 Juin 2008).	64
(V. 18): Evolution de la température moyenne sur la façade Est (paroi 2) sous serre exposée directement au rayonnement solaire en Juin 2008 (serre fermée).	64
(V. 19): Variation de la température de la toiture d'une serre fermée en juin 2008.	65
(V. 20): Variation de la température du toiture d'une serre ouverte en Juillet 2008.	65
(V. 21): Variation de la température du sol entre les niveaux profondeurs : (20, 60 et 100 cm) à l'intérieur d'une serre ouverte en juillet 2008.	66
(V. 22): Variation de la température du sol entre les niveaux profondeurs : (20, 60 et 100 cm) à l'intérieur d'une serre fermée en juin 2008.	66
(V. 23): Evolution du rayonnement solaire global extérieur moyen en Juillet 2008.	67
(V.24): Evolution comparée du rayonnement solaire global extérieur moyen de deux journées en hiver et en été (Décembre et Juin 2008).	67
(V.25): Evolution comparée du rayonnement solaire global extérieur de deux journées sans nuage en été (20 Juin et 01 Juillet 2008).	68
(V. 26): Evolution du rayonnement solaire global moyen à l'intérieur en Juin 2008 (serre fermée).	69
(V. 27): Evolution comparée du rayonnement solaire global à l'intérieur d'une serre au cours du (Juin et Juillet 2008).	69
(V. 28): Evolution comparée du rayonnement solaire global à l'intérieur et à l'extérieur d'une serre ouverte au cours du Juillet.	70
(V. 29) : Evolution du taux de transmission dans le global ( $\tau_g$ ) 2008.	71

---

(V. 30): Evolution du coefficient convectif du coté intérieur.	72
(V. 31): Evolution du coefficient convectif du coté extérieur.	73
(VI.1): Evolutions mensuelles (maximales et minimales) des températures extérieures (Ouargla et Oran) 2008.	75
(VI.2): Evolutions mensuelles (maximales et minimales) des températures intérieures (Ouargla et Oran) (19mars à 6mai 2009).	75
(VI.3): Evolutions mensuelles des températures extérieures (Ouargla et Oran) 2008.	77
(VI.4): Evolutions mensuelles des écarts des températures extérieures : (moyennes, maximales et minimales) (Ouargla - Oran) 2008.	79
(VI.5): Evolutions mensuelles des écarts moyennes des températures extérieures (Ouargla - Oran) 2008.	79
(VI.6): Evolutions mensuelles des écarts (maximales – minimales) des températures extérieures (Ouargla et Oran) 2008.	80
(VI.7): Evolutions mensuelles des écarts (maximales – minimales) des températures extérieures (Ouargla –Oran) 2008.	81
(VI.8a) : Evolutions mensuelles des humidités extérieures (Ouargla et Oran) (juin à décembre 2008).	82
(VI.8b) : Evolutions mensuelles des humidités extérieures (Ouargla et Oran) (août à novembre 2008).	82
(VI.9) : Evolutions mensuelles des humidités intérieures (Ouargla et Oran) (19 mars à 6 mai 2009).	83
(VI.10) : Evolutions mensuelles des humidités extérieures (Ouargla et Oran).	84
(VI.11) : Evolutions mensuelles des écarts des humidités extérieures (Ouargla - Oran) 2008.	85
(VI.12) : Evolutions mensuelles des écarts (maximales – minimales) des humidités extérieures (Ouargla et Oran) 2008.	86
(VI.13) : Evolutions mensuelles des écarts (maximales – minimales) des humidités extérieures (Ouargla - Oran) 2008.	88

---

## NOMENCLATURE :

- a : azimut solaire ( $^{\circ}$ ).
- $a_s$  : albédo du sol.
- $a_v$  : albédo des végétations.
- $a'$  : l'albédo du sol pour les grandes longueurs d'onde.
- $\beta_h$  : Angle que font la couverture et l'horizontale (Radian).
- $\beta$  : Coefficient de dilatation du fluide ( $C^{-1}$ ).
- $C_p$  : chaleur massique de l'eau ( $J/kg^{\circ}C$ ).
- $C_{p\ aint}$  : chaleur massique de l'air intérieur, ( $J/kg^{\circ}C$ ).
- $C_{p\ aext}$  : chaleur massique de l'air extérieur, ( $J/kg^{\circ}C$ ).
- $C_0$  : la vitesse de la lumière dans le vide (m/s).
- C : Capacité thermique (J/K).
- $D_v$  : diamètre des végétations (=largeur d'un rang) (m).
- $D_f$  : dimensions moyenne d'une feuille de végétation (m).
- D : rayonnement diffus ( $W/m^2$ ).
- d : est l'épaisseur du matériau (m).
- E : est la correction de l'équation de temps en heurs (h).
- EVA : éthylène vinyle acétate.
- e : Epaisseur du matériau de couverture (m).
- ETPs : évapotranspiration potentielle sous serre (mm / jour).
- ETR : le flux de vapeur d'eau.
- $F_{c,aint}$  : facteur de forme entre la couverture et l'air intérieur .
- $F_{sint,v}$  : facteur de forme entre le sol et la végétation.
- $F_{v,aint}$  : facteur de forme entre la végétation et l'air intérieur.
- $F_{sext,c}$  : facteur de forme entre le sol extérieur et la couverture.
- $F_{v,c}$  : facteur de forme entre la végétation et la couverture.
- $F_{c,cl}$  : facteur de forme entre la couverture et le ciel.
- f : fonction à déterminer expérimentalement.
- Gr = Nombre de Grashof.
- g : L'accélération du fluide ( $m/s^2$ ).
- H : hauteur de la serre. (m).
- $H_v$  : hauteur des végétations (m).

---

$h$  : la hauteur du soleil ( $^{\circ}$ ).

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

$h^c_{(s,a)ext}$ : coefficient d'échange convectif entre le sol extérieur et l'air extérieur ( $W/m^2^{\circ}C$ ).

$h^c_{(s,a)int}$ : coefficient d'échange convectif entre le sol intérieur et l'air intérieur ( $W/m^2^{\circ}C$ ).

$h^c_{c,aext}$ : coefficient d'échange convectif entre la paroi et l'air extérieur ( $W/m^2^{\circ}C$ ).

$h^c_{c,aint}$ : coefficient d'échange convectif entre la couverture et l'air intérieur ( $W/m^2^{\circ}C$ ).

$h^c_{v,aint}$ : coefficient d'échange convectif entre la végétation et l'air intérieur ( $W/m^2^{\circ}C$ ).

$h^c_{(s,a)int}$  : coefficient de transfert convective entre le sol et l'air intérieur ( $W/m^2^{\circ}C$ ).

$h^n_{(a,c)ext}$  est le coefficient convectif naturel ( $W/m^2 ^{\circ}C$ )

$h_{(a,c)ext}^f$  : coefficient d'échange convectif forcé, ( $W/m^2 ^{\circ}C$ ).

$h_t$  : coefficient d'échange turbulent pour la vapeur d'eau ( $W/m^2^{\circ}C$ ).

$h_{cint}$  : Coefficient d'échanges superficiels au niveau de la couverture interne ( $W/m^2^{\circ}C$ ).

$h_{cext}$  : Coefficient d'échanges superficiels au niveau de la couverture externe ( $W/m^2^{\circ}C$ ).

$h^1_{c,aext}$  : coefficient d'échange de chaleur latente du côté extérieur ( $W/m^2^{\circ}C$ ).

$h^1_{c,aint}$  : coefficient d'échange par chaleur latente ( $W/m^2^{\circ}C$ ).

$h$  est la constante de Planck :  $h=6,62.10^{-34} J .s$

$I_0$  : la constante solaire ( $W . m^{-2}$ ).

$ia$  : indice de position des ouvrants.

$ib$  : indice de brassage, ventilation.

$i$  : L'angle d'incidence du rayonnement direct ( $^{\circ}$ ).

$j$  : le numéro du jour de l'année.

$K$  : coefficient global de transmission thermique ( $W/m^2 . ^{\circ}C$ ).

$K_e$  : coefficient d'extinction ( $cm^{-1}$ )

$L_v(T_{ai})$  chaleur latente de vaporisation à la température de l'air intérieur ( $k Cal/kg$ ).

$L_v$  : chaleur latente de vaporisation ( $J/kg$ ).

$L_s$  : longueur de la serre ( $m$ )

$L$  : la longueur caractéristique de la surface ( $m$ ).

$m$  : le numéro du mois de l'année.

$Nu$  : Nombre de *Nusselt*.

$n_{rang}$  : nombre de rang des végétations.

$n_p$ : la normale au plan.

$n$ :indice de réfraction.

PE : polyéthylène.

---

PE basse Densité (PEbd).

PE moyenne Densité (PEmd).

PE Haute densité (PEhd).

PE basse Densité linéaire (PEbdl).

PVC : Polychlorure de vinyle.

$P_v$  : pression de vapeur d'eau, (atm), (Pa).

$P_a$  : pression atmosphérique, (atm), (Pa).

$P_{vs}$  : pression de vapeur saturante à la température T.  $P_{vs}$  (mmHg) ou (atm). T en (K).

$P_{cl}$  : la fraction de nuages a couvert la surface de la serre.

Pr : Nombre de *Prandtl*.

Q : énergie rayonnée (émittance) ( $W/m^2$ ).

$Q_c$  : puissance absorbée par la paroi (couverture) (W).

$Q_p$  : puissance absorbée par les plantes(W).

$Q_s$  : puissance absorbée par le sol(W).

$Q_{ren}$  : flux du au renouvellement de l'air sec(W).

$Q_{(s,a)ext}^c$  : la puissance convective entre le sol extérieur et l'air extérieur (W).

$Q_{(a,c)ext}^f$  : la puissance radiative entre la couverture et l'air extérieur (le ciel) (W).

$Q_{sc}$  : la puissance de rayonnement solaire absorbée par la couverture (W).

$Q_{(a,c)int}^c$  : la puissance convective entre l'air intérieur et la couverture (W).

$Q_{(a,c)ext}^c$  : la puissance convective entre l'air extérieur et la couverture (W).

$Q_{(s,c)ext}^f$  : la puissance radiative entre le sol extérieur et la couverture (W).

$Q_{(cl,c)ext}^f$  : la puissance radiative entre le ciel et la couverture (W).

$Q_{(a,v)int}^c$  : la puissance convective entre l'air intérieur et la végétation (W).

$Q_{(a,s)int}^c$  : la puissance convective entre l'air intérieur et le sol intérieur (W).

$Q_{Ren}$  : la puissance de renouvellement de l'air sec (W).

$Q_{(a,c)int}^1$  : la puissance de l'évaporation au niveau de la couverture (W).

$Q_{Ren}^1$  : la puissance de renouvellement de l'air humide (W).

$Q_{sv}$  : la puissance de rayonnement solaire absorbée par végétation (W).

$Q_{(v,c)int}^f$  : la puissance radiative entre la végétation et la couverture (W).

$Q_{(v,s)int}^f$  : la puissance radiative entre la végétation et le sol intérieur(W).

$Q_{ETP}$  : la puissance de l'évapotranspiration des plantes (W).

$Q_{ssi}$  : la puissance de rayonnement solaire absorbée par le sol intérieur (W).

$Q_{(s,c)int}^f$  : la puissance radiative entre le sol intérieur et la couverture (W).

---

$Q_{(s,a)int}^1$  : la puissance de l'évaporation au niveau du sol intérieur (W).

$Q_{(si,se)}^{cond}$  : la puissance conductive entre le sol intérieur et le sol extérieur (W).

$Q_{sse}$  : la puissance de rayonnement solaire absorbée par le sol extérieur (W).

$R_g$  : rayonnement solaire global extérieur reçu sur une surface horizontale ( $W/m^2$ ).

$Ra^\circ$  : taux de renouvellement de l'air sans ouverture et sous brassage de l'air.

$R_{gs}$  : rayonnement global sous serre ( $kJ / m^2 \cdot jour$ ).

$R_{ns}$  : rayonnement net au niveau de la surface du sol dans la serre.

$R_{np}$  : rayonnement net de la couverture (paroi) de la serre ( $W/m^2$ ).

$R_{ns}$  : rayonnement net à l'intérieur de la serre ( $W/m^2$ ).

$R$  : taux de renouvellement de l'air intérieur ( $h^{-1}$ ).

$r_a$  : résistance aérodynamique.

$R_n$  : Rayonnement net au sol ( $W/m^2$ ).

$Re$  : Nombre de *Reynold*.

$S_v$  : surface de la végétation ( $m^2$ ).

$S_c$  : surface de la couverture ( $m^2$ ).

$S_s$  : surface du sol ( $m^2$ ).

$S_t$  : surface transversale ( $m^2$ ).

$S_{cint}$  : surface intérieure de la couverture ( $m^2$ ).

$S_{sint}$  : surface du sol intérieur ( $m^2$ ).

$S_{sext}$  : surface du sol extérieur ( $m^2$ ).

$T_c$  : température de la couverture ( $^\circ C$ ).

$T_v$  : la température de la végétation ( $^\circ C$ ).

$T_s$  : température de sol ( $^\circ C$ ).

$T_{cl}$  : température du ciel ( $^\circ C$ ).

$T_{aext}$  : température de l'air extérieur ( $^\circ C$ ).

$T_{aint}$  : température de l'air intérieur ( $^\circ C$ ).

$T_{sext}$  : température du sol extérieur ( $^\circ C$ ).

$T_{sint}$  : température du sol intérieur ( $^\circ C$ ).

$T_{cint}$  : température de la couverture intérieure ( $^\circ C$ ).

$TSV$  : temps solaire vrai (h).

$t$  : temps (s).

$U$  : humidité relative (%).

$U_m$  : la vitesse moyenne du déplacement de l'air intérieur (m/s).

---

$u_f$  : Vitesse du fluide (m/s).  
 $u$  : vecteur unitaire de la direction.  
 $V$  : vitesse du vent, (m/s).  
 $V_{\text{aint}}$  : volume de l'air intérieur, ( $\text{m}^3$ ).  
 $V_h =$  vitesse à hauteur  $h$  (m/s).  
 $V_s$  : volume de la serre ( $\text{m}^3$ ).  
 $W$  : l'humidité spécifique de l'air (kg/kg).  
 $W_{\text{aext}}$  : humidité absolue de l'air extérieur, (kg/kg).  
 $W_{\text{aint}}$  : humidité absolue de l'air intérieur, (kg/kg).  
 $W_c$  : humidité absolue de la couverture (kg/kg).  
 $W(T_{\text{cint}})$  : humidité spécifique de saturation à la température de la couverture (kg/kg).  
 $W_{\text{aint}}, W(T_{\text{sint}})$  sont respectivement l'humidité spécifique de l'air à l'intérieur de la serre et de l'air à la température  $T_s$  du sol intérieur (kg/kg).  
 $x$  : Variable d'espace dans la direction du flux. (m)  
 $\alpha$  : facteur d'absorption  
 $\delta$  : Déclinaison ( $^\circ$ ).  
 $\delta_r$  : angle de diffraction ( $^\circ$ )  
 $\omega$ : angle horaire( $^\circ$ ).  
 $\varepsilon_c$  : l'émissivité de la couverture.  
 $\varepsilon_{\text{cl}}$  : l'émissivité du ciel.  
 $\varepsilon_s$  : l'émissivité du sol.  
 $\varepsilon_v$  : l'émissivité de la couvert végétal.  
 $\varepsilon_i \varepsilon_{\text{aint}}$  : émissivité de la végétation et l'air intérieur.  
 $\varepsilon_v \varepsilon_{\text{sint}}$  : émissivité de la végétation et le sol intérieur.  
 $\varepsilon_i \varepsilon_v$  : émissivité de la végétation et la couverture.  
 $\lambda_c$ : Conductivité thermique du matériau de couverture (W/ m. k).  
 $\lambda_s$ : la conductivité thermique du sol (W/ m. k).  
 $\rho$  : facteur de réflexion  
 $\rho_a$  : la masse volumique de l'air ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).  
 $\rho_e$  : masse volumique de l'eau ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).  
 $\tau_a$  : est le coefficient d'atténuation.  
 $\tau$  : coefficient de transmission de couverture (%).  
 $\tau_g$  : facteur de transmission dans le global (%).

---

---

$\tau_{\text{ir}}$  : facteur de transmission dans l'infrarouge (%).

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

$\gamma$ : angle d'inclinaison par rapport au plan horizontal ( $^\circ$ ).

$\sigma$  : constante de Stefan Boltzmann. ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}^4$ ).

$\varphi$  : Latitude du lieu ( $^\circ$ ).

$dS'$  étant la projection sur le sol de l'élément de surface  $dS$ .

$dS_h$  : la projection de l'élément  $ds$  sur le plan horizontal.

$dS_{\text{ver}}$  : la projection de l'élément  $ds$  sur le plan vertical.

$\Delta T$  : écart de température entre l'extérieur et l'intérieur de la serre ( $^\circ\text{C}$ ).

$\Delta z$  : épaisseur de la couche du sol (m).

---

## SOMMAIRE

***DÉDICACE.***

***REMERCIEMENTS.***

***NOMENCLATURE.***

**Page**

**CHAPITRE I.**

I .1 .- GÉNÉRALITÉS ET CLIMATOLOGIE.	1
I .1.1 .- Introduction.	1
I .1.2 .- Définitions.	1
I .1.3 .- Différents types de serres.	2
I .2 .- Le climat sous serre.	3
I .2 .1 .- La lumière.	4
I .2 .2 .- La température.	4
I .2 .3 .- L'humidité.	4
I .2 .4 .- L'effet de serre.	5
I .2 .5 .- Le dioxyde de carbone.	5
I .2 .6 .- Le vent.	6
I .2 .7 .- L'orientation des serres.	6
I .2 .8 .- Le sol.	6
I .2 .9 .- L'aération des serres.	7
I .2 .10 .-Echanges radiatifs.	7
I .2 .11 .- Echanges convectifs.	8

**CHAPITRE II.**

II. 1.- LE POLYÉTHYLÈNE; MATÉRIAU DE COUVERTURE.	9
II .1 .1 .- Généralités.	9
II .1 .2.- Obtention.	10
II .2 .-Les différentes types de polyéthylènes.	10
II .3.-Les propriétés physico-chimique du polyéthylène.	12
II .3 .1.-Les Propriétés rhéologiques.	12
II .3 .2.-Les propriétés mécanique.	12
II .3 .3.- Les propriétés chimiques.	12
II .3 .4 .-Les propriétés électriques.	12

II.4.- Rayonnement et propriétés optique des matériaux.	14
II.4.1-Rayonnement.	14
II.4.1.1 -Nature du rayonnement.	14
II.4.1.2- Emission d'un corps.	14
II.4.2-Les propriétés optiques.	15
II.4.3.-Caractérisation radio métrique des matériaux de couverture de serre.	16

### **CHAPITRE III.**

III.- TRANSFERTS DE CHALEUR ET LES DIFFÉRENTS ÉCHANGES d'énergie.	18
III .1- Introduction.	18
III.1.1. Transfert de chaleur par rayonnement.	18
III.1.2. Transfert de chaleur par conduction.	19
III.1.3. Transfert de chaleur par convection.	20
III.1.4.-Détermination des échanges par convection.	22
III.2. LES DIFFÉRENTS ÉCHANGES D'ÉNERGIE.	23
III.2.1.Hypothèses simplificatrices.	24
III.2.2. Le rayonnement solaire au niveau de la serre.	24
III.2.2.1. les flux solaire reçu.	25
III.2.2.1.1. Détermination des rayonnements solaires direct et diffus.	25
III.2.2.1.2. Traitement de la composante diffuse D.	26
III.2.2.1.3. Traitement de la composante directe : données géométriques.	27
III.2.2.1.4. Le temps solaire.	28
III.2.3.-Echanges thermiques.	28
III.2.3.1.-Echanges radiatifs.	28
III.2.3.1.1.-L'échange radiatif entre le céleste et la couverture.	28
III.2.3.1.2.-L'échange radiatif entre le sol extérieur et la couverture.	29
III.2.3.1.3.-L'échange radiatif entre la végétation et la couverture.	29
III.2.3.1.4.-L'échange radiatif entre la végétation et l'air intérieur.	29
III.2.3.1.5.-L'échange radiatif entre le sol intérieur et la végétation.	29
III.2.3.1.6.-L'échange radiatif entre le sol intérieur et la couverture	30
III.2.3.1.7.-L'échange radiatif émis par la couverture.	30
III.2.3.1.8.-L'échange radiatif émis par la végétation.	30
III.2.3.1.9.-L'échange radiatif émis par le sol.	30

III.2.3.2.-Echanges convectifs.	30
III.2.3.2.1.-L'échange convectif entre le sol extérieur et l'air extérieur.	30
III.2.3.2.2.-L'échange convectif entre le sol intérieur et l'air intérieur.	30
III.2.3.2.3.-L'échange convectif entre la couverture et l'air extérieur.	31
III.2.3.2.4.-L'échange convectif entre la couverture et l'air intérieur.	31
III.2.3.2.5.-L'échange convectif entre la végétation et l'air intérieur.	31
III.2.3.2.6.-Déterminations des coefficients de transfert convectifs et radiatifs.	31
III.2.3.2.6.1.-Formulation de coefficient de transfert global K.	31
III.2.3.2.6.2.-Déterminations des coefficients de transfert convectifs.	32
III.2.3.2.6.2.1.-Détermination de coefficient de transfert à l'intérieur de la serre.	32
III.2.3.2.6.2.2.-Coefficient de transfert à l'extérieur de la serre.	34
III.2.3.2.6.3.-Déterminations des coefficients de transfert radiatifs.	34
III.2.3.2.6.3.1.-Expressions des coefficients radiatifs.	34
III.2.3.2.7.-Echange par le renouvellement de l'air.	35
III.2.3.2.7.1-Taux de renouvellement de l'air intérieur.	36
III.2.3.2.7.2.-Echange de l'air sec.	36
III.2.3.2.7.3.-Echange de l'air humide.	37
III.2.3.3.-L'échange conductif.	37
III.2.3.4.-Echanges massiques.	37
III.2.3.4.1.-La puissance échangée par évaporation / condensation.	37
III.2.3.4.2.-Evaporation au niveau du sol avec l'air intérieur.	39
III.2.3.4.3.-L'évaporation et l'évapotranspiration.	40
III.2.3.4.4.-Condensation.	40

#### **CHAPITRE IV.**

IV.- LES ÉQUATIONS DE BILAN D'ÉNERGIE.	42
IV.1.- Bilan énergétique dans la serre.	42
IV.1.1.-Bilan thermique de l'air extérieur.	43
IV.1.2.-Bilan d'énergie de la couverture plastique.	43
IV.1.3.-Bilan thermo-hydrique de l'air intérieur.	44
IV.1.3.1.-Bilan de chaleur sensible.	44

---

IV.1.3.2.-Bilan de chaleur latente.	44
IV.1.4.-Bilan d'énergie de la Végétation.	44
IV.1.5.-Bilan d'énergie du sol intérieur.	45
IV.1.6.-Bilan d'énergie du sol extérieur.	45
<b><u>CHAPITRE V.</u></b>	
V. – ÉTUDE EXPÉRIMENTALE – ASPECT CLIMATOLOGIQUE.	46
V.1.-Dispositif expérimental.	46
V.1.1.- La serre.	46
V.1.2.- La couverture.	47
V.1.3.- Les paramètres mesurés.	47
V.1.3.1.- Mesures à l'intérieur de la serre.	47
V.1.3.2.- Mesures à l'extérieur de la serre.	48
V.1.4.- Appareils utilisés.	48
V.2.- Aspect climatique.	49
V.2.1.- Les températures.	49
V.2.1.1.- Les températures maximales.	49
V.2.1.2.- Les températures minimales.	50
V.2.1.3.- Les températures moyennes.	51
V.2.2.-L'humidité.	51
V.3.-Résultats et interprétation.	53
V.3.1.-Microclimat et températures.	53
V.3.1.1.-Température.	53
V.3.1.1.1.-Evolution des températures maximales.	53
V.3.1.1.2.-Evolution des températures minimales.	54
V.3.2.-Microclimat et humidité.	55
V.3.2.1.-Humidités de l'air.	55
V.3.2.1.1.-Evolution de l'humidité maximale.	55
V.3.2.1.2.-Evolution de l'humidité minimale.	56
V.3.3.-Exemple de journées.	57
V.3.3.1.-Cas d'une période froide.	57
V.3.3.2.-Cas d'une période chaude.	58
V.3.3.3.-Cas d'évolution de la température à l'extérieure et l'intérieure de	59

tunnel.	
V.3.3.4.-Cas d'une journée moyenne (mélange chaude et fraîche).	60
V.3.3.5.-Températures en phase diurne.	60
V.3.3.6.-Températures en phase nocturne.	61
V.3.3.7.-La température du matériau constituant la serre.	63
V.4.-Le rayonnement solaire.	67
V.5.-Coefficient de transmission dans le global $\tau_g$ .	70
V.5.1.-Evolution des coefficients de transfert convectif.	71
V.5.1.1.-Coefficient de transfert convectif à l'intérieur.	71
V.5.1.2.-Coefficients de transfert convectif à l'extérieur.	72

## **CHAPITRE VI.**

VI. –ÉTUDE COMPARATIVE DE CLIMAT : Ouargla et Oran.	74
VI.1.-Introduction.	74
VI.2.-Présentation générale (Situation géographique).	74
VI.2.1.-La région d'Ouargla.	74
VI.2.2.-La région d'Oran.	74
VI.3.-Evolutions des températures.	75
VI.3.1.-Evolution des températures maximales.	76
VI.3.2.-Evolution des températures minimales.	76
VI.3.3.-Evolutions mensuelles des températures extérieures (Ouargla et Oran).	77
VI.3.4.-Evolutions mensuelles des écarts des températures extérieures: (moyennes, maximales et minimales) de (Ouargla - Oran).	78
VI.3.5.-Evolutions mensuelles des écarts (maximales – minimales) des températures extérieures (Ouargla et Oran).	80
VI.3.6.-Evolutions mensuelles des écarts (maximales – minimales) des températures extérieures (Ouargla - Oran).	81
VI.4.-Evolutions des humidités.	82
VI.4.1.-Evolutions des humidités maximales.	83
VI.4.2.-Evolutions des humidités minimales.	83
VI.4.3.-Evolutions mensuelles des humidités extérieures (Ouargla et Oran).	84
VI.4.4.-Evolutions mensuelles des écarts des humidités extérieures (Ouargla -Oran).	85

---

VI.4.5.-Evolutions mensuelles des écarts (maximales – minimales) des humidités extérieures (Ouargla et Oran).	86
VI.4.6.-Evolutions mensuelles des écarts (maximales – minimales) des humidités extérieures (Ouargla - Oran).	87
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE.</b>	89
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.</b>	91
<b>ANNEXE.</b>	95

---

# *Introduction générale:*

---

## **Introduction générale :**

La culture des plantes horticoles sous serres, a connu ces dernières années, une application croissante dans notre pays. La raison de ce développement est l'amélioration du niveau de la vie de la population, d'une part, et, d'autre part, la demande accrue de produits frais tout au long de l'année.

L'utilisation des serres est une technique importante dans le développement de l'agriculture, toutefois, une diminution de la production est remarquée pendant les périodes les plus froides, à cause d'une importante déperdition de l'énergie à travers les parois des serres. Cette insuffisance du maintien d'un climat adéquat dans la serre a interrompu une production en continu des produits cultivés, par conséquent une évolution de son prix de vente serait justifiée.

La serre tunnel à simple paroi (couverture) en polyéthylène est très utilisée dans ce domaine. Son rôle principal est de créer un microclimat, à partir des conditions extérieures locales, favorables à la croissance des plantes.

L'objectif de cette étude est de contribuer à l'étude des aspects tant théoriques qu'expérimentaux de l'utilisation ce mémoire est d'étudier le comportement des serre agricole à couverture de polyéthylène sous le climat du saharien.

Objectifs visés :

Détermination des critères d'efficacité thermiques et énergétiques en étudiant l'évolution des propriétés thermo-optiques et leurs influences sur le bilan de type de serre tunnel.

Le plan de travail que nous avons choisi pour mener cette étude est répartir comme suit :

- Généralités et climatologie des serres.
- Les modes de transferts de chaleur et les différents échanges d'énergie intervenant dans la modification de climat sous serre sont décrits.
- Matériau de la couverture ; le polyéthylène et sa propriété physico-chimique.
- La partie expérience dans laquelle la description de la serre, les différents paramètres agro climatiques de la serre et leurs évolutions dans le temps.
- Le bilan énergétique au niveau de chaque composant de la serre (la couverture, air extérieur, air intérieur, sol extérieur, sol intérieur et la végétation).

---

- Une comparaison avec les données similaires existantes pour une installation identique à Oran.

Enfin une conclusion générale, ainsi qu'un certain nombre recommandations que nous avons jugé utiles pour assurer un macroclimat idéal au bon développement des cultures sous serres.

---

# *Chapitre I :*

---

## **I.1.- Généralités et climatologie:**

### **I.1.1.-Introduction:**

La naissance véritable des serres, à large surface vitrée, date du début du XIX<sup>ème</sup> siècle grâce aux progrès dans la fabrication du verre comme en matière de chauffage (fabrication de tubes d'acier et usage du charbon).

Au XVIII<sup>ème</sup> siècle, les cloches sont utilisées pour accélérer la croissance de certaines plantes mais la notion de serre ne semble faire son apparition qu'au XIX<sup>ème</sup> siècle. [1]

Le grand développement actuel commence au début des années 50 qui sont marquantes à double titre avec l'apparition des serres maraîchères aux Pays-Bas (serres Venlo) et celle des serres plastiques dont la mise au point demandera plusieurs années.

A partir des années 50-60, développement dans les pays industrialisés à climat froid (Pays-Bas, Belgique, Grande-Bretagne...) de serres en verre, tandis que le Japon s'oriente vers des serres recouvertes de films plastiques (thermiques). Cette technique connaîtra par la suite une extension considérable, sous les climats méditerranéens.

Les serres de type tunnel sont largement utilisées dans le monde entier, ce sont des installations légères à ouvrants modulables qui ne demandent pas un investissement important. Cependant elles ne sont pas très performantes en été, car le climat estival est naturellement chaud.

### **I.1.2.-Définitions :**

Selon la norme française NF U57-001, la serre est une «enceinte destinée à la culture ou à la protection des plantes en exploitant le rayonnement solaire. Les dimensions de cette enceinte permettent à un homme de travailler aisément à l'intérieur». [2]

Cette enceinte, constituée principalement par un matériau de couverture transparent ou translucide, isole plus ou moins les cultures de l'environnement extérieur.

L'objectif fondamental des serres étant la production agricole en dehors de la saison naturelle de la culture. Pour créer des conditions intérieures optimales, il est souvent nécessaire de chauffer les serres, en particulier pendant les saisons froides.

Cependant, même dans les régions du sud, le coût du chauffage dépasse 30% de coût opérationnel total d'une serre [3].

---

### I .1.3.- Différents types de serres :

Une grande variété de modèles est actuellement proposée aux producteurs, dans la pratique, il est possible de distinguer et de classer les serres de différentes façons :

#### *a.- Classification technologique :*

✓ Selon l'architecture :

- La serre uni chapelle.



- La serre multi chapelle.



- La serre tunnel.



- Le bi-tunnel.



- Le multi-tunnel.



- 
- La serre gonflable.
  - La serre adossée.
  - La serre roulante...
- ✓ Selon le matériau de couverture :
- Matériaux Souples en film (par nature ou par adjonction de plastifiant) ;
  - Matériaux rigides ;
  - PVC non plastifié ;
  - Polyester armé de fibres de verre ;
  - Polycarbonate (PC) ;
  - Poly méthacrylate de méthyle (PMMA);
  - Verre ;
- ✓ Selon le degré de perfectionnement de la serre elle-même et de ses équipements de climatisation et de culture.

***b.- Classification professionnelle :***

- Serres et grands abris ;
- Serres lourdes et serres légères ;
- Serres froides, tempérées, chaudes :
  - Serres froides : 5 à 8°C (antigel) ;
  - Serres tempérées : 12 à 15°C ;
  - Serres chaudes : 20 à 25°C.
- Serres horticoles et serres maraîchères.

**I.2.- Le climat sous serre :**

Le climat est un facteur essentiel de l'activité physiologique des plantes. L'énergie du rayonnement solaire fixée sous forme chimique par les végétaux chlorophylliens est, à de rares exceptions près, la seule source primaire d'énergie en biologie.

L'environnement de la serre est représenté par un groupe de valeurs moyennes spatiales des facteurs climatiques, tel que la radiation, la température, l'humidité et la concentration du bioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) qui affecte l'augmentation et le développement de la plante.

L'environnement ainsi créé et contrôlé est connu sous le nom de microclimat de serre [4].

---

### I .2 .1 .-La lumière :

Les conditions d'éclairement sous la serre sont étroitement liées à l'éclairement naturel avec surtout une réduction quantitative de l'énergie solaire reçue et une légère modification qualitative plus ou moins importante selon les matériaux employés [5] et aux conditions de leur mise en œuvre (la forme, le volume de l'abri, son orientation, sa structure, etc.).

Il dépend aussi du climat extérieur et des caractéristiques de l'air et surtout les qualités physiques des matériaux de couverture. Dans le tableau (I.1), la transmission optique des principaux matériaux utilisés est donnée [5].

**Tableau (I.1) : Caractéristique optique de transmission  
des matériaux de couverture [5].**

Matériaux	Rayonnement solaire	Infrarouge thermique
Verre	0,85	0
P.V.C	0,80	0,30
E.V.A	0,80	0,60
Polyéthylène	0,80	0,80

### I .2 .2 .- La température :

La température de l'air dans la serre est le résultat du bilan énergétique de l'abri.

L'effet de serre a généralement les conséquences suivantes :

- **De nuit** : du fait de la réduction des pertes par rayonnement infrarouge, les températures minimales sont plus élevées qu'à l'extérieur. Cependant, par nuit claire, il peut se produire des inversions de températures, c'est-à-dire des abaissements plus marqués qu'en plein air.

- **De jour** : du fait du piégeage de l'énergie solaire et de la réduction des échanges convectifs, les températures de l'air sont beaucoup plus élevées qu'à l'extérieur et deviennent excessives lorsque le rayonnement est intense, en l'absence d'une ventilation.

### I .2 .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

---

saturation et la vapeur d'eau produite soit évacuée par le renouvellement de l'air, soit condensée au niveau des parois et sur la végétation lorsque la température de ces deux surfaces est inférieure à celle du point de rosé.

- ***Pendant la nuit*** : les serres étant généralement fermées, l'humidité relative est élevée, en cours de nuit, la température baisse, il se produit fréquemment des condensations sur les parois et sur la végétation (conditions favorables à certaines maladies cryptogamiques).

- ***Pendant le jour*** : l'humidité absolue augmente avec la transpiration mais l'élévation de la température de l'air peut entraîner un abaissement exagéré de son humidité relative et peut provoquer un véritable (stress hydrique) au niveau de la végétation.

#### **I .2 . 4.- L'effet de serre :**

L'énergie solaire qui pénètre dans la serre est absorbée par les plantes, le sol et les différentes structures. Il en résulte une augmentation de température et une augmentation d'émission de chaleur par ces différents corps sous forme de rayonnements infrarouges longs. Les matières plastique (thermique) ne laissant pas, en partie, sortir les rayonnements infrarouge 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 [6] :

- Le piégeage du rayonnement de grande longueur d'onde par le matériau de couverture. Il est d'autant plus important que le matériau est plus opaque dans le domaine.

- 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 [6].

#### **I .2 . 5.-Le dioxyde de carbone :**

Dans les cas des serres très étanches peu aérées, il est souhaitable de pouvoir réaliser un enrichissement en CO<sub>2</sub> qui peut être très bénéfique, aussi bien pour le rendement que pour la précocité s'il est judicieusement utilisé.

---

Dans les régions méridionales, où les besoins de la ventilation sont importants dès le début de la saison de culture et où les serres sont donc ouvertes pendant la majeure partie de la journée, l'enrichissement en CO<sub>2</sub> est plus difficilement applicable [7].

### **I .2 . 6.-Le vent :**

Le vent est considéré comme un déplacement d'air s'effectuant surtout horizontalement. Ce déplacement peut être caractérisé par sa vitesse et sa direction.

Dans les stations météorologiques, la vitesse et la direction sont mesurées à dix mètres au-dessus du sol.

La vitesse diminue lorsque l'on se rapproche du sol.

Il est possible de calculer la vitesse moyenne à une hauteur h au-dessus du sol en connaissant la vitesse de référence à 10 m (selon la formule d'Hellman) [2].

$$V_h = V_{10} [0,233 + 0,656 \log (h + 4,75)]. \quad (\text{m/s}) \quad (\text{I.1})$$

Avec  $V_h$  = vitesse à hauteur h

$V_{10}$  = vitesse à 10 m.

### **I .2 . 7 .- L'orientation des serres :**

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 de vents dominants 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 de mars à septembre, avec une répartition plus homogène [7], cette orientation (Nord-Sud) à l'avantage de réduire les effets néfastes des vents tant sur la structure que sur les déperditions énergétiques.

### **I .2 . 8 .- Le sol :**

En première analyse, le sol apparaît comme un complexe dynamique à trois phases : liquide, gaz et solide.

Dans cette étude l'intéressant est la phase solide, il est constitué de [8] :

✓ Elément organique : débris végétaux ou animaux en état de décomposition plus ou moins avancée.

✓ Eléments minéraux : particules de taille et de forme diverses : (Éléments grossiers "> 2mm" ; terre fine "< 2mm" ; argiles "<2µm").

Les valeurs moyennes de la masse volumique réelle des sols sont ainsi généralement comprises entre les valeurs suivantes [8] :

- sols minéraux :  $2600 \leq \rho_s \leq 2700$  (kg/m<sup>3</sup>).
- sols organiques :  $1400 \leq \rho_s \leq 2000$  (kg/m<sup>3</sup>).

Le tableau (I.2) présente les valeurs moyennes de la masse volumique  $\rho$ , la chaleur massique  $C_p$  et la conductivité  $\lambda$  du sol.

**Tableau (I.2) : Les valeurs moyennes de la masse volumique  $\rho$ , de la chaleur massique  $C_p$  et de la conductivité  $\lambda$  du sol [8].**

	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (J/ kg.K)	$\lambda$ (W/m.K)
sols minéraux	$2,65.10^3$	$0,80.10^3$	2,90
sols organiques	$1,70.10^3$	$1,90.10^3$	0,25

### **I .2 .9 .- L'aération des serres :**

L'aération des serres pour l'intermédiaire d'ouvrants est un des moyens disponibles pour contrôler les paramètres climatiques en période estivale. Elle joue un rôle essentiel dans la gestion du climat à l'intérieure des serres, car elle permet :

- ✓ De réguler la température dans la serre.
- ✓ De limiter l'humidité de l'air et défavorise le développement de pathologies fongiques.
- ✓ D'assurer l'alimentation des plantes en dioxyde de carbone par convection.

### **I .2. 10.-Echanges radiatifs :**

La transmission des rayonnements par les matériaux de couverture des serres se fait avec atténuation. La volonté d'étendre les périodes de culture à des saisons caractérisées par un faible éclairage et de basses températures, qui sont alors des facteurs limitant, conduit à rechercher des matériaux dont le coefficient de transmission soit :

- le plus élevé pour les radiations du visible et celles du proche infrarouge.
- le plus faible pour l'infrarouge thermique.

---

### **I .2. 11.- Echanges convectifs :**

Les échanges de chaleur entre la serre et l'extérieur se font par conduction au travers du matériau de couverture et par convection (naturelle ou forcée).

L'intensité de ces échanges dépendra des caractéristiques de la serre d'une part et d'autre part des conditions climatiques extérieures.

Le renouvellement de l'air de la serre se fait soit par les dispositifs d'aération, soit au niveau des défauts d'étanchéité, à un taux qui dépend de la vitesse du vent. Ce renouvellement de l'air permet à la serre d'échanger avec l'extérieur de la vapeur d'eau, de gaz carbonique et de la chaleur.

Le coefficient de transmission dépend en particulier des vitesses de l'air (à l'intérieur et à l'extérieur de la serre), et de l'état du ciel (tableau (I.3)). D'après [9].

**Tableau (I.3) : coefficient global de transmission thermique (k), de quelques matériaux en (W/m<sup>2</sup>. °C). (Condition standard : Te=-10°C ; Ti = 20°C ; vent 4 m/s).**

Paroi	Ciel clair	Ciel couvert
Film polyéthylène bd	8,8 à 9	7,1 à 7,2
Double paroi PE	6,4	4,2
Verre horticole (4 mm)	6,1	5,5
Polyester	7,2	6,2
Film EVA	7,8	6,6

---

## II. 1.- Le polyéthylène ; Matériau de la couverture :

### II .1 .1 .- Généralités :

Le polyéthylène (ou polythène) est un des polymères thermoplastiques, le plus simple et le moins cher, à l'heure actuelle, c'est un plastique inerte. Son nom vient du fait qu'il est obtenu par la polymérisation de monomères d'éthylènes.

L'éthylène est identifié chimiquement comme étant une oléfine (double liaison de carbone,  $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ ).

En 1899, Hans Von Pechmann, pharmacien allemand, a observé la formation d'une poudre terne blanchâtre pendant l'auto décomposition de diazométhane dans l'éther.

En 1900 ce composé fut identifié par les pharmaciens allemands Eugen Bamberger et Friedrich Tschirner comme étant le polyéthylène ( $[\text{CH}_2]_n$ ).

En 1935 les pharmaciens britanniques Eric Fawcett et Reginald Gibson ont obtenu un polyéthylène cireux, solide en essayant de faire réagir l'éthylène avec le benzaldéhyde à haute pression. Parce que le produit avait peu d'usage potentiel, son développement fut lent.

En conséquence, le premier polyéthylène industriel n'a été produit qu'en 1939 par les Industries Chimiques Impériales (ICI). Il a été utilisé en premier pendant la seconde guerre mondiale comme un isolant pour les câbles du radar.

En 1950 Carl Shipp Marvel, un pharmacien américain a découvert un produit semblable de haute densité, mais Dupont a manqué de reconnaître les possibilités de la nouvelle matière.

Il a été laissé à Karl Ziegler du Kaiser Wilhelm (maintenant Max Planck) Institut pour Recherche du Charbon à Mülheim under Ruhr, Germany, de gagner le Prix Nobel de Chimie en 1963 pour avoir inventer le polyéthylène basse densité linéaire, PEbdl, que Ziegler a produit réellement avec Erhard Holzkamp en 1953, en catalysant la réaction à pression basse avec un composé organométallique connu comme un catalyseur Ziegler.

En utilisant des catalyseurs et des méthodes de polymérisation différents, les scientifiques ont produit par la suite le polyéthylène avec diverses propriétés et des structures différentes.

La production mondiale de polyéthylène basse densité radicalaire dépasse 18 millions de tonnes par an et celle de PEhd est supérieure à 10 millions de tonnes en 1982.

Le polyéthylène et le polypropylène, furent les polymères les plus produites en l'an 2000.

## II .1 .2.- Obtention :

Le polyéthylène constitué de chaînes polymérisées de molécules carbonées en une structure complexe de formule générique :  $-(\text{CH}_2=\text{CH}_2)_n-$

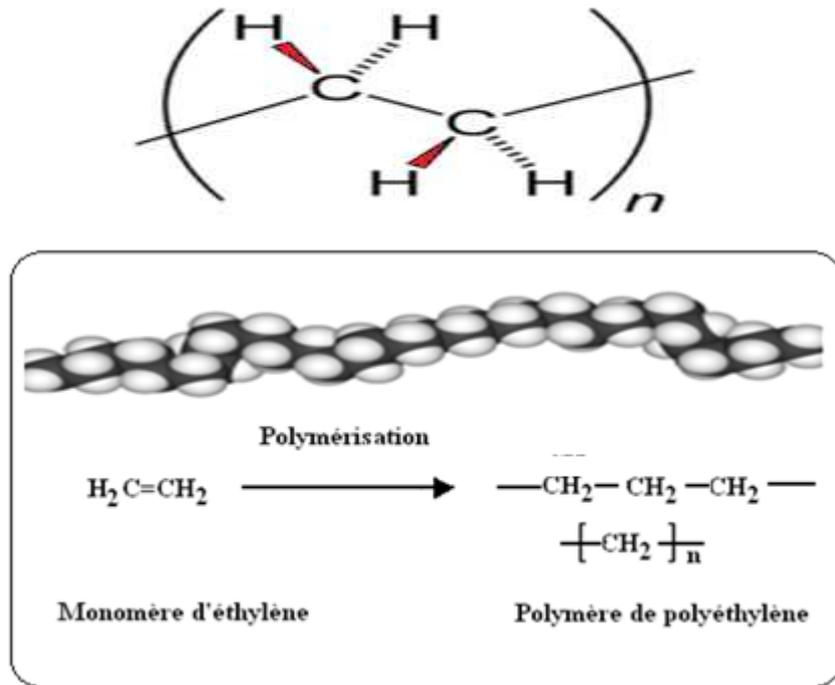


Fig. (II.1) : Obtention de polyéthylène.

Le polyéthylène est un polymère semi cristallin, composé d'une région cristalline et une région amorphe [10]. Il y a une différence considérable entre ces deux régions dans les propriétés physiques, tels que le module de Young et la tension à la fracture, la cristallisation du polyéthylène provoque souvent un changement violent dans les propriétés mécaniques [11].

## II .2 .-Les différents types de polyéthylènes :

Polyéthylène est un nom générique employé pour décrire les polyoléfinés issues de la polymérisation de l'éthylène.

Il existe de nombreux types de polyéthylènes, principalement deux grandes familles qui se définissent en fonction de leur masse volumique :

- polyéthylènes basse densité ou PEbd.
- polyéthylènes haute densité ou PEhd.

Les différentes propriétés physiques de polyéthylène basse densité (PEbd) et de polyéthylène haute densité (PEhd) sont données dans le Tableau (II-1).

**Tableau (II-1) : les propriétés physiques de PEbd et de PEhd : [12].**

	PEbd	PEhd
Structure	Ramifiée	Linéaire
Masse volumique	0,915 – 0,935 g/cm <sup>3</sup> .	0,935-0,970 g/cm <sup>3</sup>
Taux de cristallinité	55-70%	65-80%
T. max. de service	70 °C	80 °C
T .de fusion	110-120 °C	128-135 °C
Transition vitreuse	Env (- 110 °C)	Env (- 110 °C)
Indice de réfraction	1,51	1,54
Permittivité à 1 MHZ	2,2-2,35	2,3-2,4
Résistivité (Ω.cm)	10 <sup>15</sup> -10 <sup>18</sup> (Ω.cm)	10 <sup>15</sup> -10 <sup>18</sup> (Ω.cm)

Les polyéthylènes font partie des thermoplastiques. Ils ont des propriétés qui leur confèrent une malléabilité à chaud et une thermo-plasticité réversible, ils sont de natures différentes selon les modes de polymérisation :

A partir d'une méthode à haute pression, on obtient un polymère très ramifié appelé Polyéthylène basse densité (PEbd) :

- Polyéthylène basse densité radicalaire (PEbdr) ;
- Polyéthylène basse densité linéaire (PEbdl) ;

À l'inverse on utilise un procédé à basse pression pour obtenir le :

- Polyéthylène haute densité (PEhd) ;

Il existe par ailleurs un autre type de polyéthylène entre les deux formes précédentes PE moyenne densité (PEmd).

Les différents types de polyéthylènes et leurs densités sont représentés dans le Tableau (II-2).

**Tableau (II-2) : Les polyéthylènes et leurs densités [13].**

Nature du polyéthylène PE	Densité (kg/m <sup>3</sup> )
PE basse densité (PEbd)	910-940
PE basse densité linéaire (PEbdl)	920-940
PE basse densité radicalaire (PEbdr)	910-935
PE moyenne densité (PEmd)	940
PE haute densité (PEhd)	935-977

---

## **II .3.-Les propriétés physico-chimique du polyéthylène :**

### **II .3 .1.-Les Propriétés rhéologiques :**

Le PEbd présente une grande variété au niveau de la structure moléculaire et de la morphologie cristalline. Les propriétés intrinsèques du PEbd dépendent de trois facteurs essentiels :

- ✓ La cristallinité.
- ✓ La masse moléculaire.
- ✓ La répartition moléculaire.

A l'état fondu, les PEbd sont les liquides viscoélastiques non linéaires. Ils sont légèrement perméables aux hydrocarbures.

### **II .3 .2.-Les propriétés mécanique :**

Les PEbd à température ambiante présentent les caractéristiques suivantes :

- ✓ grande sensibilité au fluage.
- ✓ grande souplesse permettant la réalisation de films, fils, gaines, etc.
- ✓ un module de Young peu élevé, mais un allongement à la rupture important.

### **II .3 .3.- Les propriétés chimiques :**

✓ Les PE sont très stables chimiquement, ils sont pratiquement insolubles à des températures inférieures à 60°C.

- ✓ Ils résistent aux acides (sauf oxydants), aux bases et aux solutions de sels.
- ✓ Ils sont insolubles dans l'eau.
- ✓ Ils sont sensibles aux rayons Ultraviolets (UV) en présence de l'oxygène de l'air.

### **II .3 .4 .-Les propriétés électriques :**

- ✓ Les PE présentent une très bonne isolation électrique.
- ✓ Ils possèdent un faible facteur de perte diélectrique.
- ✓ Ils ont une faible résistivité et une rigidité diélectrique élevée.

Les qualités du polyéthylène peuvent de toute façon être résumées comme suit :

- ✓ Faible coût.
- ✓ Usinage facile.
- ✓ Ténacité et flexibilité aux basses températures.

- ✓ Absence d'odeur et de toxicité.
- ✓ Transparence.
- ✓ Le polyéthylène est aussi un excellent isolant électrique.

Les ordres de grandeur des valeurs de ces propriétés sont donnés dans le tableau (II-3) [14].

**Tableau (II-3) : Les ordres de grandeur des propriétés du PE [14].**

	Propriétés	Unité	PEbdr	PEbdl
Physique	Masse volumique.	Kg/m <sup>3</sup>	910-935	917-940
	Absorption. H <sub>2</sub> O	.....	< 0,24 %	
	Perméabilité aux gaz :			
	* vapeur. H <sub>2</sub> O	m <sup>2</sup> /Pa .s	4,9	Moins
	* O <sub>2</sub>		0,2	Perméable
	* CO <sub>2</sub>		0,7	que
	* N <sub>2</sub>		0,06	le PEbdr
Mécaniques	Contrainte traction.	M Pa	8- 15,5	10-19,5
	Contrainte rupture.	M Pa	9- 23	13-24
	Allongement à la rupture.	%	150- 1000	600-1200
	Module de Traction.	M Pa	200- 500	220-600
	Module de Flexion.	M Pa	60-400	.....
	Coefficient de Poisson.	.	0,45	.....
	Résistance. Choc.	MJ/mm <sup>2</sup>	350-1000	.....
	Duret .SHORE	.	40-47	48-63
Thermiques	Température de fusion	°C	110-120	.....
	Température maximal.	°C	80-85	.....
	Capacité thermique.	USI	3200	.....
	Conduction thermique.	USI	0,35	.....
	Coefficient dilatation.	USI	2,3.10 <sup>-4</sup>	.....
	Retrait.	%	1,5-3,5	.....
Electriques	Permittivité à 1 MHZ	.....	2,28-2,30	2,28-2,30
	Rigidité diélectrique.	.....	65	65
	Résistivité transversale.	.....	10 <sup>18</sup>	10 <sup>18</sup>

---

## II.4.- Rayonnement et propriétés optique des matériaux :

### II.4.1-Rayonnement :

#### II.4.1.1 -Nature du rayonnement :

Tout les corps, quelque soit leur état : solide, liquide ou gazeux ; émettent un rayonnement électromagnétique. Cette émission s'effectue au détriment de l'énergie interne du corps émetteur. Le rayonnement se propage de manière rectiligne à la vitesse de la lumière, il est constitué de radiations de différentes longueurs d'ondes.

Le photon est porteur d'une énergie :

$$E = h \nu = \frac{h c}{\lambda} . \quad (\text{II.1})$$

$h$  est la constante de Planck :  $h=6,62.10^{-34}$  J .s

La longueur d'onde du rayonnement et sa fréquence sont liées par la relation :

$$\lambda = C_0 / \nu . \quad (\text{II.2})$$

#### II.4.1.2- Emission d'un corps :

Tout les corps noirs rayonnent de la même manière. Le corps noir rayonne plus que le corps réel à la même température.

Un corps noir porté à la température absolue  $T$  émet un rayonnement dont l'énergie rayonnée, par unité de temps, et de surface, est :

$$Q = \sigma T^4 . \quad (\text{II.3})$$

Avec :

-  $Q$  : énergie rayonnée (émittance) en  $(W/m^2)$ .

-  $\sigma$  : constante de Stefan-Boltzmann.

$$\sigma = 5,675.10^{-8} (W/m^2 k^4).$$

-  $T$  : température absolue (k).

La valeur de l'émittance maximale  $Q_{\max}$  du spectre d'émission du corps noir a lieu pour une longueur d'onde maximale  $\lambda_{\max}$  telle que :

$$\lambda_{\max} . T = 2898 \mu m.k^\circ \quad (\text{II.4})$$

Avec :  $\lambda_{\max}$  en  $\mu m$  et  $T$  en degré kelvin.

Pour les corps gris, l'énergie émis pondérée par un coefficient appelé facteur d'émission ou émissivité  $\epsilon$ .

D'où :

$$Q' = \epsilon_{\lambda T} . \sigma T^4 \quad (W.m^{-2}). \quad (\text{II.5})$$

Avec:  $0 \leq \epsilon_{\lambda T} \leq 1$ .

Pour les corps réels l'émission (émissivité) est plus faible que celle du corps noir à la même température.

#### II.4.2-Les propriétés optiques :

Quand un rayon incident d'énergie  $\Phi_i$  frappe un corps à la température T ou atteint un objet :

- Une partie est réfléchié ;
- Une partie est absorbée ;
- Le reste est transmis ;

Lorsqu'un corps reçoit un flux incident  $\Phi_i$  sous une incidence quelconque (fig. II.2) sa surface en réfléchit une fraction  $\Phi_r$ , en absorbe une fraction  $\Phi_a$ , et en transmet une fraction  $\Phi_t$  de sorte que :  $\Phi_r + \Phi_a + \Phi_t = \Phi_i$  (II.6)

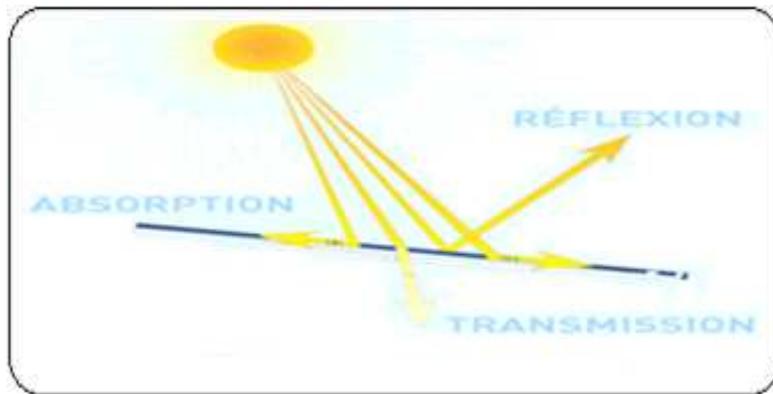


Fig. (II.2) : facteurs optique.

On définit l'aptitude du corps à ces trois phénomènes à l'aide des facteurs suivants :

$$\Phi_r / \Phi_i = \rho \quad \text{ou facteur de réflexion} \quad (\text{II.7})$$

$$\Phi_a / \Phi_i = \alpha \quad \text{ou facteur d'absorption} \quad (\text{II.8})$$

$$\Phi_t / \Phi_i = \tau \quad \text{ou facteur de transmission} \quad (\text{II.9})$$

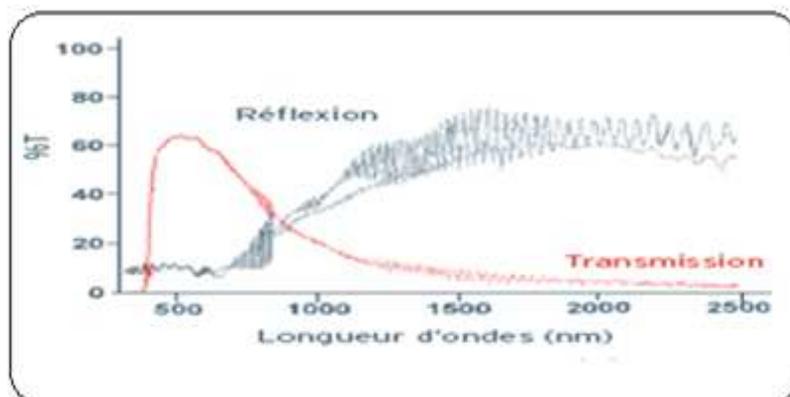


Fig. (II.3) : Spectres solaires.

Ces facteurs sont reliés par la relation suivante:

$$\alpha + \rho + \tau = 1. \quad (\text{II.10})$$

Un corps parfaitement opaque est caractérisé par un facteur de transmission nul ;

$$\tau = 0 \text{ et } \alpha + \rho = 1. \quad (\text{II.11})$$

Un corps totalement transparent est caractérisé par un facteur de transmission maximal:

$$\tau = 1 \text{ et } \alpha + \rho = 0. \quad (\text{II.12})$$

Les corps de surface lisse se comportant comme des miroirs réfléchissant le rayonnement incident de façon spéculaire : les lois de Descartes sont observées et la réflexion est alors maximale :

$$\rho = 1 \text{ et } \alpha + \tau = 0. \quad (\text{II.13})$$

Les corps rugueux se comportent, au contraire, en diffuseur : la réflexion du rayon incident se fait dans toutes les directions.

Pour les gaz :

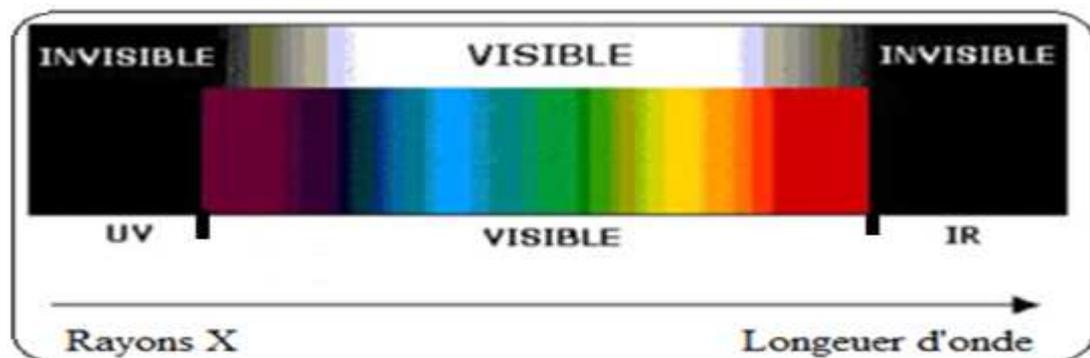
$$\alpha + \tau = 1. \quad (\text{II.14})$$

Lorsqu'un corps, pour une longueur d'onde et une température données, présente un facteur d'absorption  $\alpha_{\lambda,T}$  égal au facteur d'émission  $\varepsilon_{\lambda,T}$  relatif aux mêmes paramètres  $\lambda$  et  $T$  :  $\alpha_{\lambda,T} = \varepsilon_{\lambda,T}$ , on dit qu'il obéit à la loi de Kirchhoff.

### II.4.3.-Caractérisation radiométrique des matériaux de couverture de serre :

#### a) Le rayonnement d'origine solaire :

Le soleil nous apporte chaleur et lumière sous forme de rayonnement, la longueur d'onde de ce rayonnement est comprise entre 300 nm et 2500 nm, il se décompose en [16]:



- |    |  |                 |
|----|--|-----------------|
| a. | Ultraviolet.....                       | 300 à 380 (nm)  |
| b. | Visible.....                           | 380 à 760 (nm)  |
| c. | Photo synthétiquement actif (PAR)..... | 400 à 700 (nm)  |
| d. | Infrarouge (court et moyen).....       | 760 à 2500 (nm) |

---

**b) Le rayonnement d'origine terrestre :**

Les corps qui sont à une température basse émettent des rayonnements dans les longueurs d'onde relativement longue, entre 2500 et plus de 50 000 nanomètres correspondant à l'infrarouge long.

La caractérisation radiométrique d'un matériau consiste à déterminer ses facteurs de transmission, d'absorption et de réflexion pour les divers domaines précédents. L'absorption propre pouvant être négligée dans le cas des plastiques.

---

# *Chapitre III :*

---

### **III.- Transferts de chaleur et les différents échanges d'énergie :**

#### **III.1- Introduction :**

Les conditions climatiques au voisinage du sol résultant des échanges de chaleur et de masse entre le sol, la végétation, la couverture et l'atmosphère, ces transferts peuvent s'effectuer sous trois formes différentes [17].

- Par rayonnement : les échanges correspondent à un transfert d'énergie par des oscillations rapides de champ électromagnétiques qui ne nécessitent pas de milieu matériel pour se déplacer.
- Par conduction : les échanges ont lieu au sein des milieux sans mouvement, ce qui correspond à la propagation de proche en proche des énergies moléculaires internes.
- Par convection : les échanges s'effectuent grâce au transport de l'énergie thermique par un fluide en mouvement.

#### **III.1.1. Transfert de chaleur par rayonnement :**

Les mécanismes d'interaction de la lumière avec les plantes sont relativement complexes. La totalité du flux d'énergie solaire couvre le domaine de longueur d'onde comprise entre (0,15 et 4  $\mu\text{m}$ ) alors que celle de la surface terrestre est comprise dans le domaine allant de (3 à 100  $\mu\text{m}$ ) [17].

Il n'existe qu'un très faible recouvrement entre les deux spectres, ces deux domaines appelés les domaines des courtes et des grandes longueurs d'ondes. Le bilan radiatif est la somme algébrique des échanges radiatifs de courtes de grandes longueurs d'onde.

#### ***Les échanges de courte longueur d'onde :***

La couverture de la serre transmet la plus grande partie du rayonnement solaire utile à la photosynthèse (entre 0,4 et 0,7  $\mu\text{m}$ ). C'est pourquoi les échanges radiatifs de courte longueur d'onde ont été tout analysés en détail [18], [19].

Pour le rayonnement global incident donné au sommet d'un couvert végétal, l'intensité lumineuse en son sein dépend de son architecture ainsi que les propriétés optiques de ses différentes composantes et du sol. Le rayonnement incident (direct et diffus) peut varier considérablement d'un point à l'autre à cause des positions du soleil, des zones d'ombre et de pénombre [20], ce problème a été étudié pour une culture de rosiers sous serre [21].

---

D'une manière générale, il a été montré que :

- La proportion du rayonnement diffus est plus importante sous serre qu'un plein air.
- La disposition des cultures en rangs complexifie le traitement du problème [21,22].
- L'effet de la saison est très important sur la transmission du rayonnement sous serre.

C'est la raison pour laquelle, il est nécessaire de déterminer des valeurs moyennes, correspondant à une certaine intégration spatiale, pour décrire le profil lumineux à l'intérieur d'un couvert.

### ***Les échanges radiatifs de grandes longueurs d'ondes :***

Les apports d'énergie correspondent au rayonnement atmosphérique. Les échanges se produisent essentiellement entre le sol, les plantes, les parois et l'extérieur. La nature de la couverture joue donc un rôle prédominant. Les matériaux utilisés pour la couverture doivent être le plus transparent possible dans le domaine du visible, afin de favoriser la photosynthèse et être opaques dans le domaine des infrarouges thermiques pour optimiser l'effet de serre radiatif.

### **III.1.2. Transfert de chaleur par conduction :**

Dans les conditions naturelles, les échanges de chaleur par conduction concernent essentiellement les transferts thermiques dans le sol et à travers les parois. Compte tenu de la faible épaisseur des parois, on considère que les échanges sont stationnaires et on les intègre dans un coefficient global de transfert [23], [24]. Le sol n'est généralement pas homogène verticalement. Il peut être constitué par différentes couches qui ont des propriétés thermiques différentes (composition, humidité, texture...) de plus les propriétés thermique du sol peuvent varier en fonction du temps. C'est pourquoi on utilise des modèles numériques complexes, dans lesquels le sol peut être représenté comme l'empilement de couches homogènes ou les équations de base régissant les phénomènes de conduction peuvent être appliqués [25], [26].

La théorie de la conduction repose sur la relation de Fourier [27]: la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

$$\vec{\Phi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} (T). \quad (\text{W} / \text{m}^2). \quad (\text{III.1})$$

---

Ou sous forme algébrique (unidimensionnel):

$$\Phi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{W}). \quad (\text{III.2})$$

Avec :

$\Phi$  : Flux de chaleur transmis par conduction. (W).

$\lambda$  : Conductivité thermique de milieu. ( $\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ).

$x$  : Variable d'espace dans la direction du flux. (m).

$S$  : Aire de la section de passage du flux de chaleur. ( $\text{m}^2$ ).

### III.1.3. Transfert de chaleur par convection :

Les transferts de chaleur et de masse (vapeur d'eau,  $\text{CO}_2$ ) entre les surfaces naturelles et l'atmosphère en mouvement (vent) sont de type convectif. Il y a ainsi, globalement, transport de chaleur de la surface chaude vers la surface froide.

Ce mode d'échange de chaleur existe au sein des milieux dans lesquels il est généralement prépondérant.

Selon la circulation des fluides, on distingue trois formes de convection :

#### *La convection naturelle (libre) :*

La convection est dite naturelle quand le mouvement du fluide est dû à l'action simultanée des différences de température qui existent dans le milieu et d'un champ de force massique. La circulation résulte de la simple hétérogénéité des températures du fluide, notamment au voisinage des surfaces chaude et froide : le fluide échauffé ayant une masse volumique plus faible que le froid et la température de l'air croît, il reçoit une poussée d'Archimède relativement plus forte et il s'élève.

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

$$\text{Nu} = \frac{h L}{\lambda}. \quad \text{Nombre de Nusselt.} \quad (\text{III.3})$$

$$\text{Gr} = \frac{\beta g \Delta T \rho^2 L^3}{\mu^2}. \quad \text{Nombre de Grashof.} \quad (\text{III.4})$$

$$\text{Pr} = \frac{c_p \mu}{\lambda}. \quad \text{Nombre de Prandtl.} \quad (\text{III.5})$$

Avec :

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

---

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

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

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

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

$u$  : Vitesse du fluide. ( $\text{m / s}$ ).

$L$  : la longueur caractéristique de la surface. (m).

$\Delta T$  : L'écart de température paroi-fluide. ( $^\circ\text{C}$ ).

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

$g$  : L'accélération du pesanteur. ( $\text{m / s}^2$ ).

### ***La convection forcée :***

La convection est dite forcée lorsque le mouvement du fluide est provoqué par un champ de force extérieur (pompe, ventilateur...). Dans les conditions naturelles, la convection forcée est due au vent qui est lui-même la résultante du gradient local de la pression atmosphérique. Le fluide échange de la chaleur avec des parois, mais son mouvement est pratiquement peu influencé par les différences de température [28].

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

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu}. \quad \text{Nombre de Reynolds.} \quad (\text{III.6})$$

Avec :

$$Nu : \text{Nombre de Nusselt} \quad \text{et} \quad Pr : \text{Nombre de Prandtl.}$$

### ***La convection mixte :***

Ce cas se rencontre souvent dans les conditions naturelles, lorsque la vitesse de 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.

Reprenant l'hypothèse d'une parfaite homogénéité du climat sous serre, de nombreux auteurs ont calculés des coefficients d'échange entre l'air et les surfaces habituelles, pour une vitesse moyenne ou bien pour un gradient de température moyen entre l'intérieur et l'extérieur de la serre. Ces coefficients d'échange sont basés sur des corrélations déduites de l'analyse dimensionnelle [29].

Quelque soit le type de convection (libre ou forcée) et quelque soit le régime d'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent), le flux de chaleur est donné par la loi de *Newton* : [27].

$$\Phi = h S \Delta T \quad (\text{W}). \quad (\text{III.7})$$

Avec:

$\Phi$  : flux de chaleur par convection. (W).

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

$S$  : air de la surface. ( $\text{m}^2$ ).

$\Delta T$  : différence de température. ( $\text{°C}$ ).

### III.1.4.-Détermination des échanges par convection au niveau d'une serre :

Le transfert thermique de convection est un des mécanismes les plus importants de la perte de chaleur dans les serres. L'échange par convection se produit entre la toiture, le sol et la végétation, l'air intérieur et entre la toiture et l'air extérieur.

Le processus de transfert de la chaleur est gouverné par une combinaison de la convection forcée due à la pression de vent et la convection libre, due aux forces de flottabilité provoquées par des différences de la température entre les surfaces de la paroi et du sol, des plantes et de l'air. Ces deux modes de convection dépendent du type de la serre et du climat extérieur et de la condition de ventilation. En serre bien aérée, la convection forcée est dominante, en raison du mouvement d'air fort. En serre fermée strictement, due des vitesses intérieures très basses d'air, la convection libre est le processus le plus commun. La densité de flux de la chaleur de convection est proportionnelle à la différence de la température entre les surfaces et l'air. [30].

L'expression du nombre de *Nusselt* pour des écoulements laminaires et turbulents en modes de convection libre et forcée le long d'une plaque plane est présentée dans le tableau (III.1) d'après [31], [32] :

**Tableau (III.1) : Nombre de *Nusselt* le long d'une plaque plane.**

L'écoulement	Convection libre	Convection forcée
Laminaire	$\text{Nu} = 0,54(\text{Gr Pr})^{1/4}$ .	$\text{Nu} = 0,67. \text{Re}^{1/2} \text{Pr}^{1/3}$ .
Turbulent	$\text{Nu} = 0,14(\text{Gr Pr})^{1/3}$ .	$\text{Nu} = 0,306.\text{Re}^{4/5} \text{Pr}^{1/3}$ .

Afin de déterminer le coefficient de transfert de chaleur par convection, un critère doit être défini pour identifier le mode de la convection (forcée ou libre) et le type d'écoulement (laminaire ou turbulent). Le nombre de *Richardson* (Ri) donne un critère pour distinguer directement la convection forcée.

Quand  $(Re^2)$  est beaucoup plus que (Gr), les forces de flottabilité sont négligeables et la convection forcée est dominante tandis que l'état inverse a comme conséquence la convection libre. Les valeurs critiques de (Ri) pour les plaques planes horizontales semblables aux couches de la toiture, sol et de la végétation.

La distinction entre les écoulements laminaires et turbulents est basée sur le nombre de (Gr) pour la convection libre et (Re) pour la convection forcée. Le critère correspondant à l'air à 20 °C est également fourni dans le tableau (III.2) d'après [33]:

**Tableau (III.2) : Modes de convection et types d'écoulement.**

Mode de convection	Écoulement laminaire	Écoulement turbulent
Convection naturelle $(Ri = \frac{Gr}{Re^2} \geq 16)$ Pour 20°C d'air $(\frac{L\Delta T}{u^2} > 484).$	$(Gr \leq 10^8).$ $Nu = 0,54(Gr Pr)^{1/4}.$ $L^3 \Delta T < 0,63$	$(Gr > 10^8).$ $Nu = 0,14(Gr Pr)^{1/3}.$ $L^3 \Delta T > 0,63$
Convection mixte $(0,1 < \frac{Gr}{Re^2} < 16)$		
Convection forcée $(Ri = \frac{Gr}{Re^2} \leq 0,1)$ Pour 20 °C d'air $(\frac{L\Delta T}{u^2} < 3).$	$(Re \leq 5.10^4).$ $Nu = 0,67. Re^{1/2} Pr^{1/3}.$ $u.L < 0,75$	$(Re > 5.10^4).$ $Nu = 0,306.Re^{4/5} Pr^{1/3}.$ $u.L > 0,75$

### III.2. Les différents échanges d'énergie :

La serre comme la plupart des systèmes solaires thermiques est le siège de tous les modes de transfert de chaleur (échange radiatifs, convectifs, par renouvellement d'air et par changement de phase...) qui s'effectuent d'une part entre les différents nœuds dans la

---

serre et d'autre part entre les sous systèmes et le milieu extérieur (voûte céleste, air extérieur, sol extérieur environnant).

Le climat dans une serre est fonction des conditions climatiques telles que la température, l'humidité, la vitesse du vent et le rayonnement solaire.

Les phénomènes physiques qui interviennent dans le climat interne de la serre sont essentiellement des transferts thermiques et hydriques.

### III.2.1. Hypothèses simplificatrices :

Pour établir un bilan énergétique d'une serre, un certain nombre d'hypothèses simplificatrices peuvent être considérées pour écrire des équations de la balance d'énergie.

On a considéré les hypothèses suivantes:

- 1) : la serre est considérée comme un système physique dont les conditions aux limites sont les données météorologiques (température, humidité, vitesse de vent et rayonnement solaire global).
- 2) : La serre est de dimensions horizontales infinies (système unidimensionnel).
- 3) : Les températures de l'air intérieur et extérieur supposées uniformes.
- 4) : L'épaisseur de la couverture est très faible pour pouvoir y négliger les échanges conductifs.
- 5) : L'égalité des températures sur les deux faces du matériau de couverture  $T_{C2} \equiv T_{C1}$ .
- 6) : L'air de la serre est supposé transparent du point de vue radiatif.
- 7) : Les échanges thermiques sont unidirectionnels.
- 8) : La température du sol intérieur est, pendant la nuit, assez voisine de la température de l'air intérieur, soit :  $T_{sint} \equiv T_{aint}$ .

### III.2.2. Le rayonnement solaire au niveau de la serre:

L'originalité de la serre réside dans sa propriété de transmettre une grande partie du rayonnement solaire et, plus précisément, celui compris entre 400 et 700 nm et qui contribue au processus de la photosynthèse [16].

L'absorption du rayonnement à travers un matériau est proportionnelle à son intensité, à la distance de son trajet optique et au coefficient d'extinction [34]:

$$dI = -K I dx \quad [34] \quad (III.8)$$

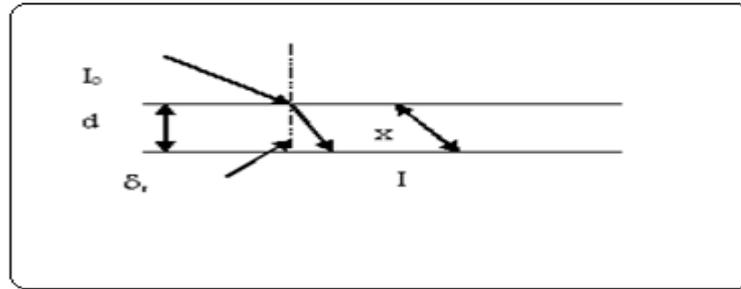
K : coefficient d'extinction constant pour l'ensemble du spectre solaire.

L'intégration de cette équation sur une épaisseur (d) du matériau donne :

$$\tau = I / I_0 = \exp (-K x) \quad (III.9)$$

$I_0$  : flux solaire incident.

$I$  : flux solaire transmis à travers une épaisseur ( $d$ ) du matériau.



**Figure (III.1) : Atténuation du rayonnement solaire**

Avec : 
$$x = \frac{d}{\cos \delta_r} .$$

$\delta_r$  : est l'angle de diffraction ( $^\circ$ )

$d$  : est l'épaisseur du matériau (m).

$\tau$  : est le coefficient d'atténuation.

A titre d'exemple le coefficient d'extinction de polyéthylène (PEbd) est [35]:

$$K_e = 1.65 \text{ cm}^{-1} .$$

### III.2.2.1. les flux solaire reçu :

Pour traiter le problème du rayonnement solaire au niveau de la serre, il nous faut calculer les quantités suivantes [36], [39] :

$Q_c$  : puissance absorbée par la paroi (couverture).

$Q_p$  : puissance absorbée par les plantes.

$Q_s$  : puissance absorbée par le sol.

La donnée de base du calcul est  $R_g$ .

$R_g$  : le rayonnement solaire global reçu sur une surface horizontale.

#### III.2.2.1.1. Calcul du flux global (direct et diffus) :

Le rayonnement global  $R_g$  se sépare en deux composantes [37]:

1- La composante directe qui provient directement du soleil  $I$  :

$$I = I^* \sin (h) . \tag{III.10}$$

$$I^* = I_0 [1 + 0,033 \cos (0,984 j)] . \tag{III.11}$$

$$I_0 = 1353 \text{ (W/ m}^2\text{)} \tag{III.12}$$

Avec  $j$ : le numéro du jour de l'année.

2- La composante diffuse D, qui provient indirectement du soleil après plusieurs diffusions: air, nuage,...

Il existe deux cas où le rayonnement global est totalement diffus ( $I=0$ ) :

- lorsque le ciel est couvert (conventionnellement nébulosité  $N=8$ ).
- juste avant le lever et après le coucher du soleil.

Il existe toujours une proportion de flux diffus dans le rayonnement global, même pour un ciel clair et quand le soleil est haut.

Nous considérons que par un ciel sans nuage la proportion (A) du flux diffus dans le rayonnement global varie avec la hauteur du soleil (h) de la façon suivante :

**Tableau (III.3) : part du rayonnement diffus selon la hauteur du soleil h [36].**

h (en degré)	0 à 2	5	10	20	30	60
A	1	0,8	0,5	0,3	0,25	0,2

Pour tenir compte de la nébulosité, et sachant que :

$$D = 1. R_g \quad \text{si } (N=8) \quad \text{(III.13)}$$

$$D = A. R_g \quad \text{si } (N=0) \quad \text{(III.14)}$$

On emploiera la formule linéaire suivante :

$$D = R_g. [A + (1-A) \frac{N}{8}]. \quad \text{(III.15)}$$

$$I = R_g. [(1-A) (1 - \frac{N}{8})]. \quad \text{(III.16)}$$

D et I sont le rayonnement diffus et direct incident sur une surface horizontale.

### III.2.2.1.2. Traitement de la composante diffuse D :

#### a) Au niveau de la couverture :

La puissance absorbée par la couverture de la serre est proportionnelle à la surface de sa projection sur plan horizontal [36]:

$$Q_c = \alpha S_c D \quad (W). \quad \text{(III.17)}$$

$S_c$  : surface de la projection horizontale de la paroi ( $m^2$ ).

$\alpha$  : coefficient d'absorption de la paroi au rayonnement solaire.

D : rayonnement diffus ( $W/m^2$ ).

#### b) Au niveau des végétations (plantes):

Au niveau des végétations (plantes) la puissance est [36]:

$$Q_v = L_{serre} n_{rang} (H_v + D_v) (1-a_v) D \quad (W). \quad \text{(III.18)}$$

---

$L_{\text{serre}}$  : longueur de la serre (m).

$n_{\text{rang}}$  : nombre de rang des végétations.

$H_v$  : hauteur des végétations (m).

$D_v$  : diamètre des végétations (=largeur d'un rang) (m).

$a_v$  : albédo des végétations.

$D$  : rayonnement diffus ( $W/m^2$ ).

**c) Au niveau du sol:**

Au niveau du sol la puissance est [36]:

$$Q_s = (1-a_s) S_s D. \quad (W). \quad (III.19)$$

$a_s$  : albédo du sol.

$S_s$  : surface du sol ( $m^2$ ).

Albédo du sol donné par la référence [37] :

- sol humide : 0,05 à 0,30.
- sol sec : 0,15 à 0,40.

### III.2.2.1.3. Traitement de la composante directe :

Le traitement de la composante directe est données géométriques par [36]:

$$I_i = I \cos i \quad (III.20)$$

$i$  : L'angle d'incidence du rayonnement direct ( $^\circ$ ).

$$\cos i = \cos (\alpha-a) \cdot \cos \gamma \cdot \cos h + \sin \gamma \cdot \sin h \quad (III.21)$$

$a$  : azimut solaire du plan vertical orienté vers le sud ( $^\circ$ ).

$\alpha$  : orientation du plan considéré par rapport au plan sud ( $^\circ$ ).

$\gamma$  : angle d'inclinaison par rapport au plan horizontal ( $^\circ$ ).

$h$  : la hauteur du soleil ( $^\circ$ ).

La hauteur du soleil  $h$  au dessus de l'horizon se calcule par la formule suivante : [9]

$$\sin (h) = \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\omega) + \sin(\delta)\sin(\varphi). \quad (III.22)$$

Et l'azimut  $a$  par la relation :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta)\sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (III.23)$$

Avec  $\varphi$  latitude du lieu.

La valeur de la déclinaison calculée par [9] :

$$\delta = 23,45 \sin [0,980 (j+284)]. \quad (III.24)$$

$\delta$  : Déclinaison ( $^\circ$ ).

$j$  : le numéro du jour de l'année.

---

On définit l'angle horaire  $\omega$  par :

$$\omega = 15 (\text{TSV}-12). \quad (\text{III.25})$$

TSV : temps solaire vrai (h).

$\omega$  : angle horaire ( $^\circ$ ).

#### III.2.2.1.4. Le temps solaire :

##### a) Temps solaire vrai :

$$\text{TSV} = 12 + \frac{\omega}{15}. \quad (\text{h}) \quad (\text{III.26})$$

##### b) Temps solaire moyen :

$$\text{TSM} = \text{TSV} - \text{E}. \quad (\text{h}) \quad (\text{III.27})$$

E : est la correction de l'équation de temps en heures.

$$\text{E} = \frac{1}{60} [9,87 \sin (2x)-7,53\cos(x) -1,5 \sin(x)] \quad (\text{III.28})$$

Avec : 
$$x = \frac{360}{365} (j - 81). \quad (x \text{ en degrés}) \quad (\text{III.29})$$

j : le numéro du jour de l'année.

##### c) Temps universel:

$$\text{TU} = \text{TSM} - \frac{\lambda}{15}. \quad (\lambda \text{ en degrés}) \quad (\text{III.30})$$

##### d) Temps légal ou local [38]:

$$\text{TL} = \text{TU} + \text{K} \quad (\text{h}). \quad (\text{III.31})$$

### III.2.3.-Echanges thermiques :

#### III.2.3.1.-Echanges radiatifs :

##### III.2.3.1.1.-L'échange radiatif entre le céleste et la couverture :

La puissance radiative entre le céleste et la couverture donnée par [39]:

$$Q_{c,cl}^r = \varepsilon_c \varepsilon_{cl} \sigma S_c F_{c,cl} (T_c^4 - T_{cl}^4). \quad (\text{W}). \quad (\text{III.32})$$

$\varepsilon_{cl}$  : l'émissivité du ciel.

$\varepsilon_c$  : l'émissivité de la couverture.

$S_c$  : la surface de la couverture ( $\text{m}^2$ ).

$T_c$  : température de la couverture ( $^\circ\text{C}$ ).

$T_{cl}$  : température du ciel ( $^\circ\text{C}$ ).

$F_{c,cl}$ : facteur de forme entre la couverture et le ciel.

Or 
$$Q_{c,cl}^r = - Q_{cl,c}^r$$

$$S_c F_{cs} = S_s F_{sc} \quad (\text{III.33})$$

Il y a plusieurs formules qui donnent la température de ciel, notamment celle de [40] :

$$T_{cl} = P_{cl} (T_{aext} - 6) + (1 - P_{cl}) (0,0552 T_{aext}^{1,5}) \quad (\text{III.34})$$

$$\epsilon_c = 1 - 0,261 \cdot \exp[-7,77 \cdot 10^{-4} (T_{aext} - 273)^2]. \quad (\text{III.35})$$

$$\epsilon_c = 0,787 + 0,64 \ln (T_{aext} / 273). \quad (\text{III.36})$$

$P_{cl}$  est la fraction de nuages à couvert la surface de la serre.

Et celle de Swinbank [34], [36], Pour  $P_{cl} = 0$

$$T_{cl} = 0,0552 T_{aext}^{1,5}. \quad (\text{III.37})$$

$T_{aext}$  : température de l'air extérieur (°C).

### III.2.3.1.2.-L'échange radiatif entre le sol extérieur et la couverture:

La puissance radiative entre le sol et la couverture donnée par [39]:

$$Q_{sext,c}^r = \epsilon_{sext} \epsilon_c \sigma S_{sext} F_{sext,c} (T_{sext}^4 - T_c^4). \quad (\text{W}). \quad (\text{III.38})$$

$\epsilon_{sext}$  : l'émissivité du sol extérieur.

$S_{sext}$  : la surface du sol extérieur (m<sup>2</sup>).

$T_c$  : température du sol extérieur (°C).

$F_{sext,c}$ : facteur de forme entre le sol extérieur et la couverture.

Or  $Q_{c,s}^r = -Q_{s,c}^r$  et  $S_c F_{cs} = S_s F_{sc}$

### III.2.3.1.3.-L'échange radiatif entre la végétation et la couverture :

La puissance radiative entre la végétation et la couverture donnée par [39] :

$$Q_{v,c}^r = \epsilon_v \epsilon_c \sigma S_v F_{v,c} (T_v^4 - T_c^4) \quad (\text{W}). \quad (\text{III.39})$$

$F_{v,c}$ : facteur de forme entre la végétation et la couverture.

$S_v$  : surface de la végétation (m<sup>2</sup>).

$\epsilon_i \epsilon_v$  : émissivité de la végétation et la couverture.

### III.2.3.1.4.-L'échange radiatif entre la végétation et l'air intérieur :

La puissance radiative entre la végétation et l'air intérieur donné par [39]:

$$Q_{v,aint}^r = \epsilon_v \epsilon_{aint} \sigma S_v F_{v,aint} (T_v^4 - T_{aint}^4). \quad (\text{W}). \quad (\text{III.40})$$

$F_{v,aint}$ : facteur de forme entre la végétation et l'air intérieur.

$S_v$  : surface de la végétation (m<sup>2</sup>).

$\epsilon_i \epsilon_{aint}$  : émissivité de la végétation et l'air intérieur.

### III.2.3.1.5.-L'échange radiatif entre le sol intérieur et la végétation:

La puissance radiative entre le sol intérieur et la végétation donnée par [39]:

$$Q_{sint,v}^r = \epsilon_{sint} \epsilon_v \sigma S_{sint} F_{sint,v} (T_{sint}^4 - T_v^4). \quad (\text{W}). \quad (\text{III.41})$$

$F_{sint,v}$  : facteur de forme entre le sol et la végétation.

$S_{sint}$  : surface du sol intérieur (m<sup>2</sup>).

---

$\varepsilon_v \varepsilon_{\text{sint}}$  : émissivité de la végétation et le sol intérieur.

### III.2.3.1.6.-L'échange radiatif entre le sol intérieur et la couverture:

La puissance radiative entre le sol intérieur et la couverture donnée par [39]:

$$Q^r_{\text{sint,c}} = \varepsilon_{\text{sint}} \varepsilon_c \sigma S_{\text{sint}} F_{\text{sint,c}} (T_{\text{sint}}^4 - T_c^4). \quad (\text{W}). \quad (\text{III.42})$$

$F_{\text{sint,v}}$  : facteur de forme entre le sol intérieur et la couverture.

$S_{\text{sint}}$  : surface du sol intérieur (m<sup>2</sup>).

$\varepsilon_v \varepsilon_{\text{sint}}$  : émissivité de la végétation et le sol intérieur.

### III.2.3.1.7.-L'échange radiatif émis par la couverture :

$$Q^r_c = \varepsilon_c (1 - F_{c,\text{aint}}) \sigma S_c \cdot T_c^4 \quad (\text{W}). \quad (\text{III.43})$$

$\varepsilon_c$  : l'émissivité de la couverture.

$S_c$  : la surface de la couverture (m<sup>2</sup>).

$F_{c,\text{aint}}$ : facteur de forme entre la couverture et l'air intérieur .

$T_c$  : la température de la couverture (°C).

### III.2.3.1.8. L'échange radiatif émis par la végétation :

$$Q^r_v = \varepsilon_v \sigma S_v T_v^4 \quad (\text{W}). \quad (\text{III.44})$$

$\varepsilon_v$  : l'émissivité de la couvert végétal.

$T_v$  : la température de la végétation (°C).

### III.2.3.1.9. L'échange radiatif émis par le sol

$$Q^r_s = \varepsilon_s \sigma S_s T_s^4. \quad (\text{W}). \quad (\text{III.45})$$

$\varepsilon_s$  : l'émissivité du sol.

$T_s$  : la température du sol (°C).

### III.2.3.2.-Echanges convectifs :

#### III.2.3.2.1.-L'échange convectif entre le sol extérieur et l'air extérieur :

$$Q^c_{(s,a)\text{ext}} = h^c_{(s,a)\text{ext}} S_{\text{sext}} (T_{\text{sext}} - T_{\text{aext}}). \quad (\text{W}). \quad (\text{III.46})$$

$h^c_{(s,a)\text{ext}}$ : coefficient d'échange convectif entre le sol extérieur et l'air extérieur (W/m<sup>2</sup>°C).

$S_{\text{sext}}$  : surface du sol extérieur (m<sup>2</sup>).

$T_{\text{aext}}$  : température de l'air extérieur (°C).

$T_{\text{sext}}$  : température du sol extérieur (°C).

### III.2.3.2.2.-L'échange convectif entre le sol intérieur et l'air intérieur :

$$Q_{(s,a)int}^c = h_{(s,a)int}^c S_{sint} (T_{sint} - T_{aint}). \quad (W). \quad (III.47)$$

$h_{(s,a)int}^c$ : coefficient d'échange convectif entre le sol intérieur et l'air intérieur ( $W/m^2\text{°C}$ ).

$S_{sint}$  : surface du sol intérieur ( $m^2$ ).

$T_{aint}$  : température de l'air intérieur ( $\text{°C}$ ).

$T_{sint}$  : température du sol intérieur ( $\text{°C}$ ).

On note que :  $h_{(s,a)int}^c = h_{(c,a)int}^c$  d'après la référence [7].

### III.2.3.2.3.-L'échange convectif entre la couverture et l'air extérieur:

La puissance convective entre la couverture et l'air extérieur donnée par [39]:

$$Q_{c,aext}^c = h_{c,aext}^c S_c (T_c - T_{aext}). \quad (W). \quad (III.48)$$

$h_{c,aext}^c$ : coefficient d'échange convectif entre la paroi et l'air extérieur ( $W/m^2\text{°C}$ ).

$S_c$  : surface de la couverture ( $m^2$ ).

$T_c$  : température de la couverture ( $\text{°C}$ ).

$T_{aext}$  : température de l'air extérieur ( $\text{°C}$ ).

### III.2.3.2.4.-L'échange convectif entre la couverture et l'air intérieur:

La puissance convective entre la couverture et l'air intérieur donnée par [39]:

$$Q_{c,aint}^c = h_{c,aint}^c S_c (T_c - T_{aint}). \quad (W). \quad (III.49)$$

$h_{c,aint}^c$ : coefficient d'échange convectif entre la couverture et l'air intérieur ( $W/m^2\text{°C}$ ).

$T_c$  : température de la couverture ( $\text{°C}$ ).

$T_{aint}$  : température de l'air intérieur ( $\text{°C}$ ).

### III.2.3.2.5.-L'échange convectif entre la végétation et l'air intérieur :

La puissance convective entre la végétation et l'air intérieur donnée par [39]:

$$Q_{v,aint}^c = h_{v,aint}^c S_v (T_v - T_{aint}). \quad (W). \quad (III.50)$$

$h_{v,aint}^c$ : coefficient d'échange convectif entre la végétation et l'air intérieur ( $W/m^2\text{°C}$ ).

$T_c$  : température de la ( $\text{°C}$ ).

$T_{aint}$  : température de l'air intérieur ( $\text{°C}$ ).

$S_v$  : surface de la végétation ( $m^2$ ).

### III.2.3.2.6.-Déterminations des coefficients de transfert convectifs et radiatifs:

#### III.2.3.2.6.1.-Formulation de coefficient de transfert global K:

(K transfert dû à la convection et à la conduction) :

Pour accéder à la détermination de K, nous sommes obligés de faire appel à la méthode du bilan d'énergie.

En négligeant le terme correspondant au transfert de chaleur latente, le bilan énergétique,  $W$  par  $m^2$  de paroi, s'écrit, en régime nocturne et permanent:

a) **À la face intérieure de la couverture :**

- De l'air intérieur à la face interne selon :

$$Q_c = h_{(c,a)int} S_c (T_{cint} - T_{aint}) \quad (W). \quad (III.51)$$

b) **À travers la couverture :**

- De la face interne à la face externe selon :

$$Q_c = (T_{cint} - T_{cext}) (\lambda/e). \quad (W). \quad (III.52)$$

$e$  : Epaisseur du matériau de couverture (m).

$\lambda$ : Conductivité thermique du matériau de couverture. (W/m. °C).

c) **À la face extérieure de la couverture :**

- De la face extérieure de la couverture à l'air extérieur selon :

$$Q_c = h_{(c,a)ext} S_c (T_{cext} - T_{aext}) \quad (W). \quad (III.53)$$

- De l'air intérieur à l'air extérieur selon :

$$Q_c = K (T_{aint} - T_{aext}). \quad (W). \quad (III.54)$$

$h_{cint}$  : Coefficient d'échanges superficiels au niveau de la couverture interne.

$h_{cext}$  : Coefficient d'échanges superficiels au niveau de la couverture externe.

Puisque:  $(T_{aint} - T_{aext}) = (T_{aint} - T_{cint}) + (T_{cint} - T_{cext}) + (T_{cext} - T_{aext})$ .

On montre facilement que :

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{h_{(c,a)int}} + \frac{1}{h_{(c,a)ext}} + \frac{1}{(\lambda/e)}. \quad (III.55)$$

La contribution du terme relatif à la conduction  $1/(\lambda/e)$  insignifiante pour les matériaux plastiques. On peut, par conséquent, négliger ce terme, ce qui donne :

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{h_{(c,a)int}} + \frac{1}{h_{(c,a)ext}}.$$

On a en définitive:

$$k = \frac{h_{(c,a)int} \cdot h_{(c,a)ext}}{h_{(c,a)int} + h_{(c,a)ext}}. \quad (III.56)$$

---

### III.2.3.2.6.2-Déterminations des coefficients de transfert convectifs :

#### III.2.3.2.6.2.1.-Détermination de coefficient de transfert à l'intérieur de la serre:

Pour simplifier les complications des expressions déterminant les coefficients d'échange convectif externe et interne, nous avons considéré que l'air intérieur et extérieur a des températures uniformes.

Les coefficients des échanges convectifs dépendent nettement de nombreux paramètres : vitesse du vent, géométrie des parois, écart des températures, etc.

##### a) Entre l'air intérieur et la couverture intérieure de la serre : $h_{(c,a)int}^c$ :

Pour déterminer  $h_{(c,a)int}^c$  entre la paroi et l'air intérieur on peut retenir l'expression proposée par: [40], [41]

$$h_{(a,c)int}^c = 1,95(T_{aint} - T_{cint.})^{0,3} \quad (W/m^2 \text{ } ^\circ C) \quad (III.57)$$

L'équation est valide pour :

$$(T_{aint} - T_{cint.}) \leq 11,1^\circ C.$$

##### b) Entre le sol intérieur et l'air intérieur de la serre :

Entre le sol et l'air intérieur nous utilisons les expressions données par: [29], [40]

$$h_{(s,a)int}^c = 1,52(T_{sint} - T_{aint})^{0,33} + 5,2 (U_m/L_s)^{0,5} . \quad (W/m^2 \text{ } ^\circ C) \quad (III.58)$$

$h_{(s,a)int}^c$  : coefficient de transfert convective entre le sol et l'air intérieur ( $W/m^2/^\circ C$ ).

$S_s$  : surface intérieure de sol. ( $m^2$ )

$L_s$  : longueur de la serre (m)

$T_s$  : température de sol ( $^\circ C$ ).

Avec :

$U_m$  : la vitesse moyenne du déplacement de l'air intérieur donnée par :

$$U_m = (V_s/S_t) \left( \frac{R}{3600} \right) \quad (m/s) \quad (III.59)$$

$$U_m = (L_s \frac{R}{3600}) \quad (m/s) \quad (III.60)$$

$R$  : taux de renouvellement horaire de l'air intérieur de la serre ( $h^{-1}$ ).

$S_t$  : surface transversale ( $m^2$ )

$V_s$  : volume de la serre ( $m^3$ )

$L_s$  : longueur de la serre (m).

**c) Entre la végétation et l'air intérieur de la serre :**

En assimilant une feuille de plante à une plaque plane placée dans un écoulement d'air à incidence nulle, les lois régissant le transfert convectif s'écrivent :

➤ régime turbulent :  $Re > 3.10^5$

$$Nu = \frac{0,036 Re^{0,6} Pr}{1 + 0,83 (Pr^{0,6} - 1)} \quad [42] \quad (III.61)$$

➤ régime laminaire :  $Re < 3.10^5$

$$Nu = 0,67 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad [42] \quad (III.62)$$

Et par [43] :

$$Nu = 0,37 (Gr + 6,92 Re^2)^{0,25} \quad [43] \quad (III.63)$$

$$h_{(v,a)int}^c = Nu \frac{\lambda_{aint}}{D_v} \quad (III.64)$$

$D_v$  : dimensions moyenne d'une feuille de végétation.

**III.2.3.2.6.2.2.-Coefficient de transfert à l'extérieur de la serre:  $h_{(c,a)ext}^c$  :**

Il existe plusieurs corrélations déterminant le coefficient d'échange convectif : Nous utilisons une formule plus simple de calcul du coefficient d'échange extérieur et celle de Mc Adams [34], [36].

$$h_{(a,c)ext}^c = 5,7 + 3,8 V \quad (W/m^2 \text{ } ^\circ C) \quad (III.65)$$

et  $V \leq 7,72$  (m/s)  $\approx 30$  (km/h).

Pour déterminer  $h_{(c,a)ext}^c$  entre la paroi et l'air extérieur on peut retenir l'expression proposée par: [40], [41].

$$h_{(a,c)ext}^c = 0,95 + 6,76 V^{0,49} \quad (W/m^2 \text{ } ^\circ C) \quad (III.66)$$

L'équation est valide pour :

$$(T_{aext} < T_{cext}) \quad \text{et} \quad V \leq 6,3 \text{ (m/s)}.$$

Où V est la vitesse du vent à l'extérieur de la serre (m/s).

**III.2.3.2.6.3.-Déterminations des coefficients de transfert radiatifs:  $h_{(c,a)int}^r$  et  $h_{(c,a)ext}^r$  :**

**III.2.3.2.6.3.1.-Expressions des coefficients radiatifs :  $h_{(c,a)int}^r$  et  $h_{(c,a)ext}^r$  :**

Pour déterminer les coefficients radiatifs:  $h_{(c,a)int}^r$  et  $h_{(c,a)ext}^r$ , en négligeant la réflexion dans l'IR [44] on obtient :

- À l'intérieur de la serre :

$$h_{(c,a)int}^r = [-\varepsilon f_{cs(int)} \sigma T_c^4 - f_{ccl} f_{cs(int)} \tau_{ir} \sigma T_{cl}^4 + f_{cs(int)} \sigma T_{sint}^4] / (T_{aint} - T_c). \quad (III.67)$$

- À l'extérieur de la serre :

$$h_{(c,a)ext}^r = [\varepsilon \sigma T_c^4 + f_{cc} \tau_{ir} \varepsilon \sigma T_c^4 + f_{cs(int)} \tau_{ir} \sigma T_{sint}^4 - f_{ccl} \sigma T_{cl}^4 - f_{cs(ext)} \sigma T_{sext}^4 + f_{ccl} f_{cc} \tau_{ir}^2 \sigma T_{cl}^4 + f_{cs(ext)} \tau_{ir}^2 \sigma T_{sext}^4] / (T_c - T_{aext}). \quad (III.68)$$

Avec :

$$F_{c,cl} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{S_s}{S_p}\right) = \frac{1}{2} (1 + b) \quad [45].$$

$$b = \left(\frac{S_s}{S_p}\right).$$

$S_s$  : Surface du sol de serre.

$S_c$  : Surface de la couverture de serre.

$$F_{cs(ext)} = 1 - f_{c,cl} \text{ (par définition)}$$

$$f_{cs(int)} = \frac{S_s}{S_c}.$$

(Par la loi de réciprocité) [46] on a :

$$S_s f_{sc(int)} = S_c f_{cs(int)}$$

et puisque :  $f_{sc(int)} = 1$ .

on prend :  $f_{cs(int)} = \frac{S_s}{S_c}$ .

et :  $f_{cc} = 1 - f_{cs(int)}$  (par définition)

On peut admettre, en première approximation, qu'en régime nocturne la température du sol extérieur est assez voisine de la température de l'air extérieur, soit :

$T_{sext} \equiv T_{aext}$  [47]. Et que la température du sol intérieur est, pendant la nuit, assez voisine de la température de l'air intérieur, soit :  $T_{sint} \equiv T_{aint}$  [47].

En tenant compte que  $\varepsilon = (1 - \tau_{ir})$ , on peut encore écrire :

- À l'intérieur de la serre :  $T_{sint} \equiv T_{aint}$  :

$$h_{(c,a)int}^r = [-(1 - \tau_{ir}) f_{cs(int)} \sigma T_c^4 - f_{ccl} f_{cs(int)} \tau_{ir} \sigma T_{cl}^4 + f_{cs(int)} \sigma T_{aint}^4] / (T_{aint} - T_c). \quad (III.69)$$

- À l'extérieur de la serre :  $T_{sext} \approx T_{aext}$  :

$$h_{(c,a)ext}^r = [(1 - \tau_{ir}) \sigma T_c^4 + f_{cc} \tau_{ir} (1 - \tau_{ir}) \sigma T_c^4 + f_{cs(int)} \tau_{ir} \sigma T_{aint}^4 - f_{ccl} \sigma T_{cl}^4 - f_{cs(ext)} \sigma T_{aext}^4 + f_{cc} \tau_{ir}^2 \sigma T_{aext}^4 + f_{cs(ext)} \tau_{ir}^2 \sigma T_{aext}^4] / (T_c - T_{aext}). \quad (III.70)$$

Le coefficient de transfert thermique à travers la couverture de la serre dû à la convection/ conduction fonction de la vitesse de vent par la relation (Expression empirique) [7]:

$$K = \frac{5V+7,9}{3,2+V} \quad (\text{III.71})$$

### III.2.3.2.7.-Echange par le renouvellement de l'air :

Le renouvellement de l'air de la serre se fait soit par le dispositif d'aération soit aux niveaux des défauts d'étanchéité, à un taux qui dépend de la vitesse du vent.

#### III.2.3.2.7.1-Taux de renouvellement de l'air intérieur :

Le taux de renouvellement de l'air, nous renseigne sur l'étanchéité de la serre, on le mesure par l'injection du protoxyde d'azote ; la concentration de celui-ci diminue d'autant plus vite que la serre est moins étanche. L'enregistrement de la variation de la composition du mélange permet de calculer le taux de renouvellement de l'air exprimé en volume de la serre par heure.

Pour calculer le taux de renouvellement de l'air, on utilise une expression de la forme [36]:

$$\mathbf{R} = \mathbf{Ra}^\circ + \mathbf{V}f_{(ia)} + \mathbf{g}_{(ib)} \quad (\text{h}^{-1}). \quad (\text{III.72})$$

Où :

$\mathbf{Ra}^\circ$  : taux de renouvellement de l'air sans ouverture et (sous) sans brassage de l'air.

$\mathbf{R}$  : taux de renouvellement de l'air avec ouverture et avec brassage de l'air.

$ia$  : indice de position des ouvrants.

$ib$  : indice de brassage, ventilation.

$\mathbf{V}$  : vitesse du vent, (m/s).

$f$  et  $g$  sont des fonctions à déterminer expérimentalement.

$g_{(ib)} = 0$  pas de ventilation.

On utilise les formules empiriques suivantes [36] :

Pour la serre tunnel de 8 mètres de largeur, on a :

Pour une serre fermée :

$$\mathbf{R} = \mathbf{0,6} + \mathbf{0,55 V} \quad (\text{h}^{-1}). \quad (\text{III.73})$$

Pour une serre ouverte :

$$\mathbf{R} = \mathbf{5,5} + \mathbf{2,1 V} \quad (\text{h}^{-1}). \quad (\text{III.74})$$

### III.2.3.2.7.2.-Echange de l'air sec :

La quantité de chaleur sortante de la serre est  $R \cdot \rho \cdot V_{ai} \cdot C_{ai} T_{ai}$ , alors que celle qui entre est égale à la quantité  $R \rho V_{ai} \cdot C_{ai} T_{ae}$ , par conséquent, la quantité de chaleur échangée sera [39]:

$$Q_{ren} = \rho R V_{aint} C_{P aint} (T_{aext} - T_{aint}). \quad (W). \quad (III.75)$$

Où :

$Q_{ren}$  : flux du au renouvellement de l'air sec(W).

R : taux de renouvellement de l'air intérieur ( $h^{-1}$ ).

$\rho$  : Masse volumique de l'air. ( $Kg/m^3$ ).

$V_{aint}$  : volume de l'air intérieur, ( $m^3$ ).

$C_{p aint}$  : chaleur massique de l'air intérieur, ( $J/kg^{\circ}C$ ).

$T_{aext}$  : température de l'air extérieur, ( $^{\circ}C$ ).

$T_{aint}$  : température de l'air intérieur, ( $^{\circ}C$ ).

### III.2.3.2.7.3.-Echange de l'air humide :

La quantité échangée par chaleur latente entre l'extérieur et l'intérieur est [36]:

$$Q_{ren}^1 = \rho R V_{aint} L_v (W_{aext} - W_{aint}). \quad (III.76)$$

Avec :

$L_v$  : chaleur latente de vaporisation d'eau, ( $J/kg$ )

$W_{aext}$  : humidité absolue de l'air extérieur, ( $kg/kg$ ).

$W_{aint}$  : humidité absolue de l'air intérieur, ( $kg/kg$ ).

### III.2.3.3.-L' échange conductif :

L'humidité joue un rôle important dans le phénomène de conduction thermique à travers les couches superficielles du sol ; à ceci s'ajoute la structure physique du sol ainsi que sa composition ; pour cela la détermination de la conductivité thermique se fait par voie de mesure dans le sol. Le flux de chaleur par conduction s'exprime par :

$$\vec{Q} = - \lambda \overrightarrow{\text{grad}} (T). \quad (III.77)$$

Ou sous forme algébrique :

$$Q^{\text{cond}} = - \lambda S \frac{\partial T}{\partial z} (W). \quad (III.78)$$

$\lambda$  : Conductivité thermique du sol, ( $W/m^{\circ}C$ ).

$\Delta z$  : épaisseur de la couche du sol (m).

### III.2.3.4.-Echanges massiques :

Les transferts de chaleur par rayonnement, convection et conduction sont des transferts de chaleur sensibles.

Dans une serre, d'importantes quantités d'énergie sont véhiculées sous forme de chaleur latente par évaporation et condensation.

#### III.2.3.4.1.-La puissance échangée par évaporation / condensation :

Lorsque l'humidité de l'air dépasse l'humidité saturante à la température  $T_i$  de la paroi, une condensation se produit et par conséquent un échange par chaleur latente aura lieu entre l'air et la paroi.

Le mécanisme mutuel entre un transfert de masse (vapeur d'eau) et un transfert de chaleur (convection) est liés par leur coefficient de transferts  $h^c$ ,  $h^l$ , et cela de part et d'autre de la paroi :

##### a- Du côté intérieur (au niveau de la couverture avec l'air intérieur) :

Formule de Lewis [36].

$$Q_{\text{aint},c}^l = S_{\text{cint}} h_{c,\text{aint}}^l (W_{\text{aint}} - W_{(T_{\text{cint}})}) \quad (\text{III.79})$$

Où :

$h_{c,\text{aint}}^l$  : coefficient d'échange par chaleur latente ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

$S_{\text{cint}}$  : surface intérieure de la couverture ( $\text{m}^2$ ).

$W_{(T_{\text{cint}})}$  : humidité spécifique de saturation à la température de la couverture ( $\text{kg}/\text{kg}$ ).

$W_{\text{aint}}$  : humidité spécifique de l'air intérieur ( $\text{kg}/\text{kg}$ ).

$$h_{c,\text{aint}}^l = \frac{L_v}{r_{\text{aint}}}$$

$$r_{\text{aint}} = \frac{C_p T_{\text{aint}}}{h_{c,\text{aint}}^c}$$

$r_a$  : résistance aérodynamique

$$C_p(T) = \frac{3556,37}{T+273,5}$$

$L_v(T_{\text{ai}})$  chaleur latente de vaporisation à la température de l'air intérieur.

$$L_v(T) = 24946,36 - 2247 T \text{ (J/kg)}. \quad [45]$$

Et  $L_v(T) = 752,5 - 0,5684 (T+273)$ . [47].

On conserve la valeur prise dans les conditions normales : [45]

$$L_v = 590 \text{ kCal/kg.}$$

---


$$L_v = 2466,2 \text{ J/kg.}$$

Il vient donc que :

$$h_{c,aint}^l = \frac{L_v (T_{aint}) h_{c,aint}^c (T_{aint})}{C_p \text{ aint}} . \quad (\text{III.80})$$

**b- Du côté extérieur (au niveau de la couverture avec l'air extérieur):**

La puissance due à la condensation du côté extérieur est donnée par :

$$Q_{c,aext}^l = S_{cext} \cdot h_{c,aext}^l (W_{aext} - W_{aint}). \quad (\text{III.81})$$

$h_{c,aext}^l$  : coefficient d'échange de chaleur latente du côté extérieur ( $\text{W/m}^2$ ).

**III.2.3.4.2.-Evaporation au niveau du sol avec l'air intérieur :**

$$Q_{s,aint}^l = S_{(s,a)int} \cdot h_{(s,a)int}^l (W_{aint} - W_{(Tsint)}). \quad (\text{III.82})$$

Avec :

$$h_{(s,a)int}^l = \frac{L_v (T_{aint}) h_{(s,a)int}^c (T_{aint})}{C_p \text{ aint}} . \quad (\text{III.83})$$

$W_{aint}$ ,  $W_{(Tsint)}$  sont respectivement l'humidité spécifique de l'air à l'intérieur de la serre et de l'air à la température  $T_s$  du sol intérieur.

**L'humidité absolue :**

L'humidité absolue est définie comme la masse de la vapeur d'eau sur la masse de l'air sec.

On trouve dans la référence [36] et [48], l'expression de l'humidité absolue qui est fonction de la pression de saturation et l'humidité relative.

Donc la teneur en eau de l'air est : .

$$W = 0,62197 \left( \frac{P_v}{(P_a - P_v)} \right). \quad (\text{III.84})$$

$W$  : kg de vapeur d'eau par kg d'air sec.

$P_v$  : pression de vapeur d'eau, (Pa).

$P_a$  : pression atmosphérique, (Pa).

Si U l'humidité relative :

$$P_v = U P_{vs}$$

$P_{vs}$  : pression de vapeur saturante à la température T.

U: Humidité relative (%).

---

A partir de (Gormary1985) la pression de saturation  $P_{vs}$  est [36]:

$$P_{vs} = 10 \exp (17,443 - (2795/T) - 3,868 \text{ Log } T). \quad (\text{III.85})$$

$P_{vs}$  en (atm). et  $T$  en (k).

Cette équation valable pour :  $0 < T < 200^\circ\text{C}$ .

Et par la relation : [47]

$$P_{vs} = 10 \exp \left[ 9.18135 - \frac{2289,1}{(T+273)} \right]. \quad (\text{III.86})$$

Il existe la formule empirique [49] pour calculer  $P_{vs}$  lorsque :  $15 \leq T \leq 90^\circ\text{C}$ .

$$P_{vs} = 7236,2 - 431,43 T + 10,76 T^2. \quad (\text{Pa}) \quad (\text{III.87})$$

#### III.2.3.4.3.-L'évaporation et l'évapotranspiration:

Est essentiellement conditionnée par :

- l'énergie captée par le végétal ;
- le pouvoir évaporant de l'air.

L'évapotranspiration (ET) est la quantité d'eau consommée par une culture dans un temps donné qu'elle soit évaporée à la surface du sol ou transpirée par les organes aériens.

Pour une demande climatique donnée, il existe une infinité de valeurs possibles de ET selon notamment l'état de la culture et surtout la disponibilité d'eau dans le sol.

En plein air, le processus de l'évapotranspiration potentielle ETP généralement utilisé par la formule de Villèle [10] :

$$ETP_s = 0,67 \left( \frac{R_{gs}}{L_v} \right) - 0,2. \quad (\text{mm/j}) \quad (\text{III.88})$$

ETPs : évapotranspiration potentielle sous serre (mm / jour).

$R_{gs}$  : rayonnement global sous serre (kJ / m<sup>2</sup>. jour).

$L_v$ : chaleur latente de vaporisation de l'eau (2500 kJ / kg).

#### III.2.3.4.4.-Condensation :

L'air contient toujours de la vapeur d'eau. La quantité maximale qu'il peut contenir dépend de sa température et croît avec elle. Lorsque la nuit tombe, cet air se refroidit au contact des feuilles, des parois des serres... qui se refroidissent plus vite par rayonnement et convection.

Dans les serres, l'évaporation au niveau des cultures associée à la condensation sur les parois correspond donc à un transport de chaleur, c'est -à- dire à une déperdition des serres, qui peut être élevée.

La condensation se forme sur la surface intérieure de la couverture si sa température est au-dessous de la température de points de rosée de l'air.

La quantité de chaleur donnée par la chaleur latente de condensation,  $Q_{\text{cond}}$ , comme suite: [34] :

$$Q^{\text{cond}} = h^{\text{cond}} L_v S_c \rho (W_{\text{ai}} - W_c). \quad (\text{W}). \quad (\text{III.89})$$

$L_v$  : chaleur latente (J/kg)

$\rho$  : masse volumique (kg / m<sup>3</sup>).

$W_c$  : humidité absolue de la couverture (kg/kg).

$W_{\text{ai}}$  : humidité absolue de l'air intérieur (kg/kg).

Le transfert de chaleur par condensation et place de l'enregistrement de la convection par le processus de diffusion; les coefficients de transfert de la chaleur sont racontés par conséquent comme suit:

$$h^{\text{cond}} = h_{\text{ci}} / \rho C_p. \quad (\text{Rapport de Lewis}). \quad (\text{III.90})$$

Donc la chaleur de condensation dans le serre devient : [34] :

$$Q^{\text{cond}} = h_{\text{ci}} L_v S_c (W_{\text{ai}} - W_c) / C_p. \quad (\text{W}). \quad (\text{III.91})$$

$C_p$  : chaleur massique (J/ kg °C).

$\rho$  : masse volumique de l'air intérieur (kg / m<sup>3</sup>).

$h_{\text{ci}}$  : le coefficient de transfert de la chaleur par convection (W/m<sup>2</sup> °C).

---

# *Chapitre IV :*

#### IV.- Les équations de bilan d'énergie :

##### IV.1.- Bilan énergétique dans la serre :

Les échanges thermiques dans la serre se font par rayonnement, par convection et par conduction.

L'échange hydrique se fait par évapotranspiration de la culture, par évaporation de la quantité d'eau dans le sol apporté par l'irrigation, ou par renouvellement d'air dû à l'aération de la serre et par évaporation/ condensation au niveau de la paroi plastique.

Le bilan énergétique de chaque composant de la serre est établi (couverture, air intérieur, air extérieur, végétation, sol intérieur, sol extérieur).

Pour chaque composant, en évaluant ses gains, ses pertes et nous écrivons l'égalité suivante :

$$\text{Gains} - \text{pertes} + \text{variation de stock} = 0.$$

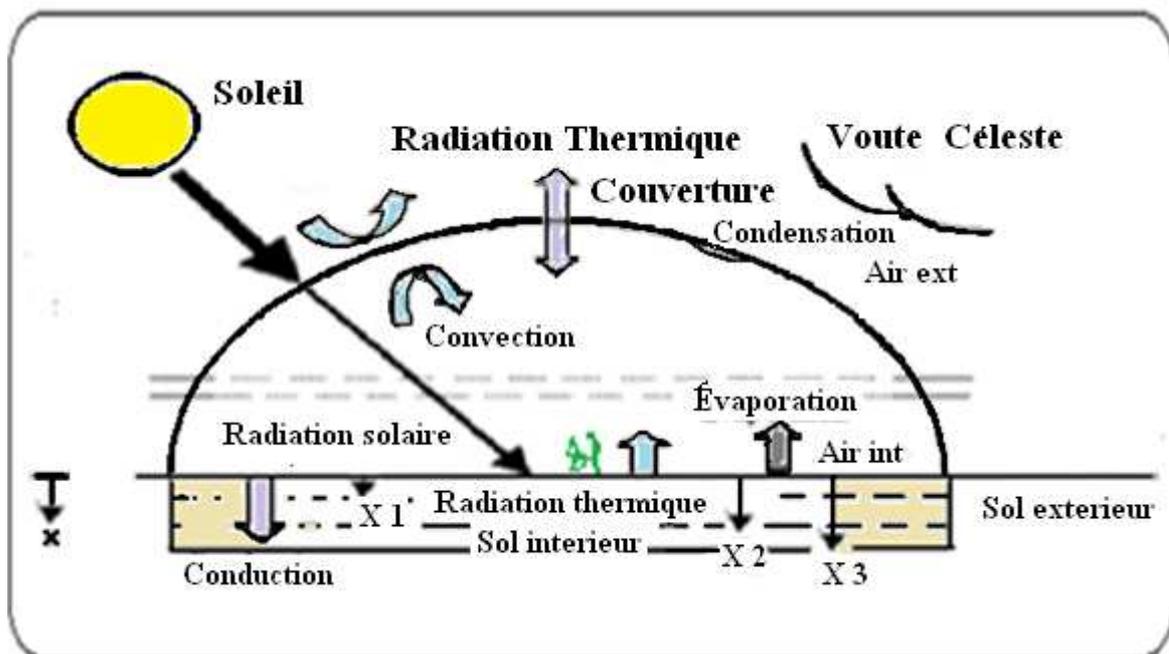


Figure (IV.1) : Schéma des flux échangés.

La figure (1) schématise l'ensemble des flux thermiques échangés entre la serre et son environnement. A partir de cette dernière, on peut écrire les bilans des flux thermiques pour chacune des composantes.

#### IV.1.1.-Bilan thermique de l'air extérieur :

$$\rho_{ae} V_{ae} C_{Pae} \frac{dT_{ae}}{dt} = Q^c_{(a,c)ext} + Q^c_{(s,a)ext} + Q^r_{(a,c)ext} \cdot \quad (IV.1)$$

$\rho_{ae} V_{ae} C_{Pae} \frac{dT_{ae}}{dt}$  : ce terme représente le stockage d'énergie par l'air extérieur dans l'intervalle de temps dt.

$Q^c_{(a,c)ext}$  : la puissance convective entre la couverture et l'air extérieur (W).

$Q^c_{(s,a)ext}$  : la puissance convective entre le sol extérieur et l'air extérieur (W).

$Q^r_{(a,c)ext}$  : la puissance radiative entre la couverture et l'air extérieur (W).

#### IV.1.2.-Bilan d'énergie de la couverture plastique :

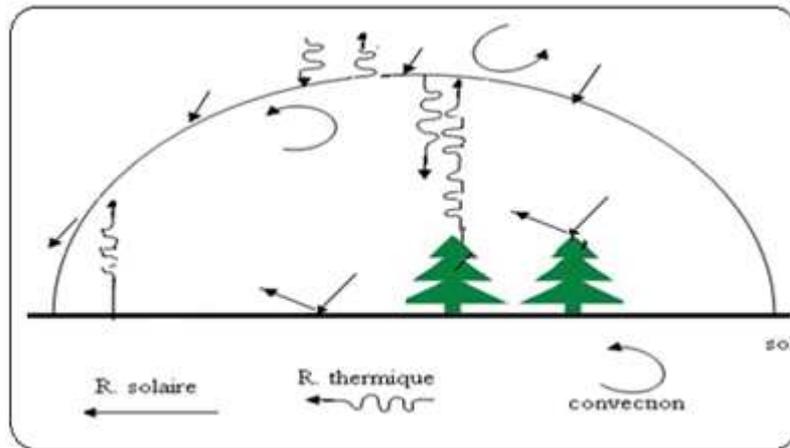


Figure (IV.2) : Schéma des flux échangés de la couverture.

$$\rho_c V_c C_{Pc} \frac{dT_c}{dt} = Q_{sc} + Q^c_{(a,c)int} + Q^c_{(a,c)ext} + Q^l_{(a,c)int} + Q^r_{(s,c)int} + Q^r_{(s,c)ext} + Q^r_{(cl,c)ext} + Q^r_{(v,c)int} \cdot \quad (IV.2)$$

$Q_{sc}$  : la puissance de rayonnement solaire absorbée par la couverture (W).

$Q^c_{(a,c)int}$  : la puissance convective entre l'air intérieur et la couverture (W).

$Q^c_{(a,c)ext}$  : la puissance convective entre l'air extérieur et la couverture (W).

$Q^l_{(a,c)int}$  : évaporation / condensation au niveau de la couverture (W).

$Q^r_{(s,c)int}$  : la puissance radiative entre le sol intérieur et la couverture (W).

$Q^r_{(s,c)ext}$  : la puissance radiative entre le sol extérieur et la couverture (W).

$Q^r_{(cl,c)ext}$  : la puissance radiative entre le ciel et la couverture (W).

$Q^r_{(v,c)int}$  : la puissance radiative entre la végétation et la couverture (W).

### IV.1.3.-Bilan thermo-hydrique de l'air intérieur :

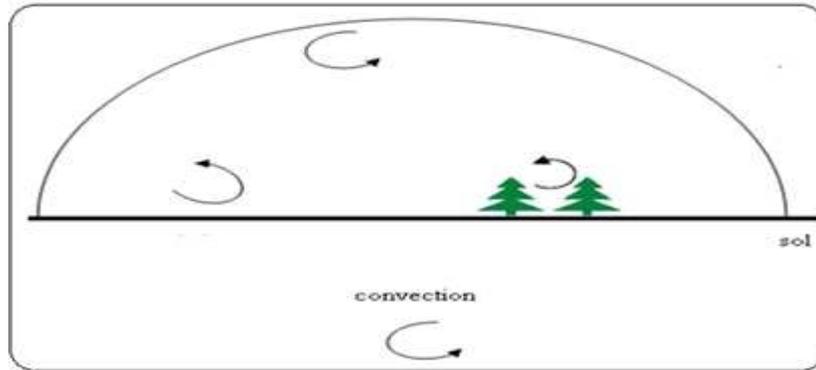


Figure (IV.3) : Schéma des flux échangés de l'air intérieur.

#### IV.1.3.1.-Bilan de chaleur sensible :

$$\rho_{ai} V_{ai} C_{Pai} \frac{dT}{dt}^{ai} = Q^c_{(a,c)int} + Q^c_{(a,v)int} + Q^c_{(a,s)int} + Q_{Ren} \cdot \quad (IV.3)$$

$Q^c_{(a,c)int}$  : la puissance convective entre l'air intérieur et la couverture (W).

$Q^c_{(a,v)int}$  : la puissance convective entre l'air intérieur et la végétation (W).

$Q^c_{(a,s)int}$  : la puissance convective entre l'air intérieur et le sol intérieur (W).

$Q_{Ren}$  : la puissance de renouvellement de l'air sec (W).

#### IV.1.3.2.-Bilan de chaleur latente :

$$\rho_{ai} V_{ai} L_v \frac{dW}{dt}^{ai} = Q^1_{(a,c)int} + Q^1_{(a,s)int} + Q^1_{Ren} + Q_{ETP} \cdot \quad (IV.4)$$

$L_v$  : chaleur latente de vaporisation (J/kg).

$Q^1_{(a,c)int}$  : la puissance de l'évaporation au niveau de la couverture (W).

$Q^1_{(a,s)int}$  : la puissance de l'évaporation au niveau du sol intérieur (W).

$Q^1_{Ren}$  : la puissance de renouvellement de l'air humide (W).

$Q_{ETP}$  : la puissance de l'évapotranspiration des plantes (W).

#### IV.1.4.-Bilan d'énergie de la Végétation:

$$\rho_v V_v C_{Pv} \frac{dT}{dt}^v = Q_{sv} + Q^c_{(a,v)int} + Q^f_{(v,c)int} + Q^f_{(v,s)int} + Q_{ETP} \cdot \quad (IV.5)$$

$Q_{sv}$  : la puissance de rayonnement solaire absorbée par végétation (W).

$Q^c_{(a,v)int}$  : la puissance convective entre l'air intérieur et la végétation (W).

$Q^f_{(v,c)int}$  : la puissance radiative entre la végétation et la couverture (W).

$Q^f_{(v,s)int}$  : la puissance radiative entre la végétation et le sol intérieur (W).

$Q_{ETP}$  : la puissance de l'évapotranspiration des plantes (W).

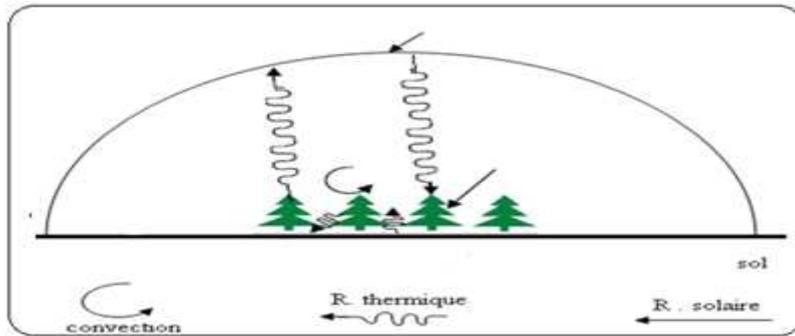


Figure (IV.4) : Schéma des flux échangés de la végétation.

#### IV.1.5.-Bilan d'énergie du sol intérieur:

$$\rho_{si} V_{si} C_{Psi} \frac{dT_{si}}{dt} = Q_{ssi} + Q^c_{(a,s)int} + Q^r_{(s,c)int} + Q^r_{(s,v)int} + Q^l_{(s,a)int} + Q^{cond}_{(si,se)}. \quad (IV.6)$$

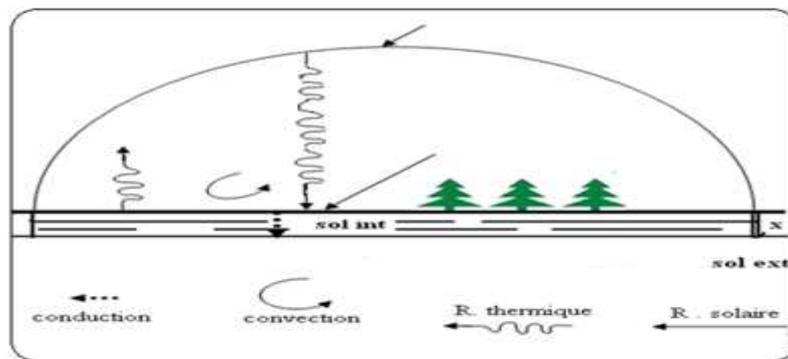


Figure (IV.5) : Schéma des flux échangés du sol intérieure.

$Q_{ssi}$  : la puissance de rayonnement solaire absorbée par le sol intérieur (W).

$Q^c_{(a,s)int}$  : la puissance convective entre l'air intérieur et le sol intérieur (W).

$Q^r_{(s,c)int}$  : la puissance radiative entre le sol intérieur et la couverture (W).

$Q^r_{(s,v)int}$  : la puissance radiative entre le sol intérieur et la végétation (W).

$Q^l_{(s,a)int}$  : la puissance de l'évaporation au niveau du sol intérieur (W).

$Q^{cond}_{(si,se)}$  : la puissance conductive entre le sol intérieur et le sol extérieur (W).

#### IV.1.6.-Bilan d'énergie du sol extérieur:

$$\rho_{se} V_{se} C_{Pse} \frac{dT_{se}}{dt} = Q_{sse} + Q^c_{(a,s)ext} + Q^r_{(s,c)ext} + Q^{cond}_{(si,se)}. \quad (IV.7)$$

$Q_{sse}$  : la puissance de rayonnement solaire absorbée par le sol extérieur (W).

$Q^c_{(a,s)ext}$  : la puissance convective entre l'air extérieur et le sol extérieur (W).

$Q^r_{(s,c)ext}$  : la puissance radiative entre le sol extérieur et la couverture (W).

$Q^{cond}_{(si,se)}$  : la puissance conductive entre le sol intérieur et le sol extérieur (W).

---

# *Chapitre V :*

## V. - Etude expérimentale – Aspect climatologique :

### V.1.-Dispositif expérimental :

#### V.1.1.- La serre :



Figure (V) : La serre expérimentale.

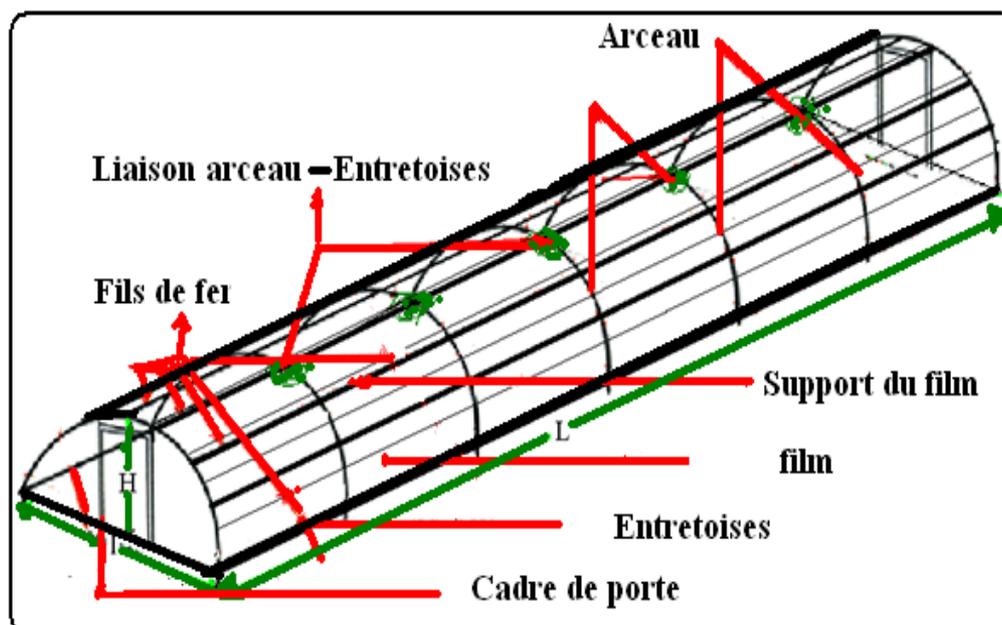


Figure (V) : La serre expérimentale.

L'étude expérimentale a été réalisée sur une serre tunnel de dimensions suivantes :

- La hauteur :  $H = 2,8 \text{ m}$
- La largeur :  $l = 8 \text{ m}$
- La longueur :  $L = 12 \text{ m}$
- La surface de la serre (sol intérieur) :  $S = L \times l = 96 \text{ m}^2$
- La surface des portes :  $(2,5 \times 2,5) \times 2 = 12,5 \text{ m}^2$
- La surface latérale des cotées :  $(19 \times 2) = 38 \text{ m}^2$
- La surface latérale de la couverture :  $12 \times 10 = 120 \text{ m}^2$

- 
- La surface totale de la couverture :  $120 + 12,5 + 38 = 170,5 \text{ m}^2$
  - Le rapport de la surface du sol sur la couverture est :  $S_{\text{sint}} / S_c = 0,8$
  - Le volume de la serre :  $V = L \times l \times H \times 0,8 \approx 215 \text{ m}^3$

La serre a pour charpente une armature métallique constituée de sept (7) arceaux distants de deux mètres l'un de l'autre.

Implantation et orientation: Département d'Agronomie, Ouargla :  
(Latitude 31.57' N; longitude 5.24' E ; altitude 157m), orientation Nord-Sud.

### **V.1.2.- La couverture :**

La pose a été effectuée le début Juin 2008 selon les normes classiques en prenant soin d'assurer notamment une meilleure étanchéité de la couverture. Des précautions ont été également prises pour éviter un étirement du film pouvant modifier certaines de ses propriétés mécaniques ou optiques et lui assurer une bonne fixation. Ce dernier point est particulièrement important, une mauvaise fixation étant la cause la plus fréquente des déchirures.

La déchirure des films plastiques en général constitue l'une de leurs principales faiblesses. En effet, après qu'une entaille, souvent accidentelle, ait été faite, la déchirure se propage lentement sous l'action de forces très faibles.

L'emboîtement des panneaux de film sur une profondeur de 40 cm environ a été réalisé en tenant compte de la direction des vents dominants afin de prévenir l'effet (drapeau) qui consiste en des ébranlements alternatifs rapides pouvant provoquer des ruptures.

### **V.1.3.- Les paramètres mesurés :**

#### **V.1.3.1.- Mesures à l'intérieur de la serre :**

- Température sèche de l'air.
- Température dans le sol à trois niveaux (20, 60 et 100 cm).
- Température minimale et maximale au sol.
- Température minimale et maximale de l'air.
- Humidité relative de l'air.
- Rayonnement global.
- Rayonnement diffus.
- Rayonnement net.

---

### **V.1.3.2.- Mesures à l'extérieur de la serre :**

- Température sèche de l'air.
- Température dans le sol à trois niveaux (20, 60 et 100 cm).
- Température minimale et maximale au sol.
- Température minimale et maximale de l'air.
- Humidité relative de l'air.
- Vitesse de vent.
- Rayonnement global.
- Rayonnement diffus.
- Rayonnement net.

### **V .1.4.- Appareils utilisés :**

#### **a : Rayonnement global sur le plan horizontal:**

✓ Pyranomètre KIPP-ZONEN à pile de MOLL (Intégrateur permet de connaître l'énergie heure par heure).

#### **b : Températures sèches :**

✓ Thermocouples: Les températures de paroi ont été mesurées au moyen de quatre thermocouples à cuivre-constantan très fins, individuellement calibrés, qui ont été placés autour de la paroi à l'intérieur ( $T_{p2}$ ,  $T_{p1}$ ,  $T_{toit}$   $T_{air}$ ) du film et trois thermocouples à trois profondeurs de (20 cm, 60 cm, 100 cm) du sol.

- ✓ Thermographe (enregistrement de la température).
- ✓ Thermomètre.
- ✓ Thermomètre à maximum.
- ✓ Thermomètre à minimum.

#### **c : Humidités relatives :**

- ✓ Hydrographe (enregistrement de l'humidité).
- ✓ Hygromètre.

---

**d : Rayonnement diffus:**

✓ Un pyranomètre, mais avec un bande " pare-soleil", écran occultant le disque solaire.

**V.2.- Aspect climatique :**

Quels que soient le type et les propriétés des matériaux de la couverture utilisés dans les abris serres, le microclimat sous serre reste étroitement lié aux caractéristiques du climat extérieur [50], d'où l'intérêt que revêt une étude climatologique du site d'implantation des serres ainsi que les conditions météorologiques moyennes ayant dominé tout au long de la phase expérimentale.

**V.2.1.- Les températures :**

L'étude des températures tient compte des valeurs extrêmes, notamment des minima absolues qui permettent de déterminer la période défavorable au développement des cultures et donc susceptibles de servir de critère d'efficacité de la serre et par suite de critère de choix dans les matériaux de couverture.

**V.2.1.1.- Les températures maximales :**

Les températures maximales présentent, à priori moins d'intérêt que les températures minimales, mais peuvent en revanche être d'un grand apport dans la caractérisation du vieillissement thermique des matériaux de couverture.

**Tableau (V. 1) : Les températures extérieures maximales mensuelles  
(absolues et moyennes) (2008 – 2009).**

T extérieure	Juin	Juil.	Août	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai
T (°C) maximale absolue	48	49	49	45	34	27,5	23	16	15	24	31	32
T (°C) maximale moyenne	38,7	44,5	43,5	38,3	29,7	22,1	18,6	11	10,9	16,6	21	23,3

**Tableau (V. 2) : Les températures intérieures maximales mensuelles  
(absolues et moyennes) (2008 – 2009).**

	<b>Serre fermée.</b>	<b>serre ouverte</b>					<b>serre fermée</b>					
T intérieure	Juin	Juil.	Août	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai
T (°C) maximale absolue	61	56	54	50	40	33	31	28	30	55	55	59
T (°C) maximale moyenne	50,6	50,8	49,4	44,2	36	28,1	24,7	21,4	25,3	42,5	47	49,7

**V.2.1.2.- Les températures minimales :**

Durant les mois les plus chauds, la température minimale absolue, en été sous serre, oscille entre (19°C et 25°C).

**Tableau (V. 3) : Les températures extérieures minimales mensuelles  
(absolues et moyennes) (2008 – 2009).**

T extérieure	Juin	Juil.	Août	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai
T (°C) minimale absolue	19	25	24	16	9	5	2	3	3,8	5,4	9,6	11,4
T (°C) minimale moyenne	26,63	29,6	28	22,76	19,1	9,85	5,6	6,2	7,22	10,8	16	18,5

**Tableau (V. 4) : Les températures intérieures minimales mensuelles  
(absolues et moyennes) (2008 – 2009).**

	<b>Serre fermée</b>	<b>serre ouverte</b>					<b>serre fermée</b>					
T intérieure	Juin	Juil.	Août	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai
T (°C) minimale absolue	22	26	25	19	11	7	4	4	3	3	10	12
T (°C) minimale moyenne	28	30,7	29,6	25,3	19	11	8,4	8,8	6,9	8,2	15	18,7

### V.2.1.3.- Les températures moyennes :

La température de l'environnement influence directement les végétaux en agissant sur leur développement. Pour se développer, les cultures ont besoin d'une certaine quantité de chaleur, variable selon l'espèce, pour atteindre les stades phénologiques successifs [51].

**Tableau (V. 5) : Les températures moyennes mensuelles  
(intérieure et extérieure) (2008).**

Température	Juin	Juil.	Août	Sep	Oct.	Nov.
T intérieure moyenne (°C)	38,07	40,49	38,71	34,99	27,44	19,04
T extérieure moyenne (°C)	32,19	37,49	36,01	31,51	24,17	15,52

### V.2.2.-L'humidité :

L'humidité engendrée par le confinement devient alors un des principaux paramètres du bilan d'énergie, cependant elle conduira à une nuisance aussi bien pour les cultures que pour les matériaux utilisés.

L'interdépendance des paramètres climatiques constitue une difficulté supplémentaire à leur maîtrise, de sorte qu'il est difficile de contrôler l'évolution de l'un sans perturber celle de l'autre.

**Tableau (V. 6) : Humidités extérieure maximales mensuelles  
(absolues et moyennes) (2008/2009).**

U extérieure	Juin	Juil.	Août	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai
U (%) maximale absolue	75	62	68	95	96	96	97	96	80	78	76	72
U (%) maximales moyennes	35,4	38,1	42,8	52,1	77,7	85,1	89,4	83,2	69,7	64,1	61	42,3

**Tableau (V. 7) : Humidités extérieure minimales mensuelles  
(absolues et moyennes) (2008/2009).**

U extérieure	Juin	Juil.	Août	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars.	Avril	Mai
U (%) minimale absolue	21	12	14	11	29	25	27	31	22	16	11	9
U (%) minimale moyenne	28,6	19,4	20,4	27,1	40,8	39,2	45,8	43,4	31,9	30,5	27	24,2

**Tableau (V. 8) : Humidités intérieure maximales mensuelles  
(absolues et moyennes) (2008/2009).**

	serre fermée	serre ouverte					serre fermée					
U intérieure	Juin	Juil.	Août	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai
U (%) maximale absolue	---	96	87	97	97	---	99	99	89	88	86	80
U (%) maximale Moyenne	---	71,4	64,1	82,7	82,6	---	93,6	93,9	78,5	78,5	75	51,8

**Tableau (V. 9) : Humidités intérieure minimales mensuelles  
(absolues et moyennes) (2008/2009).**

	Serre fermée	serre ouverte					serre fermée					
U intérieure	Juin	Juil.	Août	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai
U (%) minimale absolue	---	28	27	47	37	---	29	63	44	17	17	12
U (%) minimale Moyenne	---	38,9	35,8	56,9	51,6	---	74	81,6	57,9	25,5	27	18,5

---

### **V.3.-Résultats et interprétation :**

#### **V.3.1.-Microclimat et températures :**

La modélisation du microclimat de la serre peut être envisagée de différentes manières selon les objectifs recherchés [52].

Dans notre cas, la caractérisation du microclimat généré à l'intérieur de la serre.

L'analyse du microclimat inclura les aspects qualitatifs comme la répartition spatiale de la température et de l'humidité au sein de la serre, leur comportement diurne et nocturne et qualitatif tels que le cumul de température ou le gain d'énergie.

Le bilan thermique de la serre et par suite la quantité d'énergie reçue peuvent être évalués à l'aide du cumul des températures moyennes quotidiennes, cette grandeur peut également être utilisée pour déduire, toutes conditions égales par ailleurs, la précocité induite par l'usage du polyéthylène.

##### **V.3.1.1.-Température :**

L'action sur la température qui est à l'origine de l'invention des abris (dont le premier objectif a été la protection contre le gel) [16].

##### **V.3.1.1.1.-Evolution des températures maximales :**

D'une moyenne quotidienne ou saisonnière, les températures maximales sont, en général, plus élevées en saison sèche qu'en saison humide.

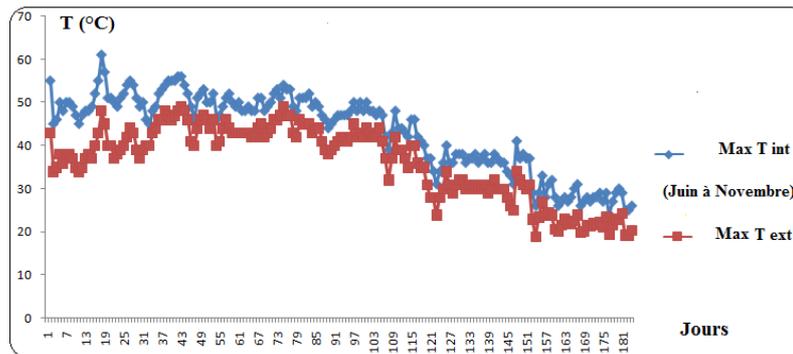
La moyenne des températures maximales de l'air mesurées, correspondants aux climats étudiés, durant la période allant du (juin au novembre 2008), était de (49,17°C et 42,01°C) respectivement aux traitements intérieure et extérieure.

En comparant la serre tunnel avec l'extérieur. Où la serre est fermée en (juin) et ouverte de (juillet à novembre), (figure V.1).

La température maximale de l'air affiche les valeurs respectives de (61°C) en juin pour serre fermée et (56°C) en juillet pour serre ouverte à l'intérieure et (49 °C) en juillet et août pour l'extérieure.

Cette évolution de la température maximale est le résultat de l'automatisation de l'aération.

Le tunnel est donc le plus exposé à l'élévation de la température maximale que l'extérieure.



**Figure (V.1) : Evolution des températures maximales sous serre tunnel et à l'extérieur pendant les six mois de (juin à novembre 2008).**

### V.3.1.1.2.-Evolution des températures minimales :

La distribution saisonnière des températures minimales est similaire à celle des maxima moyens mensuels, avec des allures très proches.

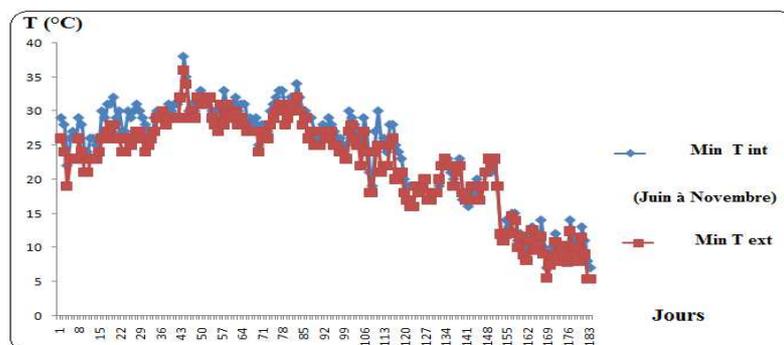
La figure (V.2) trace l'évolution de la température minimale mesurée au cours du six mois de (juin à novembre 2008) sous serre (intérieure), en comparaison avec l'extérieure.

Les minima les plus bas s'observent, en période de transition entre la saison sèche et la saison pluvieuse, par contre les valeurs les plus élevées sont observées durant la saison sèche.

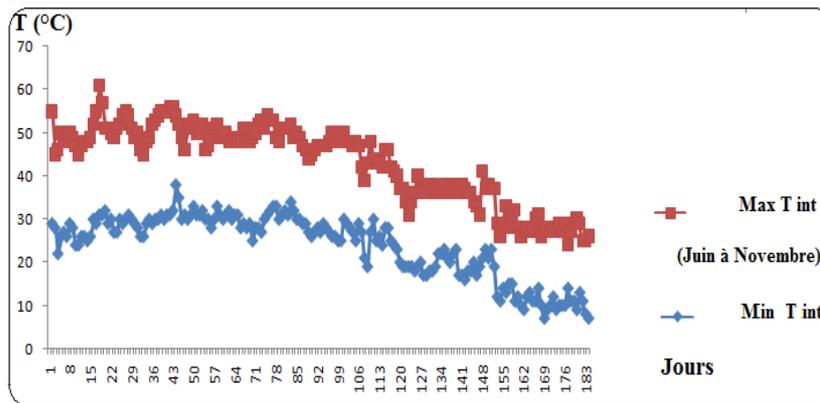
La moyenne des températures minimales de l'air, mesurées au cours du six mois est de (18,33°C et 16,73°C), respectivement sous serre tunnel et l'extérieur.

Quand aux valeurs minimales absolues au cours du ces mois est de (7°C) à l'intérieure et de (5,4°C) en novembre à l'extérieure.

Les minima les plus élevés sont atteints en juillet et août respectivement à (26°C et 25°C) à l'intérieure et (25°C et 24°C) à l'extérieure.



**Figure (V.2) : Evolution des températures minimales sous serre et à l'extérieur pendant les six mois de (juin à novembre 2008).**



**Figure (V.3) : Evolution des températures maximales et minimales sous serre tunnel pendant les six mois de (juin à novembre 2008).**

La différence entre les températures maximales et celles minimales est appelée amplitude thermique.

Cette amplitude est fonction des extrêmes. Au fur et à mesure que ces derniers s'éloignent de la moyenne, comme nous l'avons dit plus haut, l'amplitude augmente, elle baisse dans le cas inverse. En effet, dans la figure (V .3) on constate un creux qui s'étend sur six mois: juin, juillet, août, septembre, octobre, novembre avec des amplitudes (maximale-minimale) mensuelle respectivement égales à 39°C pour serre fermée et 30°C ; 29°C ; 31°C ; 30°C ; 26°C pour serre ouverte.

### **V.3.2.-Microclimat et humidité:**

L'humidité est un paramètre climatique important qui, combiné à certaines valeurs de température, favorise de manière directe la croissance bactérienne et fongique dans la serre. Son contrôle est relativement difficile.

#### **V.3.2.1.-Humidités de l'air:**

Le problème causé par l'humidité relative est la condensation sur la face interne de la couverture, phénomène qui va influencer la transmission du rayonnement photo synthétiquement actif (PAR) et favoriser l'effet de loupe, ce qui peut causer de grands dommages aux cultures [53], et favoriser la dégradation du polymère servant de couverture en accélérant la migration des petites molécules.

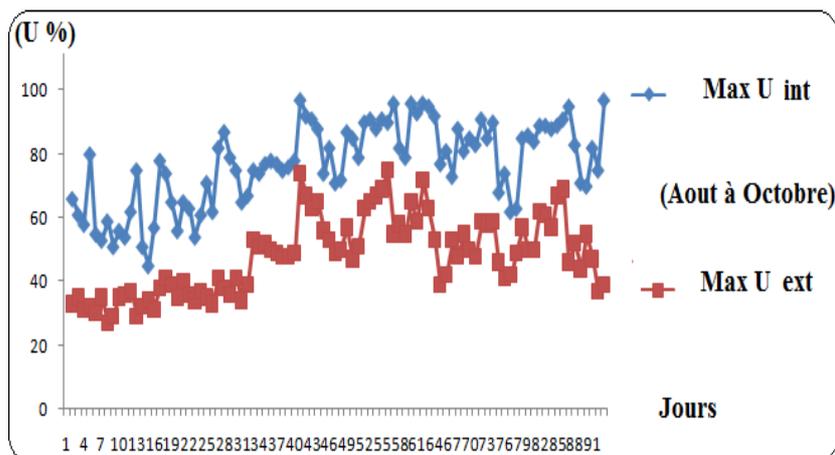
##### **V.3.2.1.1.-Evolution de l'humidité maximale :**

La figure (V.4) montre la tendance d'évolution de l'humidité relative maximale mesurée sous serre tunnel et à l'extérieur. Les mesures durant les trois mois de (août à octobre) (serre ouverte).

Cette donnée présente une évolution compatible avec l'absence de culture par le jeu de l'automatisme de la fonction séchage, qui permet l'ouverture de la serre pour évacuer la vapeur d'eau accumulée pendant la nuit.

Notons que tunnel affiche un taux d'humidité relative maximale (97%) proche de la saturation de l'essai en septembre et octobre.

D'un autre côté les conditions de l'extérieure montrent une certaine fluctuation de ce taux, avec une augmentation très brutale observée (96°C) en mois d'octobre.



**Figure (V.4) : Evolution de l'humidité relative maximale sous serre tunnel et à l'extérieur pendant les trois mois de (août à octobre 2008).**

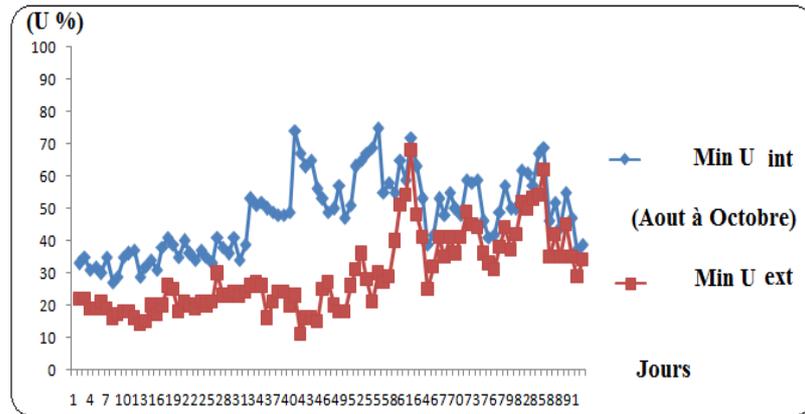
#### V.3.2.1.2.-Evolution de l'humidité minimale :

La figure (V.5) présente le suivi de l'évolution de l'humidité relative minimale de l'air à l'extérieur et sous serre tunnel sur une période de trois mois d'une serre ouverte de (août à octobre).

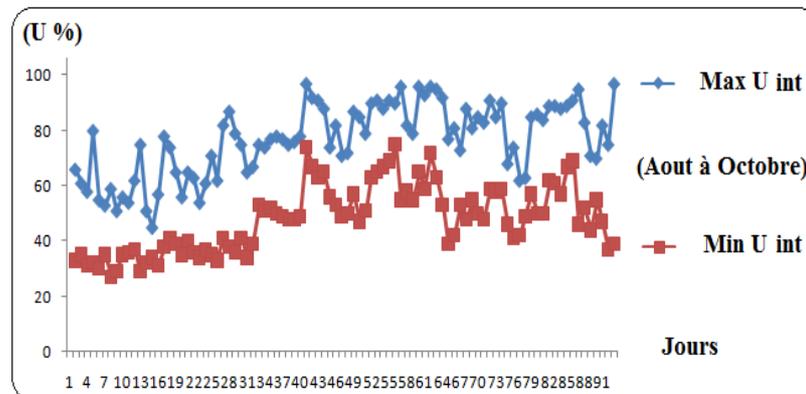
Même si l'influence du climat extérieur est limitée sous serre, l'hygrométrie est plutôt faible en été. L'humidité relative minimale absolue peut descendre jusqu'à (27%) en mai à l'intérieure, notamment les jours les plus chaudes.

D'un autre côté les conditions de l'extérieure montrent une certaine fluctuation de ce taux, avec une chute très brutale observée (11%) en mi-septembre et (14°C) en août et aux vents d'Est, chauds et secs.

En conditions de air extérieur, l'humidité relative minimale très fluctuante par rapport aux conditions de serre. Ainsi, l'hygrométrie mesurée sous serre est faible en début de culture.



**Figure (V.5) : Evolution de l'humidité relative minimale sous serre tunnel et à l'extérieur pendant les trois mois de (août à octobre 2008).**



**Figure(V.6) : Evolution de l'humidité relative maximale et minimale sous serre tunnel pendant les trois mois de (août à octobre 2008).**

### V.3.3.-Exemple de journées:

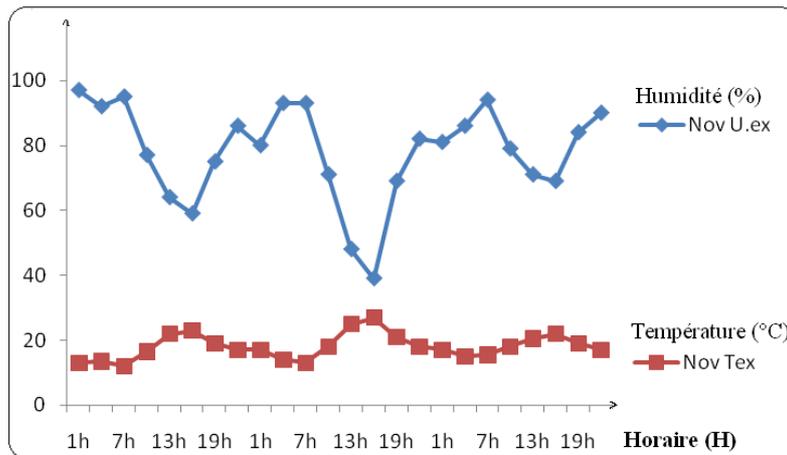
Pour illustrer le rôle de l'influence des saisons dans le maintien des paramètres climatiques à des valeurs données à l'intérieur de la serre, trois journées ont été choisies successivement en période froide et en période chaude et une journée fraîche et chaude.

#### V.3.3.1.-Cas d'une période froide:

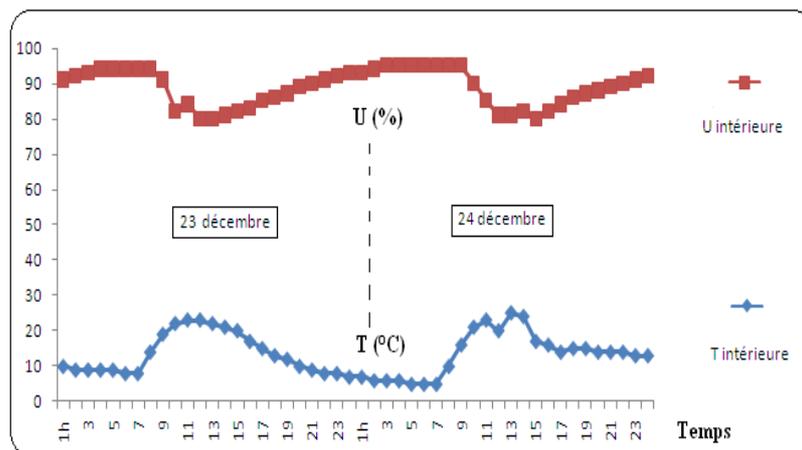
Les graphiques de la figure (V.7) montrent l'effet des ouvrants (les portes) sur l'évolution de la température et de l'humidité relative de l'air, au cours de deux journées (1et 2 novembre 2008), dans la serre.

Il apparaît qu'après le lever du soleil, l'augmentation de la température s'accompagne d'une chute de l'hygrométrie. Cette tendance est accentuée par l'ouverture des portes de la serre pour assurer la fonction de séchage.

Au milieu de les deux journées, la température et l'humidité sous serre autour des valeurs maximales (33°C et 97%).



**Figure (V.7a) : Evolution de la température et de l'humidité suite aux mouvements d'ouverture de la serre durant les deux journées du (1er et le 2 novembre 2008).**

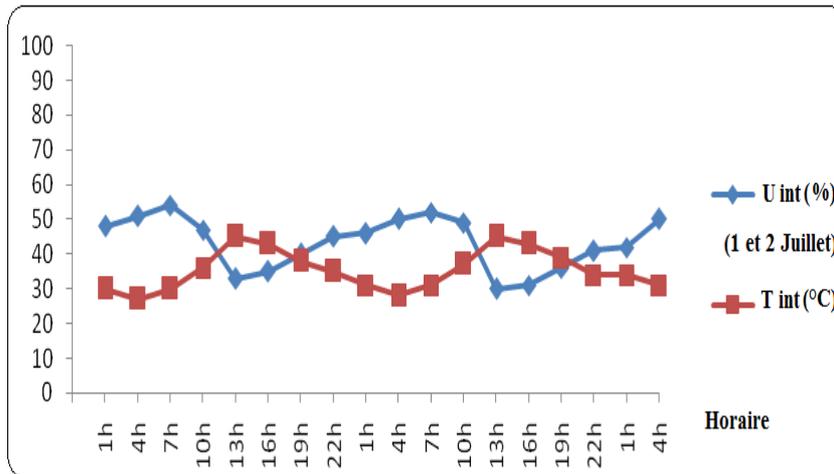


**Figure (V.7b) : Evolution de la température et de l'humidité suite aux mouvements de fermeture de la serre durant les deux journées du (23 et le 24 décembre 2008).**

### V.3.3.2.-Cas d'une période chaude :

L'exemple de les deux journées du (1 et 2 juillet 2008) à été choisi à cause d'une vague de chaleur exceptionnelle qui servi pendant ces journées du fait d'un vent d'Est chaud et sec (figure (V.8)).

Pour maintenir la température à une valeur proche de la maximale, le mouvement de la serre ouverte présente une tendance en dents de la cime pour illustrer l'effort déployé par la température. D'un autre côté, pour prévenir toute chute de l'hygrométrie.



**Figure (V.8) : Evolution de la température et de l'humidité relative suite à l'action de l'aération (1 et 2 juillet 2008).**

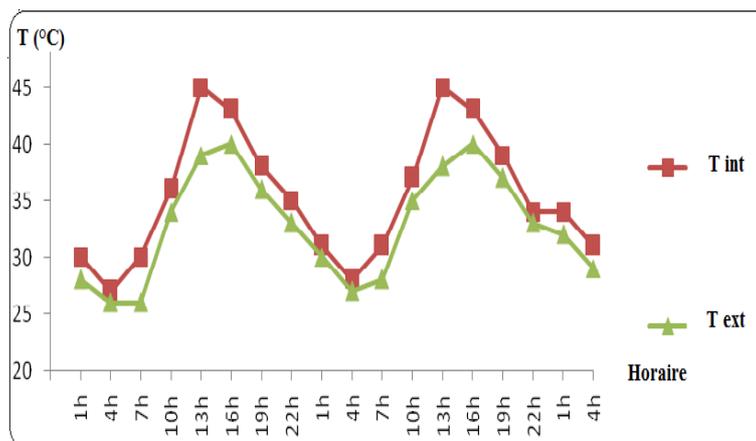
### V.3.3.3.-Cas d'évolution de la température à l'extérieure et l'intérieure d'une serre tunnel :

La figure (V.9) présente l'évolution de la température de l'air mesurée à l'intérieur de la serre et celle de l'extérieur.

A partir de ce tracé, nous constatons que les températures mesurées ont presque la même allure que l'extérieur.

L'échantillon des températures intérieures et extérieures illustre parfaitement l'évolution thermique des serres.

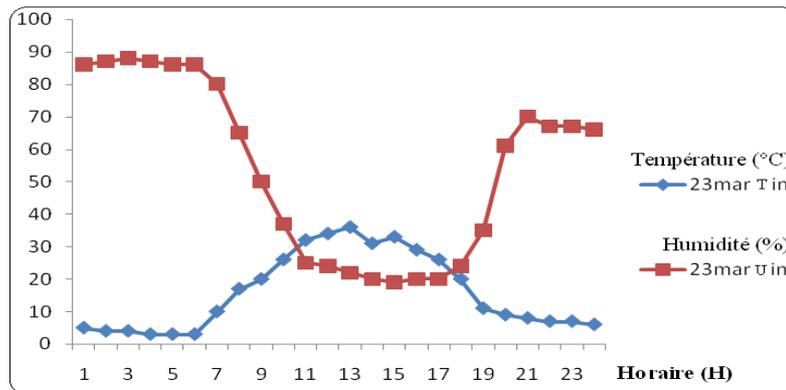
On constate que les températures externes de la serre sont plus basses que dans l'interne.



**Figure (V.9): Evolution de la température de l'air à l'intérieur et à l'extérieur de la serre (1 et 2 novembre 2008).**

#### V.3.3.4.-Cas d'une journée moyenne (mélange chaude et fraîche) :

Le graphe ci-dessous (figure(V.10)) décrit l'évolution horaire et simultanée de la température et de l'humidité de l'air sous serre, par un jour du (23 Mars 2009).



**Figure (V. 10) : Evolution de la température et de l'humidité de l'air sous serre dans la journée de (23 mars 2009).**

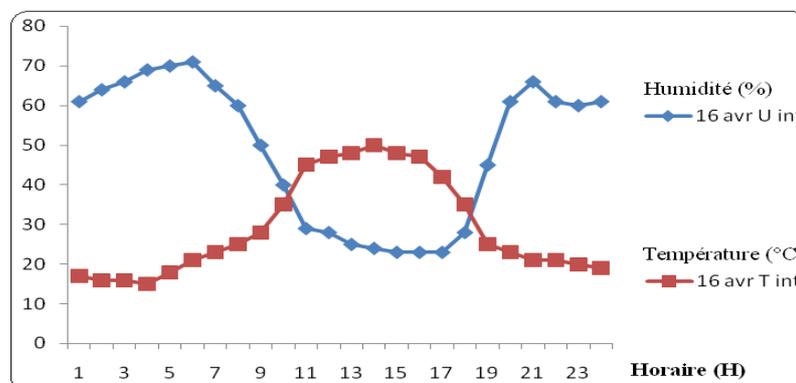
Pour apprécier la capacité du polyéthylène à stocker de l'énergie, on a dissocié les régimes thermiques des phases diurne et nocturne.

#### V.3.3.5.-Températures en phase diurne :

En printemps (Avril 2009) le climat a été relativement chaud :

La deuxième semaine d'Avril 2009 a été relativement froide et a vu d'événement climatique important : (le vent de sable).

La figure(V.11) ci-dessous décrit l'évolution horaire de la température et de l'humidité de l'air dans la journée du (16 Avril 2009).

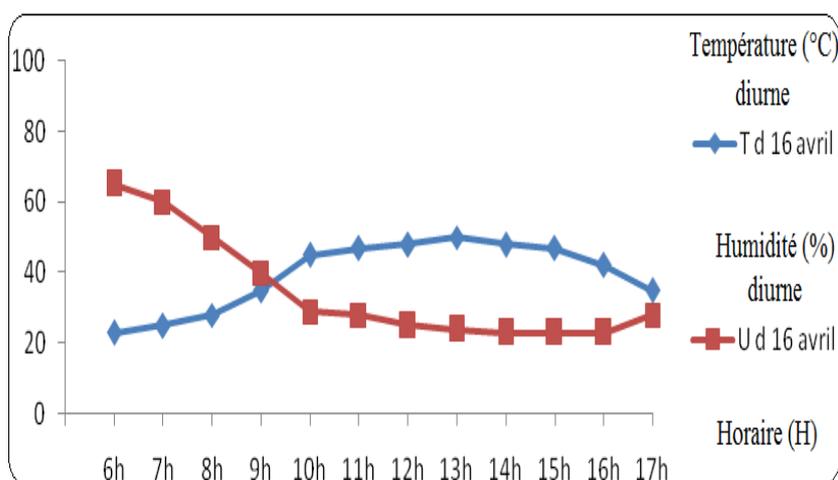


**Figure (V. 11) : Evolution de la température et de l'humidité de l'air sous serre dans la journée du printemps (16 Avril 2009).**

En phase diurne (6 h GMT à 17 h GMT) du (16 avril 2009), la température de l'air sous serre a évolué de (23 °C à 50 °C) et la température maximale de l'air à l'extérieur était de (38 °C).

L'humidité de l'air, quant à elle, est passée de (23% à 65%): le réchauffement de l'air de la serre en cours de journée augmente son déficit de saturation et par suite son assèchement progressif.

Le graphe ci-dessous (figure (V.12)) décrit l'évolution horaire et simultanée de la température et de l'humidité de l'air sous serre en phase diurne, par un jour du (16 avril 2009).



**Figure (V. 12): Evolution de la température et de l'humidité de l'air sous serre en phase diurne dans la journée du (16 avril 2009).**

#### **V.3.3.6.-Températures en phase nocturne :**

Les températures horaires en phase nocturne sont destinées naturellement à caractériser le comportement de la serre en absence de rayonnement solaire direct.

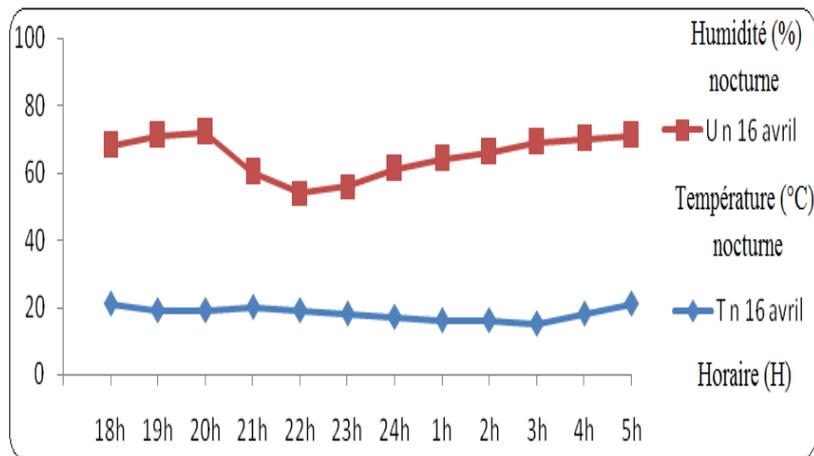
Durant le mois d'avril à l'intérieur de la serre:

Dans le cas le plus défavorable considéré précédemment (16 avril 2009), la température moyenne nocturne est de (18,25 °C).

La valeur minimale observée est de (15 °C), et maximale voisine de (22 °C).

Pratiquement toutes les valeurs de température horaires durant la nuit du (16 avril 2009) ont été inférieures à (22 °C).

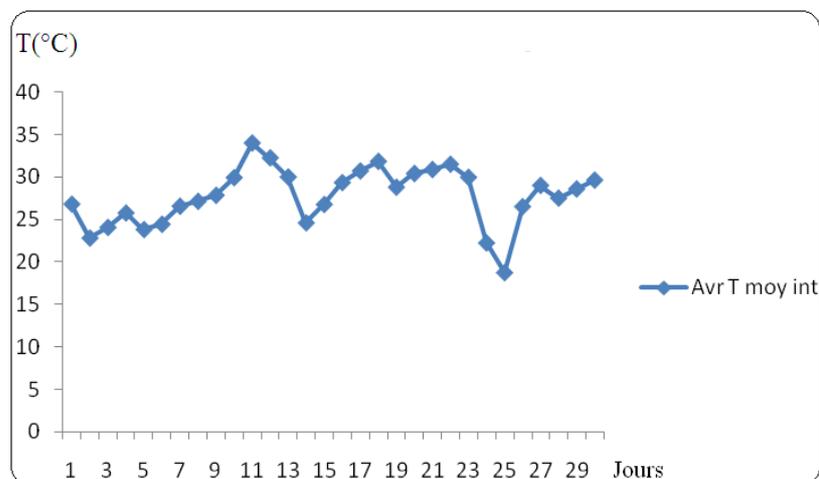
L'humidité de l'air est passée de (72% à 54%).



**Figure (V. 13): Evolution de la température et de l'humidité de l'air sous serre en phase nocturne dans la journée du (16 avril 2009).**

La variation mensuelle de la température moyenne diurne en (avril) présente une bonne amplitude thermique environ de (22 °C), comparativement aux températures diurnes dont l'amplitude dépasse (15 °C).

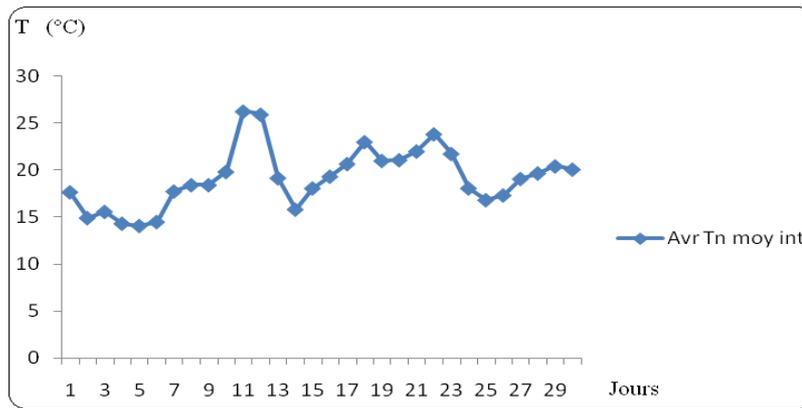
D'autre part les faibles valeurs des écarts-types indiquent une faible variation de la température nocturne sous serre et donc une déperdition thermique progressive.



**Figure (V. 14) : Evolution de la température moyenne sous serre fermée en Avril 2009.**

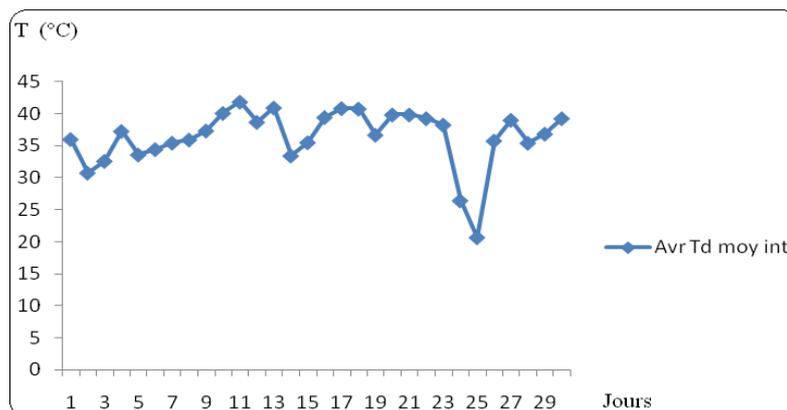
- Le début du refroidissement nocturne de l'ambiance interne évolue lentement et il est retardé d'environ (1h 30mn à 3h) selon les conditions climatiques environnantes.

- Le refroidissement plus lent pendant la nuit et élévation des températures intérieures moyennes de (12 °C à 27 °C).



**Figure (V. 15) : Evolution de la température moyenne nocturne sous serre fermée en printemps (Avril 2009).**

L'effet de serre dû à l'apport solaire est largement suffisant durant le jour en grande partie de ce mois. Le refroidissement est essentiellement nocturne surtout par ciel clair, où parfois le refroidissement intense se traduit par l'inversion des températures internes.



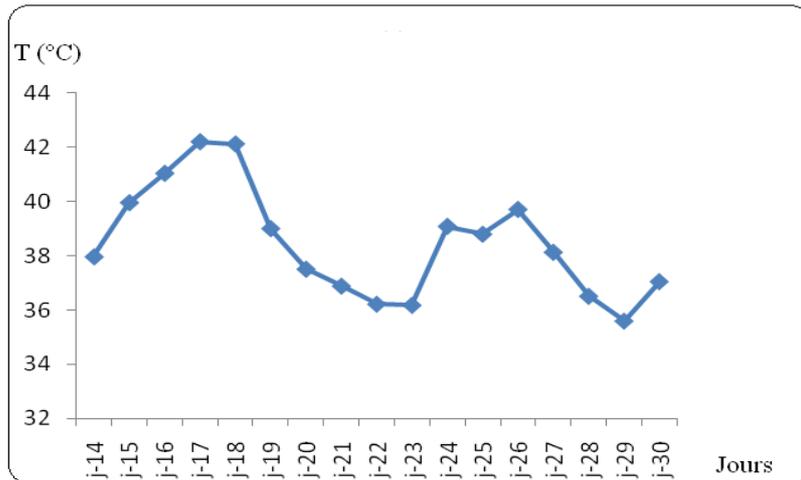
**Figure (V. 16): Evolution de la température moyenne diurne sous serre fermée en printemps (Avril 2009).**

### V.3.3.7.-La température du matériau constituant la serre :

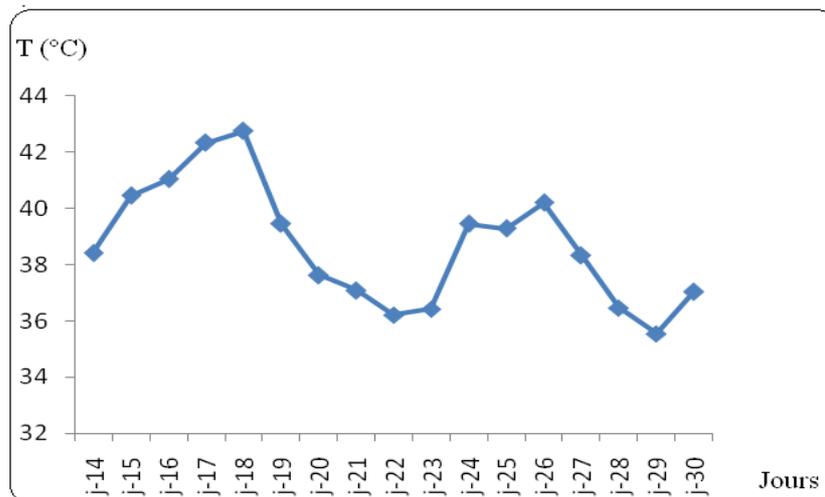
Elle dépend surtout de sa nature, de sa constitution (nombre de parois) et des conditions extérieures.

Les figures ci-dessous (V.17.18.19.20) montrent les températures des surfaces de la couverture présentes (façade Ouest, façade Est et la toiture) et la température de l'air intérieur mesurées en exploitant le rayonnement mesuré.

Ces mesures ont été effectuées en considérant certaines hypothèses sur les états de surface (absorptivité, réflexivité, émissivité).



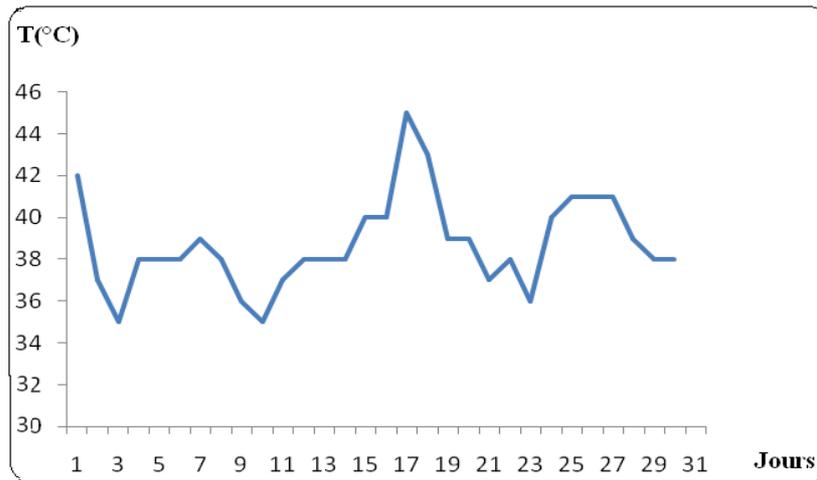
**Figure (V. 17): Evolution de la température moyenne sur la façade Ouest (paroi 1) sous serre fermée en été (14 à 30 Juin 2008).**



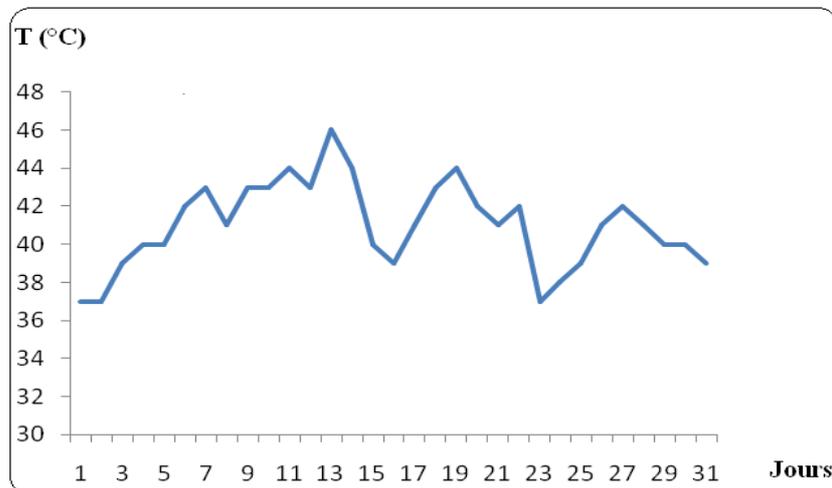
**Figure (V. 18): Evolution de la température moyenne sur la façade Est (paroi 2) sous serre exposée directement au rayonnement solaire en Juin 2008 ( serre fermée ).**

Il convient de noter également de deux façade, malgré l'exposition de la façade Est au rayonnement solaire, n'est pas privilégiée en terme de gain d'énergie, dès lors qu'on se rapproche des mois chauds.

Les températures moyennes étant pratiquement semblables à celles de la façade opposée.



**Figure (V. 19): Variation de la température de la toiture d'une serre fermée en juin 2008.**



**Figure (V. 20): Variation de la température du toiture d'une serre ouverte en Juillet 2008.**

En général, on constate que la température n'est pas uniforme :

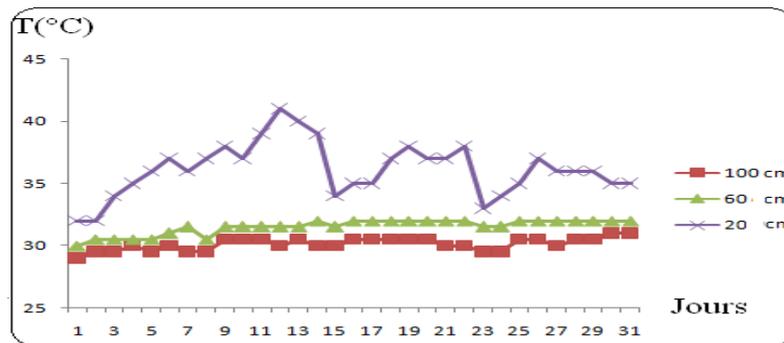
- Elle est hétérogène en surface, selon la forme et l'orientation de la serre : écart maximal pour les abris uni-chapelles.
- Elle est hétérogène en hauteur, l'air chaud s'accumulant en partie haute. Ce phénomène est souvent défavorable (en hiver pour les serres en pente), mais peut être avantageux en été, sous serre haute [16].
- La lutte contre les températures excessives consiste, comme on l'a vu, soit à réduire les apports d'énergie, soit à accroître les déperditions.

### **La température du sol :**

Les échanges de chaleur se font par conduction dans la masse et, en surface, par rayonnement et convection avec évaporation ou condensation.

Ses variations de température par rapport à celles du climat sont amorties (et décalées) très fortement lorsque la masse calorifique est grande (cultures en pleine terre), mais peu lorsque cette masse est petite (mottes, godets, hors sol).

Les relevés de la température sous serre aux différents niveaux (20 cm, 60 cm et 100 cm), montrent un gradient de température négatif ascendant.



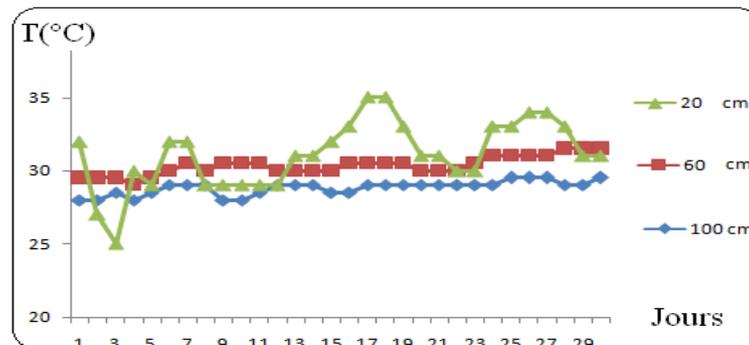
**Figure (V. 21): Variation de la température du sol entre les niveaux profondeurs (20, 60 et 100 cm) à l'intérieur d'une serre ouverte en juillet 2008.**

La figure (V.21) montre que la température du sol reste presque constante à profondeur considérée,

La température du sol augmente de plusieurs degrés selon l'ensoleillement, la nature du sol et sa teneur en eau.

Cette évolution thermique du sol a tendance à améliorer la stabilité relative du climat intérieur.

Le profil de température est caractérisé par un gradient fort situé juste au-dessous du sol.



**Figure (V. 22): Variation de la température du sol entre les niveaux profondeurs (20, 60 et 100 cm) à l'intérieur d'une serre fermée en juin 2008.**

On constate que la température reste presque inchangée dans les (60, 100 cm) au-dessous du sol.

Il est à noter que les températures du (60 cm) et du (100 cm) sont plus proches.

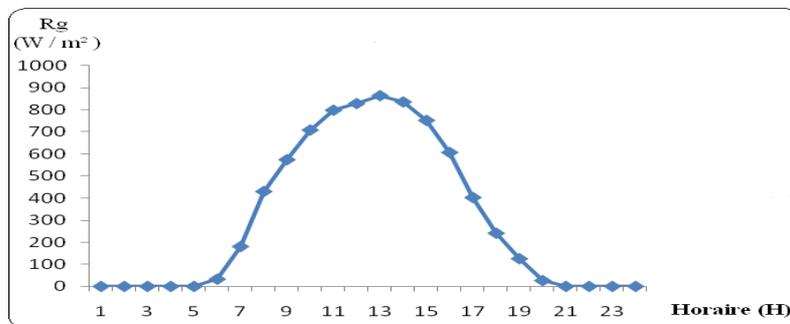
#### V.4.-Le rayonnement solaire :

Selon la nébulosité, les quantités d'énergies reçues sont fortement modifiées au cours de journées successives.

En Juillet, alors que l'énergie solaire instantanée moyenne reçue est voisine de 870 W/m<sup>2</sup>. Elle peut passer de 1000 W/m<sup>2</sup> par ciel très clair.

La variation est importante au cours de l'année, elle dépend de la longueur du jour, de l'intensité du rayonnement et de l'état du ciel.

La figure (V.23) montre cette variation du rayonnement solaire global.



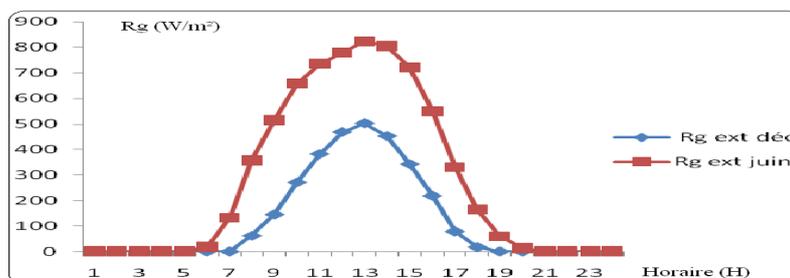
**Figure (V. 23): Evolution du rayonnement solaire global extérieur moyen en Juillet.**

Après mesures, les graphes de figure (V.24) montrent les variations du rayonnement solaire global sur un plan horizontal Rg, pour les mois choisis.

Les deux courbes présentent la même allure, mais avec un écart important.

Cette différence est probablement due à la longueur du jour, au cours de l'année et de l'intensité du rayonnement.

On remarque que l'énergie mensuelle reçue en juin est deux fois plus grande qu'en décembre.

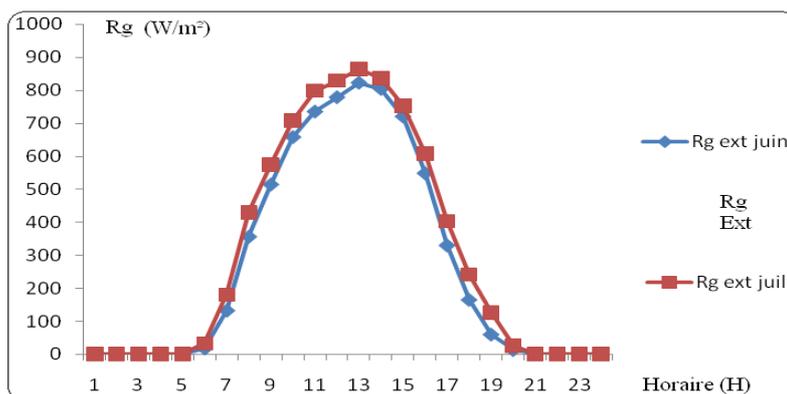


**Figure (V. 24): Evolution comparée du rayonnement solaire global extérieur moyen de deux journées en hiver et en été (Décembre et Juin 2008).**

L'énergie reçue varie dans l'espace avec la latitude et la nébulosité. Les écarts sont moins importants en été, les pays les plus nordiques ayant des durées d'ensoleillement plus importantes.

Les graphes de figure (V.25) présentent la même allure avec un écart très faible.

Cette différence est probablement due à un ciel relativement couvert durant les journées considérées.



**Figure (V.25): Evolution comparée du rayonnement solaire global extérieur de deux journées sans nuage en été (20 Juin et 01 Juillet 2008).**

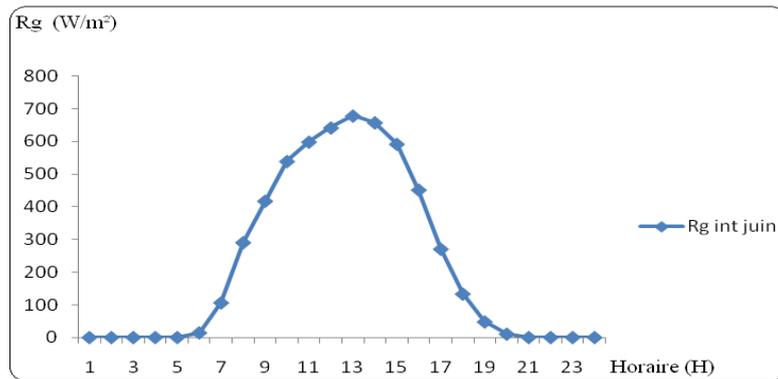
À l'intérieur de la serre, les variations saisonnières sont augmentées du fait d'une transmission plus faible lorsque le soleil est bas sur l'horizon avec un coefficient de transmission qui peut passer de 80% en juin à 55 % en février.

En pénétrant dans la serre, le rayonnement solaire subit de légères modifications qualitatives.

On a vu que le rayonnement solaire pouvait atteindre en été 1 kW / m<sup>2</sup> environ les deux tiers pénètrent dans la serre soit 700 W / m<sup>2</sup> flux considérable d'une culture exigeante en température.

Mais il n'est pas nécessaire que le flux solaire soit aussi élevé pour provoquer des troubles dans les serres en effet bien que la plus grande partie de cette énergie soit utilisée pour la transpiration des plantes (chaleur latente) l'augmentation des températures (chaleur sensible) sous abri ensoleillé est rapide et forte, elle peut nuire aux cultures, par ses effets directs sur les réactions biologiques, ou indirects, comme l'abaissement de l'humidité de l'air.

La figure (V.26) montre que le rayonnement solaire global atteint la valeur maximale qui équivaut aux environs de midi (plus ou moins).



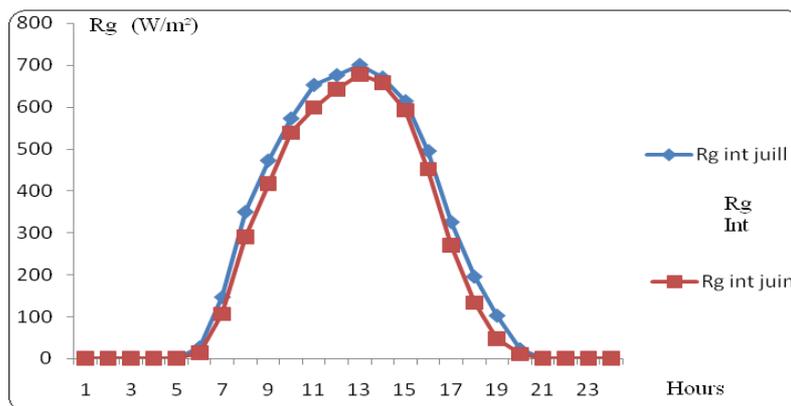
**Figure (V. 26): Evolution du rayonnement solaire global moyen à l'intérieur en Juin 2008 (serre fermée).**

La figure (V.27) montre le rayonnement global mesuré à l'intérieur d'une serre en deux mois différent juin et juillet.

Les deux courbes présentent la même allure avec un écart faible.

Ce phénomène est du essentiellement à la durée d'insolation de ces mois.

Ces écarts sont probablement dus, d'une part aux procédures d'essai et d'autre part à la précision des coefficients utilisés et aussi aux différents paramètres physiques.



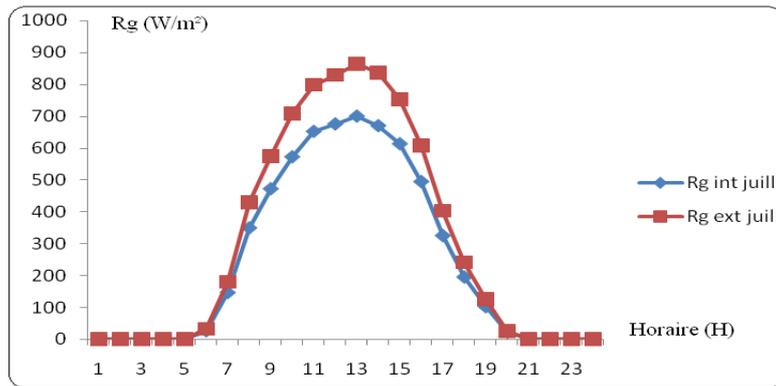
**Figure (V. 27): Evolution comparée du rayonnement solaire global à l'intérieur d'une serre au cours du (Juin et Juillet 2008).**

L'apport solaire est largement suffisant de jour et même excédentaire, alors que de nuit les capacités thermiques internes de la serre sont relativement faibles et nécessitent le chauffage.

La récupération d'une partie de l'énergie de jour est nécessaire pour améliorer de nuit l'effet thermique de la serre.

La figure (V.28) montre le rayonnement global mesuré à l'intérieur et à l'extérieur de la serre en mois de juillet.

Les deux courbes présentent la même allure, mais avec un écart important.



**Figure (V. 28): Evolution comparée du rayonnement solaire global à l'intérieur et à l'extérieur d'une serre ouverte au cours du Juillet 2008.**

Les conditions d'utilisation de la serre fermée en Juin, font que les résultats obtenus constituent des maximums et ne peuvent être considérées que comme une information sur les performances de la serre et les capacités de la couverture à remplir son rôle dans l'effet de serre.

La couverture de la serre fermée présentait une très bonne transparence au début de l'expérience avec un léger effet de diffusion de la lumière du jour.

Pour la serre ouverte la couverture utilisée présentait une bonne transparence et pratiquement aucun effet de diffusion.

#### V.5.-Coefficient de transmission dans le global $\tau$ :

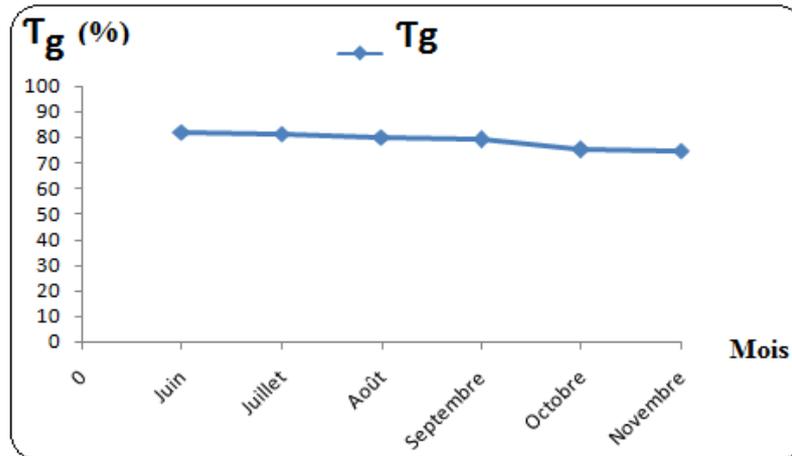
Le rapport du rayonnement global reçu à l'intérieur de la serre sur celui reçu à l'extérieur caractérise la transparence de la paroi au rayonnement solaire [14].

Il est calculé à partir du rapport des rayonnements globaux mesurés à l'intérieur et à l'extérieur de la serre ; l'accumulation des salissures et le vieillissement agissent défavorable sur ce facteur.

L'évolution de ce paramètre est représentée dans le tableau (V. 10) :

**Tableau (V. 10) : Evolution du taux de transmission dans le global ( $\tau_g$ ) 2008.**

Mois	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre
$\tau_g$	0,819	0,813	0,80	0,79	0,75	0,745



**Figure (V. 29) : Evolution du taux de transmission dans le global ( $\tau_g$ ) 2008.**

Les premières dégradations physiques de la couverture ont commencé à être visibles à partir du cinquième mois après la pose (mois d'Octobre 2008).

L'allongement du jour et l'augmentation des quantités de rayonnement incident favorisaient le phénomène qui s'aggravait et touchait essentiellement la couverture et la face Est de la serre qui était exposée directement au rayonnement solaire.

On constate dans les deux cas de la serre (fermée et ouverte) que :

- la température à l'intérieur de la serre est plus importante que celle réalisée à l'extérieur.
- le phénomène de dégradation était plus accentué au niveau des parties en contact avec l'armature (charpente).

Pour la serre sans végétation, normalement utilisée, et dans les conditions les plus défavorables l'inertie thermique de la serre comblera environ de 30 % des pertes nocturnes de chaleur. Cette valeur serait plus importante lorsque la serre est fermée.

### **V.5.1.-Evolution des coefficients de transfert convectif :**

#### **V.5.1.1.-Coefficient de transfert convectif à l'intérieur :**

Pour déterminer  $h_{(c,a)int}^c$  entre la paroi et l'air intérieur on peut retenir l'expression proposée par: [40][41]

$$h_{(a,e)int}^c = 1,95 (T_{aint} - T_{cint})^{0,3} \quad (W/m^2 \cdot ^\circ C) \quad (III.57)$$

L'équation est valide pour :

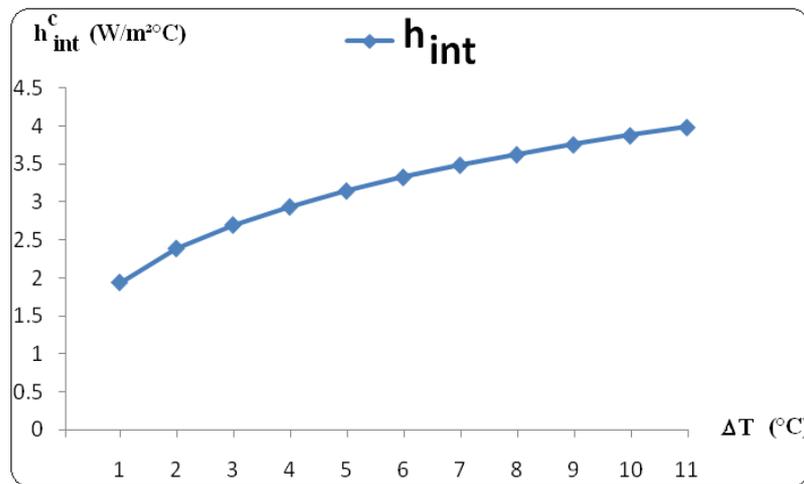
$$(T_{aint} - T_{cint}) \leq 11,1^\circ C.$$

Le tableau suivant montre la variation du coefficient convectif du côté intérieur en fonction de l'écart de température:

**Tableau (V. 11): Variation du coefficient convectif du côté intérieur.**

$\Delta T$ (°C)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$h_{int}^c$ (W/m <sup>2</sup> °C)	1,95	2,4	2,71	2,95	3,16	3,34	3,5	3,64	3,77	3,89	4

On remarque que l'évolution de coefficient convectif du côté intérieur en fonction de l'écart de température  $\Delta T$  (1 °C à 11°C) ne change pas considérablement.



**Figure (V. 30): Evolution du coefficient convectif du côté intérieur.**

#### V.5.1.2.-Coefficients de transfert convectif à l'extérieur :

Pour déterminer  $h_{(c,a)ext}^c$  entre la paroi et l'air extérieur on peut retenir l'expression proposée par: [40][41]

$$h_{(a,c)ext}^c = 0,95 + 6,76 V^{0,49} \quad (\text{W/m}^2 \text{ °C}) \quad (\text{III.66})$$

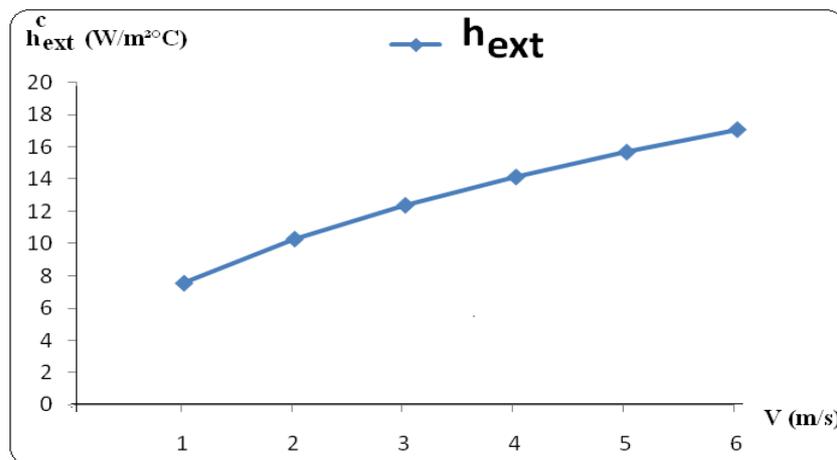
L'équation est valide pour :  $(T_{aext} < T_{cext})$  et  $V \leq 6,3$  (m/s).

La variation du coefficient convectif du côté extérieur en fonction de la vitesse du vent dans le tableau suivant :

**Tableau (V. 12): Variation du coefficient convectif du coté extérieur.**

V (m/s)	1	2	3	4	5	6
$h_{ext}^c$ (W/m <sup>2</sup> . °C)	7,71	10,44	12,53	14,28	15,82	17,21

L'évolution du coefficient convectif du coté extérieur est proportionnelle à la vitesse du vent et on constate que le transfert est d'autant plus élevé que la vitesse du vent est grande.



**Figure (V. 31): Evolution du coefficient convectif du coté extérieur.**

---

# *Chapitre VI :*

---

## **VI.-Étude comparative du climat entre Ouargla et Oran :**

### **VI.1.-Introduction :**

La réussite de toute culture est étroitement liée aux conditions du milieu, parmi lesquelles le climat régnant au niveau du site de plantation. Ces conditions peuvent être naturelles ou artificielles. L'utilisation des serres en est un exemple d'artifices cultureux adoptés pour remédier à certaines défaillances climatiques.

Le climat est défini par de nombreux éléments, entre autres la température, l'insolation, les précipitations, l'humidité relative et les vents. Il dépend de plusieurs facteurs tels que la latitude, le relief, les courants marins et la proximité des côtes, et résulte de l'interaction de l'ensemble des facteurs mis en jeu. Plusieurs méthodes de classification des régions climatiques ont été développées. Comme exemple, on peut citer celle basée sur la température ou mieux celle basée sur la température et l'humidité, associées ou non au couvert végétal en place.

### **VI.2.-Présentation générale (Situation géographique) :**

#### **VI.2.1.-La région d'Ouargla:**

Ouargla est l'une des principales oasis du sud Algérien, se trouvant à 157 m d'altitude, à 800 Km au Sud Est d'Alger, à 5°20' E de longitude et 31°58' N de latitude. Elle est limitée au Nord par les régions de Djelfa et El Oued, à l'est par la Tunisie, au sud par les régions de Tamanrasset et Illizi, et à l'ouest par la région de Ghardaïa [54].

Le relief est caractérisé par une prédominance de dunes, et revêt un aspect tabulaire aux strates parallèles.

#### **VI.2.2.-La région d'Oran :**

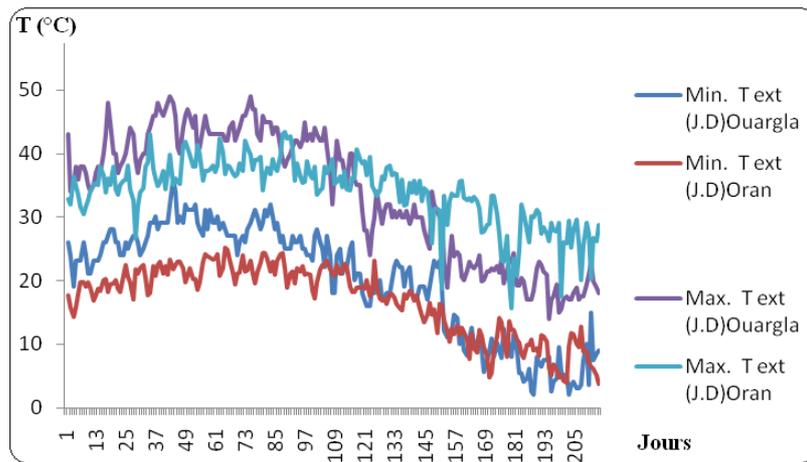
La ville d'Oran "la radieuse" (el Bahia) (Latitude 31°40' N, longitude 00°36' W, altitude 120m) est une ville méditerranéenne, elle se situe à 432 Kms à L'Ouest d'Alger, elle est limitée au Nord par la Méditerranée, au sud par Sidi-Bel-Abbès et Mascara, et à l'Est par Mostaganem.

Oran est située au fond d'une baie ouverte au nord et dominée directement à l'ouest par la montagne de l'Aïdour. L'agglomération s'étage de part et d'autre du profond ravin de l'oued R'Hi.

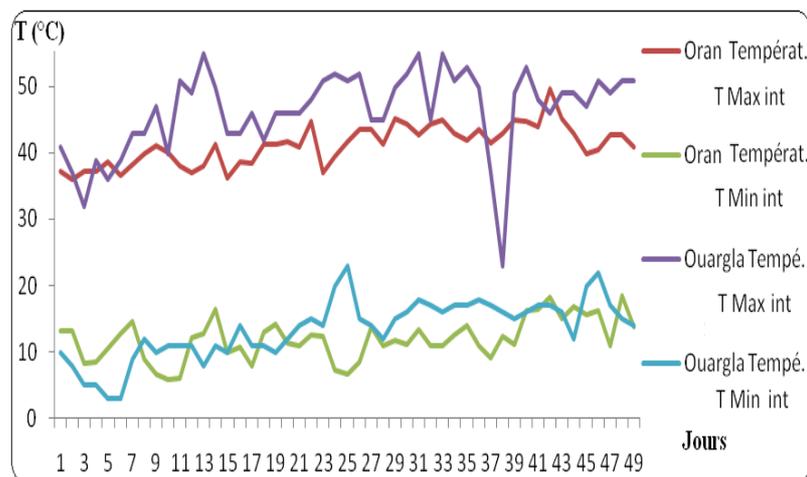
Cette région caractérisée par des hivers pluvieux et froids, des étés chauds et sec, des humidités généralement plus forts, et des longueurs de jours variables affecte le rayonnement solaire.

### VI.3.-Evolutions des températures :

En un lieu donné la température est un élément déterminant du rayonnement et du bilan énergétique. C'est aussi un paramètre capital en agro-climatologie notamment dans les processus de croissance des végétaux.



**Figure (VI.1): Evolutions mensuelles (maximales et minimales) des températures extérieures (Ouargla et Oran) 2008.**



**Figure (VI.2a): Evolutions mensuelles (maximales et minimales) des températures intérieures (Ouargla et Oran) (19mars à 6mai 2009).**

---

### **VI.3.1.-Evolution des températures maximales :**

Les variations des températures maximales mensuelles et saisonnières sont d'un intérêt capital parce qu'étant les plus ressenties par les êtres vivants.

Elles ont considérablement évolué dans le temps et dans l'espace.

- Dans le temps, parce qu'au cours de la période d'observation (juin à décembre) nous avons constaté une évolution régulière saisonnière des maxima de température.
- Dans l'espace parce que d'une région à une autre, le rythme d'évolution varie.

L'analyse des totaux saisonniers indique une forte modification des valeurs maximales de température dans diverses régions du pays.

L'analyse permet de constater une nette évolution mensuelle positive très remarquable à Ouargla et Oran.

En effet, tous les mois de l'année dans ces deux régions notent une augmentation de leur température maximale mensuelle. Le mois de juillet mesure la hausse la plus spectaculaire.

La moyenne des températures maximales de l'air mesurées dans les climats étudiés durant la période précédente, allant du (juin à décembre 2008) par l'extérieure, était de (39,3°C) en Ouargla et (38,57°C) en Oran, et de la (mi-mars à mi-mai 2008) à l'intérieure était de (46,37°C et 41,17°C) respectivement aux traitements de deux serres en (Ouargla et Oran).

La température maximale de l'air affiche les valeurs respectives de (49°C) en juillet et août à Ouargla, et d'Oran (43,5°C) en août à l'extérieure et de (55°C et 45,2°C) à l'intérieure de (Ouargla et Oran).

Le maximum des températures a effectivement lieu aux alentours delà mi juillet.

Le tunnel d'Ouargla est donc le plus exposé à l'élévation de la température maximale.

### **VI.3.2.-Evolution des températures minimales :**

A l'inverse, les températures minimales présentent une courbe d'évolution contraire à celle des maxima. Autrement dit, elles présentent une configuration assez singulière, avec des allures très proches. Les diverses phases de chaleur et de fraîcheur sont observées au cours des mêmes périodes.

Les figures (VI. 1et 2) tracent l'évolution de la température minimale mesurée au cours du six mois (juin à décembre 2008), à l'extérieur et au cours du (mi mars à mi mai) à l'intérieur d'une serre, en comparaison par rapport les deux régions (Ouargla et Oran).

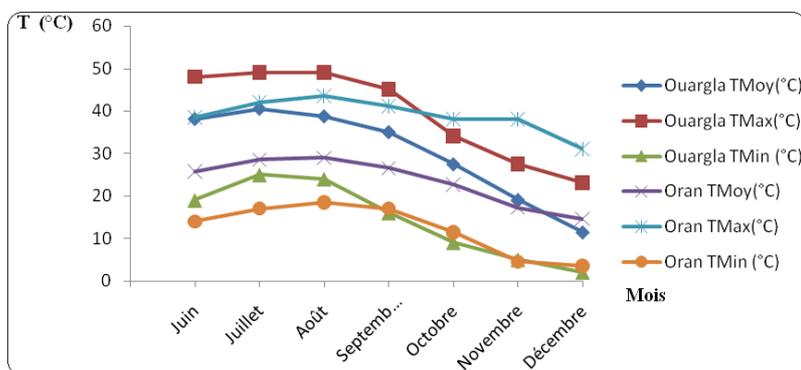
Ainsi, les températures minimales absolues de l'air, mesurées au cours de ces mois est de (2 °C et 3,83 °C) en décembre à l'extérieur et (3°C et 5,9°C) en mars à l'intérieure respectivement Ouargla et Oran.

Les valeurs moyennes minimales à l'extérieure au cours de (juin à décembre 2008) est de (14,62°C et 12,64°C) et à l'intérieure de (13,47°C et 11,99°C) à (Ouargla et Oran).

### VI.3.3.-Evolutions mensuelles des températures extérieures (Ouargla et Oran) :

Evolutions mensuelles des températures extérieures Text (°C):						
Mois	Ouargla			Oran		
	TMoy(°C)	TMax(°C)	TMin (°C)	TMoy(°C)	TMax(°C)	TMin (°C)
Juin	38,07	48	19	25,79	38,5	14
Juillet	40,49	49	25	28,61	42	17
Août	38,71	49	24	28,95	43,5	18,5
Septembre	34,99	45	16	26,58	41	17
Octobre	27,44	34	09	22,65	38	11,5
Novembre	19,04	27.5	05	17,19	38	4,5
Décembre	11,43	23	02	14,62	31	3,5

**Tableau (VI.1): Evolutions mensuelles des températures extérieures (Ouargla et Oran) 2008.**



**Figure (VI.3): Evolutions mensuelles des températures extérieures (Ouargla et Oran) 2008.**

La période de faible température maximale coïncide avec la saison humide qui vient apporter un coup de fraîcheur aux deux régions.

La moyenne des températures minimales (T Min) des mois les plus chauds sont comprise entre (19 - 25°C) à Ouargla et entre (14 -18,5°C) à Oran.

En hiver, Les températures les plus basses mesurées atteignent à janvier (mois plus froid).

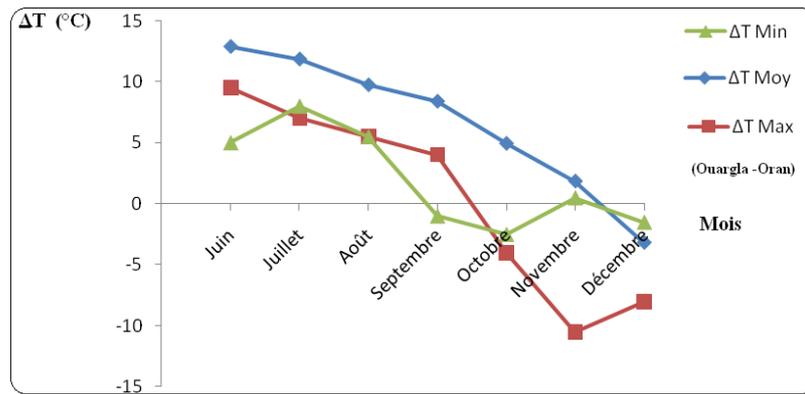
Le mois de décembre est froid (2°C) à Ouargla et (3 ,5°C) à Oran. Il est à noter la grande amplitude de variation de la température.

En été, les températures restent assez voisines. La moyenne des températures maximales (T Max) du mois le plus chaud varie avec la continentalité. Elle est de (38,5°C à 43,5°C) à Oran, et supérieure à (40°C) dans les régions sahariennes, de (45°C à 49°C) à Ouargla.

**VI.3.4.-Evolutions mensuelles des écarts des températures extérieures (moyennes, maximales et minimales) de (Ouargla - Oran) :**

<b>Evolutions mensuelles des écarts des températures extérieures (Ouargla – Oran) <math>\Delta T</math> ext. (°C):</b>			
<b>Mois</b>	$\Delta T$ Moy	$\Delta T$ Max	$\Delta T$ Min
Juin	12,91	9,5	5
Juillet	11,88	7	8
Août	9,76	5,5	5,5
Septembre	8,41	4	- 1
Octobre	4,95	- 4	- 2,5
Novembre	1,85	- 10,5	0,5
Décembre	- 3,19	- 8	- 1,5

**Tableau (VI.2): Evolutions mensuelles des écarts des températures extérieures (moyennes, maximales et minimales) de (Ouargla-Oran) 2008.**



**Figure (VI.4): Evolutions mensuelles des écarts des températures extérieures (moyennes, maximales et minimales) (Ouargla-Oran) 2008.**

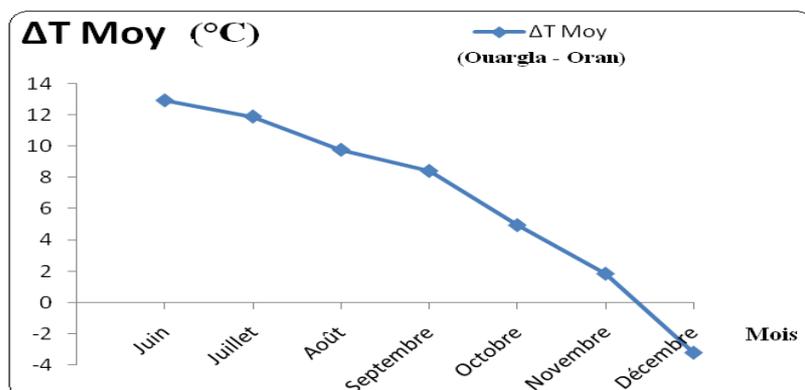
Le climat thermique est assez uniforme; les étés du Sahara sont plus torrides que ce de la zone de la mer.

(Juin, juillet et août) sont les mois les plus chauds. Juillet est le mois le plus chaud avec, en année normale, une moyenne des maxima quotidiens comprise entre (40°C et 46°C), selon les localités.

Les plus hautes températures ont été observées à midi ciel clair avec (49°C) en juillet.

En automne, l'écarte des températures maximales presque partout plus basse, elle est passée de (-10°C) à novembre.

L'amplitude des variations thermiques annuelles, qui est l'une des particularités du climat des déserts chauds, peut dépasser (55°C) au Sahara. En outre, l'amplitude quotidienne, c'est-à-dire la différence entre le maximum diurne et le minimum nocturne, dépasse souvent (30°C).



**Figure (VI.5): Evolutions mensuelles des écarts moyennes des températures extérieures (Ouargla-Oran) 2008.**

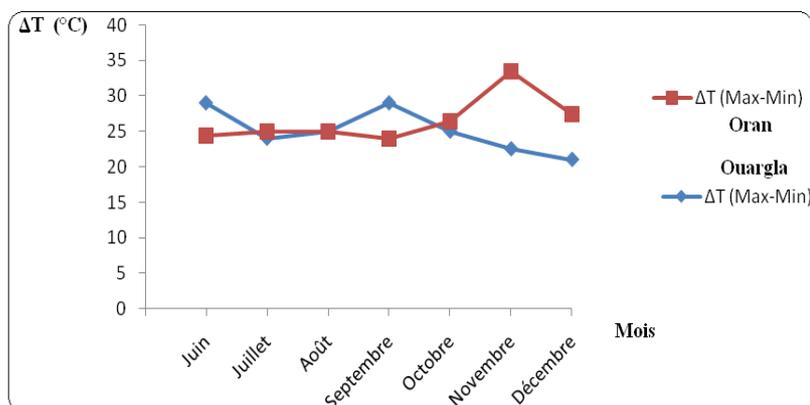
Les écarts des températures moyennes entre les deux régions montrant la différence entre le mois 'chaud' juin et le mois 'froid' décembre. Presque elle est plus élevée à Ouargla, l'écarte environ de (13°C) à juin.

On ne constate que la région d'Ouargla est caractérisée par des étés plus chauds.

**VI.3.5.-Evolutions mensuelles des écarts (maximales – minimales) des températures extérieures (Ouargla et Oran) :**

<b>Evolutions mensuelles des écarts des températures extérieures (Maximales – Minimales) <math>\Delta T</math> ext. (°C):</b>		
<b>Mois</b>	<b>Ouargla</b>	<b>Oran</b>
	<b><math>\Delta T</math> (Max-Min)</b>	<b><math>\Delta T</math> (Max-Min)</b>
Juin	29	24,5
Juillet	24	25
Août	25	25
Septembre	29	24
Octobre	25	26,5
Novembre	22,5	33,5
Décembre	21	27,5

**Tableau (VI.3) : Evolutions mensuelles des écarts (maximales – minimales) des températures extérieures (Ouargla et Oran) 2008.**



**Figure (VI.6): Evolutions mensuelles des écarts (maximales – minimales) des températures extérieures (Ouargla et Oran) 2008.**

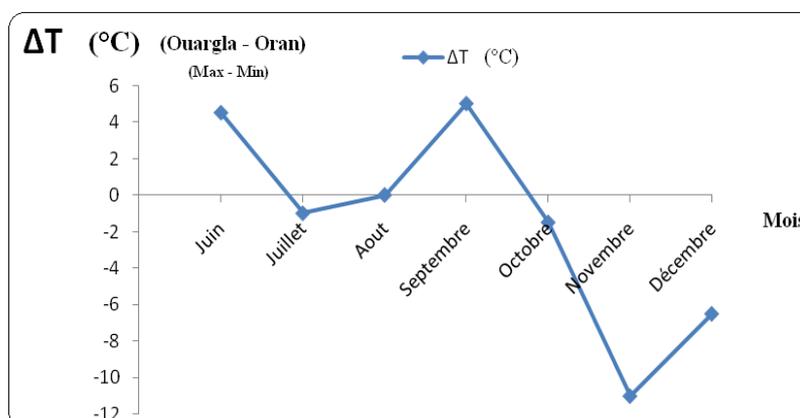
L'évolution des écarts des températures en été à Ouargla est semblable à celle des températures à Oran avec une baisse dans le mois de septembre, puis une hausse irrégulière dans les mois (octobre à décembre) à ce dernière (Oran).

On peut dire qu'en été les écarts des températures (max – min) d'Ouargla ne se différencie pas fortement de celui d'Oran.

### VI.3.6.-Evolutions mensuelles des écarts (maximales – minimales) des températures extérieures (Ouargla-Oran) :

Evolutions mensuelles des écarts des températures extérieures $\Delta T$ (Max-Min) extérieures (Ouargla – Oran). (°C):							
Mois	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
$\Delta T$	4,5	- 1	0	5	- 1,5	- 11	- 6,5

**Tableau (VI.4): Evolutions mensuelles des écarts (maximales – minimales) des températures extérieures (Ouargla-Oran) 2008.**



**Figure (VI.7): Evolutions mensuelles des écarts (maximales – minimales) des températures extérieures (Ouargla-Oran) 2008.**

Les écarte des températures (maximale-minimale) de (Ouargla-Oran) des mois (octobre à décembre) à des valeurs négatives, qui illustrent la hausse des températures observée dans la station littorale (Oran).

Cette écarte est plus intense et dépasse (– 10 °C) à novembre.

Les écarts des températures, évaluées entre les données de la station d'Ouargla et Oran, expriment cette particularité (tableau VI.7).

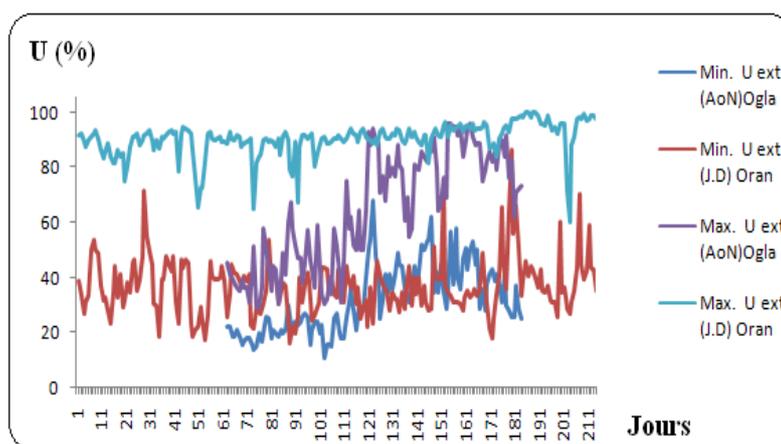
La descente des masses d'air sur les plaines littorales entraîne une hausse spectaculaire des températures et une sécheresse accrue.

Une hausse remarquable des températures et une sécheresse sont notées en relation avec la descente provoquée par le relief.

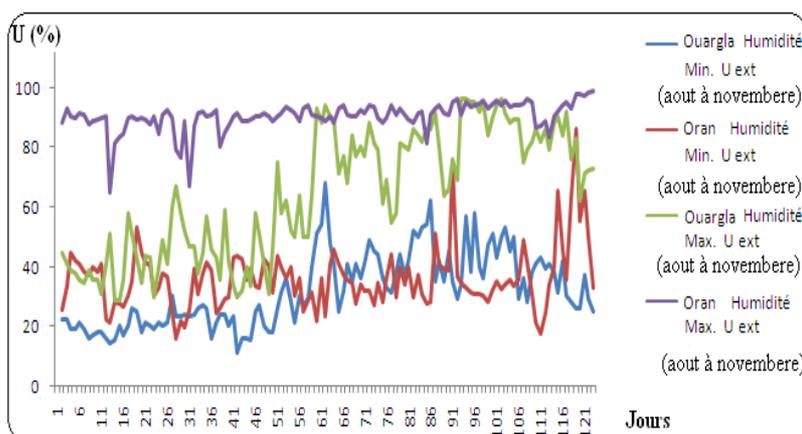
#### VI.4.-Evolutions des humidités:

L'humidité est un paramètre climatique important qui favorise de manière directe la croissance bactérienne et fongique dans la serre.

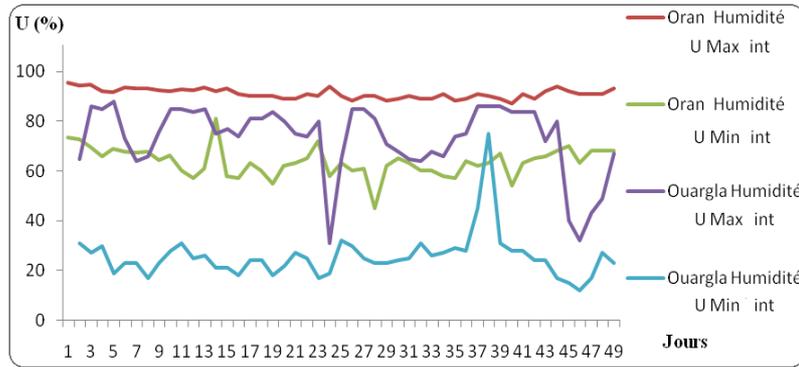
L'importance des hauteurs d'eau journalière, décadaires voire mensuelles imprime un caractère particulier à l'humidité relative des régions.



**Figure (VI.8a) : Evolutions mensuelles des humidités extérieures (Ouargla et Oran) (juin à décembre 2008).**



**Figure (VI.8b) : Evolutions mensuelles des humidités extérieures (Ouargla et Oran) (août à novembre 2008).**



**Figure (VI.9) : Evolutions mensuelles des humidités intérieures (Ouargla et Oran) (19 mars à 6 mai 2009).**

#### VI.4.1.-Evolutions des humidités maximales:

L'humidité relative maximale est fonction des saisons; la saison sèche généralement marquée par une absence ou une faiblesse de précipitations provoque un assèchement non seulement des rivières, mais aussi de l'air. Ce qui explique la récession remarquée au niveau des maxima durant les mois secs.

L'humidité relative à Oran est constamment élevée avec une moyenne mensuelle supérieure à (62%) pour tout les mois.

Son évolution saisonnière est étroitement liée aux précipitations et à l'évaporation.

C'est surtout en saison humide que l'on observe les maxima les plus forts (99,9%) en décembre (Figure VI.8a).

Ce qui explique la récession remarquée au niveau des maxima durant les mois secs notamment à Ouargla : avec respectivement des valeurs moyennes mensuelles très faibles : (24,03%) en juin et (26,74%) en juillet et (27,53%) en août. (Figure VI.8b).

Cet ordre sera bouleversé en saison des pluies, durant laquelle les plus fortes valeurs maximales sont observées en (septembre, octobre et novembre) avec (94%, 96% et 96%).

#### VI.4.2.-Evolutions des humidités minimales:

Contrairement aux comportements des maxima de température qui présentent une allure légèrement opposée aux minima, les minima de l'humidité relative se calquent sur le comportement des maxima.

La courbe (Figure VI.8a) présente une croissance régulière des minima d'août à novembre où elle plafonne à (25%). Puis en quatre mois elle rejoint son minimum en septembre (11%) à Ouargla et de (16,25%) en août à Oran.

La région Oran affiche une tendance mensuelle pas assez remarquable, certains mois comme juin et juillet notent plutôt une régression de leurs valeurs d'autres par contre, en dehors de août à novembre qui sont restés relativement stables.

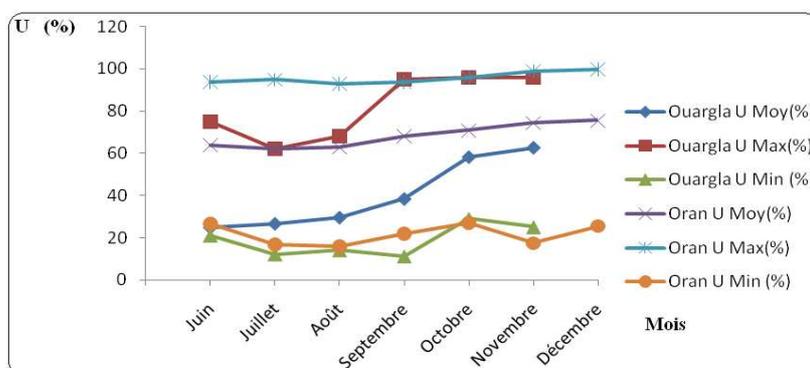
Les minima les plus bas sont par contre mesurés en périodes connaissant une forte évaporation.

#### VI.4.3.-Evolutions mensuelles des humidités extérieures (Ouargla et Oran) :

Le tableau (VI.5) présente un récapitulatif des taux d'humidité relative mesurés.

Evolutions mensuelles des humidités extérieures 2008 U ext (%) :						
Mois	Ouargla			Oran		
	U Moy(%)	U Max(%)	U Min (%)	U Moy(%)	U Max(%)	U Min (%)
Juin	24,97	75	21	63,87	93,9	26,5
Juillet	26,74	62	12	62,19	95	17
Août	29,67	68	14	62,85	93	16
Septembre	38,47	95	11	68,21	94	22
Octobre	58,25	96	29	70,94	96	27
Novembre	62,66	96	25	74,42	99	17,5
Décembre	---	---	---	75,63	99,9	25,5

**Tableau (VI.5): Evolutions mensuelles des humidités extérieures (Ouargla et Oran).**



**Figure (VI.10) : Evolutions mensuelles des humidités extérieures (Ouargla et Oran).**

La répartition et l'évolution saisonnière de l'humidité relative à grande échelle est très sensible à celle des anomalies de précipitations et de températures de surface. Autrement dit, l'assèchement progressif d'un milieu, dû, à une baisse de précipitations, et à l'augmentation de l'évaporation ont un effet négatif sur l'humidité relative de l'air.

La différence d'humidité entre les deux régions variait au cours de la journée, culminant pendant les heures les plus chaudes. Elle variait également au cours des saisons.

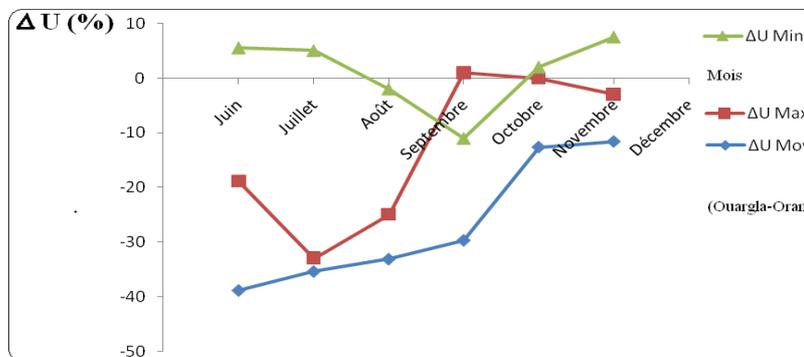
Le degré hygrométrique de l'air, ou humidité relative moyenne, oscille en été entre (24,97 % et 29,67%) dans la région d'Ouargla. À Oran est plus favorisé avec (62,19% à 63,87%) en été et (74,42 %) en novembre.

Les humidités nocturnes restent élevées pour la saison d'été, elles sont supérieures à (60 °C) en moyenne à Oran et de (25 °C) à Ouargla.

**VI.4.4.-Evolutions mensuelles des écarts des humidités extérieures (Ouargla-Oran) :**

<b>Evolutions mensuelles des écarts des humidités extérieures (Ouargla – Oran)</b>			
<b><math>\Delta U</math> ext. (%):</b>			
<b>Mois</b>	<b><math>\Delta U</math> Moy</b>	<b><math>\Delta U</math> Max</b>	<b><math>\Delta U</math> Min</b>
Juin	- 38,9	- 18,9	5,5
Juillet	- 35,45	- 33	5
Août	- 33,18	- 25	-2
Septembre	- 29,74	1	-11
Octobre	- 12,69	0	2
Novembre	- 11,67	- 3	7,5

**Tableau (VI.6): Evolutions mensuelles des écarts des humidités extérieures (Ouargla-Oran) 2008.**



**Figure (VI.11) : Evolutions mensuelles des écarts des humidités extérieures (Ouargla-Oran) 2008.**

Les valeurs de l'écart de l'humidité relative moyenne affichent des seuils très bas qui sont inférieurs à (- 38,9 %) le mois juin.

La descente des masses d'air sur les plaines littorales entraîne une basse des humidités.

Les écarts des humidités, évaluées entre les données de la station d'Ouargla et Oran, expriment cette particularité (tableau(VI.6)).

On constate l'écart négatif des humidités moyennes et maximales de (juin à décembre).

Pour ces dernier mois, ces seuils est plus intense et environ de (- 40 °C). Cette importante différence est liée à l'arrivée de l'air chaud sur les régions sahariennes.

L'augmentation de l'humidité de l'air au cours des mois à Oran s'explique par l'intensité des pluies.

#### VI.4.5.-Evolutions mensuelles des écarts (maximales – minimales) des humidités extérieures (Ouargla et Oran).

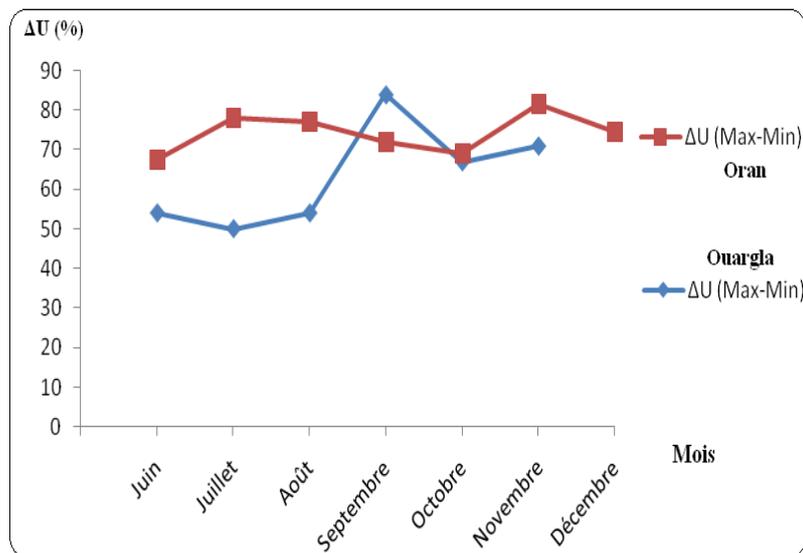


Figure (VI.12) : Evolutions mensuelles des écarts (maximales – minimales) des humidités extérieures (Ouargla et Oran) 2008.

**Tableau (VI.7): Evolutions mensuelles des écarts (maximales – minimales) des humidités extérieures (Ouargla et Oran) 2008.**

<b>Evolutions mensuelles des écarts des humidités extérieures (Maximales – Minimales) <math>\Delta U</math> ext. (%):</b>		
<b>Mois</b>	<b>Ouargla</b>	<b>Oran</b>
	<b><math>\Delta U</math> (Max-Min)</b>	<b><math>\Delta U</math> (Max-Min)</b>
Juin	54	67,4
Juillet	50	78
Août	54	77
Septembre	84	72
Octobre	67	69
Novembre	71	81,5
Décembre	---	74,4

La répartition et l'évolution saisonnière de l'humidité relative à grande échelle est très sensible à celle des anomalies de précipitations et de températures de surface. Autrement dit, l'assèchement progressif d'un milieu, dû, à une baisse de précipitations, et à l'augmentation de l'évaporation ont un effet négatif sur l'humidité relative de l'air.

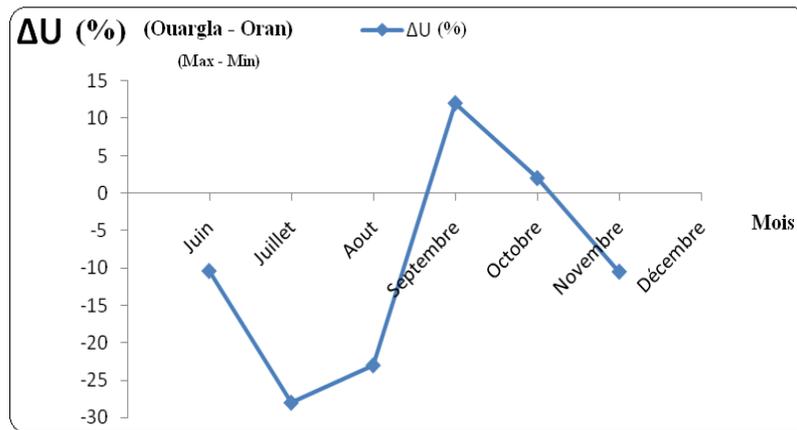
Les écarts (max – min) des humidités sont soumises à une très forte augmentation.

Le maximum est à (84°C) de septembre à Ouargla et de (81,5°C) de novembre à Oran. Ces écarts est plus régulière à Oran.

**VI.4.6.-Evolutions mensuelles des écarts (maximales – minimales) des humidités extérieures (Ouargla - Oran) :**

<b>Evolutions mensuelles des écarts des humidités extérieures <math>\Delta U</math> (Max-Min) extérieures (Ouargla – Oran). (%):</b>							
<b>Mois</b>	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
$\Delta U$	- 10,4	- 28	- 23	12	2	- 10,5	---

**Tableau (VI.8) : Evolutions mensuelles des écarts (maximales – minimales) des humidités extérieures (Ouargla - Oran) 2008.**



**Figure (VI.13) : Evolutions mensuelles des écarts (maximales – minimales) des humidités extérieures (Ouargla - Oran) 2008.**

Les valeurs de l'écart de l'humidité relative affichent des seuils très bas qui sont inférieurs à (- 25 %) le mois juillet. Le point minimal de (- 28 %).

La hausse des températures est accompagnée d'une baisse sensible de l'humidité relative.

L'examen de l'évolution horaire des températures et de l'humidité relative dans les stations d'Ouargla et Oran, montre clairement la progression de l'air chaud et sec depuis les zones sahariennes vers l'ouest du pays.

En rapport avec celles des températures, des variations quotidiennes se produisent : l'humidité relative est généralement minimale vers 15 heures et maximale vers 6 heures, au lever du soleil.

L'écart négatif de l'humidité relative due à L'augmentation de l'humidité de l'air au cours des mois à Oran, qui s'explique par l'intensité des pluies.

---

*Conclusion générale :*

---

## **Conclusion générale :**

L'étude que nous avons effectuée apporte une contribution, basée sur l'expérimentation, réalisé un modèle de bilan énergétique simple, capable de représenter le comportement thermique de la serre. La mise en œuvre de ce modèle a permis de formuler le différent bilan énergétique de la serre en mettant en évidence les apports thermiques naturels d'une part, et de préciser leurs évolutions d'autre part.

Elle permet de dégager l'importance du rôle de la couverture dans l'évaluation des divers critères d'efficacité des serres à couverture de plastique.

La diminution des propriétés optiques du matériau est due à la combinaison des effets physico-chimiques du vieillissement naturel et de l'accumulation de la poussière sur la paroi externe, mais aussi la plus grande sensibilité à la dégradation du matériau.

La dégradation était apparente, a des échelles de temps différentes mais comparables, en particulier, une différence dans l'évolution entre les côtés de la serre et au niveau des zones en contact avec l'armature métallique, cette dernière favorisant le vieillissement par une action thermique localisée.

Des considérations concernant le comportement énergétique de la serre, nous ont permis de détermination du coefficient global de transmission de chaleur à travers la couverture de la serre en fonction des caractéristiques climatiques facilement accessibles, des propriétés radiométriques aux radiations thermiques des matériaux de couverture, de la technique culturale adoptée et de la géométrie de construction.

Le climat à l'intérieur de la serre dépend du climat extérieur et des caractéristiques de l'air. Et aux conditions de leur mise en œuvre (la forme, le volume de l'abri, son orientation, sa structure etc....), mais aussi et surtout les qualités physiques des matériaux de couverture.

Les éléments du climat les plus conséquents pour la serre sont l'humidité relative, la température, l'insolation, le vent et les précipitations. Ils dépendent de plusieurs facteurs tels que la latitude, le relief, les courants marins et la proximité des côtes, et résulte de l'interaction de l'ensemble des facteurs mis en jeux.

La méthode, qui a été testée expérimentalement, permet d'évaluer séparément des déperditions par convection et radiation et elle peut être utilisée pour la classification des matériaux de couverture du point de vue thermique, pour l'estimation des déperditions énergétiques de la serre et pour l'appréciation de l'efficacité des différents dispositifs d'économie d'énergie.

---

La quantité de chaleur échangée dépend de plusieurs paramètres:

- Du coefficient d'échange convectif naturel qui a une influence limitée.
- De la surface d'échange, facteur constant dépendant du fonctionnement de la serre dont la fonction principale est la production agricole.
- De la différence de la température qui est conditionnée par le fonctionnement de la serre.

D'après l'expérimentation réalisée sur une serre située dans la région d'Ouargla, sur les journées choisies (fraîche - froide - mélange entre les deux), ce travail a permis la connaissance des phénomènes suivants:

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

---

# *Références:*

---

### Références bibliographiques:

- [1] Jacques LAGIER, Sylvie MONTAHUT. "De la précocité à la régularité". Histoire de la plasticulture. (2000), 18-19.
- [2] C. WACQUANT, C. SEDILOT, J.GRATRAUD, Philippe ROUX. "La construction des serres et abris". CTIFL, France, (2000), 11-38.
- [3] M. I.SANTAMOURIS. "Active solar agricultural greenhouse" . "The state of art" . International journal of solar energy, Vol. 14 N°1, (1993), 19–32.
- [4] B. J.BAILEY. "Principles of environmental control" . "Energy Conservation and Renewable Energies for Greenhouse Heating" . (1988), 35-174.
- [5] F. COULET.HOUDAILLE, E. D.MASSON. " INRA et les cultures sous serres". INRA, " Paris, (1983).
- [6] C.MONTEIL. " Contribution informatique à l'analyse énergétique des serres agricole". Thèse de Doctorat, Institut polytechnique de Toulouse, (1985).
- [7] A. BAILLE, P. DAUPLE, E. BERNINGER. " INRA et les cultures sous serres", INRA, France, (1985), 100 -190.
- [8] A. MUSY, M. SOUTTER. "Physique du sol". France (199).
- [9] A. NISEN et AL. " Considérations pratiques sur la transmission du rayonnement solaire et de la chaleur pour les matériaux utilisée en serre". (1986), IRSIA, p. 94.
- [10] A. C.WIRTZ, M. DOKTER, C. HOFMANN, E.J .J.GROENEN. "Spin coated polyethylene films for single-molecule optics". Chemical Physics, (2006), Letters 417.
- [11] Andrea AVANZINI. "Mechanical characterization and finite element modeling of ultra high molecular weight polyethylene" . (2007).
- [12] J. M.HAUDIN. "Introduction à la mécanique des polymères". Nancy, (1995).
- [13] T. K.KANG, C. S.HA. "Effect of processing variables on the cross linking of HDPE by peroxide". Polymer testing,(2000).
- [14] N. HASSINI. "Contributions aux études de l'énergétique des serres et du vieillissement du polyéthylène utilise en plasticulture". Thèse de magister, Université d'Oran, (1992).
- [15] Pierre Henri COMMUNAY. Héliothermique : " Le gisement solaire Méthode et calcule ". (2002), ISBN : 2.
- [16] Robert BRUN. "Les plastiques en agriculture". (1992).
- [17] T. BOULARD, M. LAMRANI. "Characterization and modeling of the air fluxes induced by natural ventilation in a greenhouse" . Journal of agricultural Engineering Research, (1999), 74: 135-144.

- 
- [18] A. NISEN. "L'éclairage naturel des serres". Presse Agronomique, Gembloux (1969).
- [19] A. NISEN, R. DOGNIAUX. "Traité de l'éclairage des serres". Institut Royal Météorologique, Bruxelles, (1975).
- [20] H. SINOQUET. "Transfer in heterogeneous canopies and intercropping systems. In crop structure and light microclimate, characterization and application". INRA Editions, science update (1993), 229-252.
- [21] G. STANHILL et Al. "The radiation balance of a glasshouse rose crop". Agricultural Meteorology (1973), 11: 385-404.
- [22] M. TCHAMITCHAIN. "Photosynthèse d'une culture de tomate de serre et validation d'un modèle analytique". Thèse de Doctorat, Institut Polytechnique de Toulouse, (1990).
- [23] J. NIJSKENS et Al. "Heat transfer through covering materials of greenhouse". Agricultural and Forest Meteorology. (1984), 33: 193-214.
- [24] C. KITTAS. "Détermination du coefficient global de transmission de chaleur à travers la paroi d'une serre". (1994), 205-221.
- [25] J. DOLTOUR. "Dynamic modeling of heat and mass transfer in greenhouse" . Acta Horticultural (1985), 174: 119-126.
- [26] B. A. KIMBALL. "A modular energy balance program including subroutines for greenhouses and other latent devices". Agricultural research service, (1986).
- [27] Yves JANNOT. "Transferts thermiques". (2002).
- [28] R. HAXAIRE. "Caractérisation et modélisation des écoulements d'air dans une serre". Thèse de Doctorat, Université de Nice Sophia Antipolis, (1999).
- [29] A. KINDELAN et C. KITTAS. "Dynamic modeling of greenhouse environment" . Transaction of the ASAE, (1980), 5: 1232-1239.
- [30] J. P. HOLMAN. "Heat Transfer" .Sixth edition. Singapore. McGraw Hill International Editions, (1986).
- [31] J. L. MONTEITH, M. H. UNSWORTH. "Principles of Environmental Physics" . 2<sup>nd</sup> ed. Edward Arnold, London, (1990).
- [32] S. ZHU, J. DELTOUR, S. WANG. "Modeling the thermal characteristics of greenhouse pond systems" . Aqua cultural Engineering, (1998), 18:201–217.
- [33] K. V. GARZOLI, J. BLACKWELL. "An Analysis of the Nocturnal Heat Loss from a Single Skin Plastic Greenhouse" . Journal of Agricultural, (1981), 26: 203-214.
- [34] J. DUFFIE, A. BECKMAN. "Solar engineering and thermal processes". (1980): 890-900.

- 
- [35] J. M.CAMASSERIAUX. "Conversion thermique du rayonnement solaire". Paris (1984).
- [36] Y. CORMARY, C. NIKOLAS. " La thermique des serres". Collection de la direction des études et Recherches en France, (1985).
- [37] Claude BELORME. "Rayonnement solaire utilisable gisement solaire". France, (1987).
- [38] M. CAPDEROU. "Atlas solaire de l'Algérie". Ecole polytechnique d'architecture et d'urbanisme .Tome (1), Volume (1), (1987).
- [39] M. SOUSSI, L. SBITA, M. ANNABI. "Solar energy and environment proceeding". Actes du colloque énergie solaire et environnement Agadir. Maroc, (1996).
- [40] A. M.ABDEL-GHANY, T. KOZAI."Cooling's Efficiency of Fogging Systems for Greenhouses ". Laboratory of Environmental Control Engineering, Department of Bio-production Science .Bio-systems Engineering, (2006), 94 (1): 97–109.
- [41] G. PAPADAKIS, A. FRANGOUDAKIS, S. KYRITSIS. "Mixed, forced and free convection heat transfer at the greenhouse cover". Journal of Agricultural Engineering Research, (1992), 51: 191–205.
- [42] Bernard EYGLUNENT. "Manuel de thermique" .Ingénieur INPC, France, (2000).
- [43] C. STANGHELLINI. "Mixed convection above greenhouse crops canopies". Agricultural and Forest Meteorology, (1993), 66: 111–117.
- [44] J.P.CHIAPALE. "Les serres. Bilan radiatif". Les bases de la Bioclimatologie. INRA, Paris, (1984), p. 21-23.
- [45] C. KITTAS. " Contribution théorique et expérimentale à l'étude du bilan d'énergie des serres". Thèse de Docteur Ingénieur, Université de Perpignan, (1980).
- [46] F.KREITH. "Transmission de la chaleur et Thermodynamique". Masson et Cie, Editeurs, Paris, (1967), p 654.
- [47] B. A.KIMBALL. "Simulation of the energy balances a greenhouse". Agricultural Meteorology, (1973), 11: 243-260.
- [48] M. DAGUENET. "Séchoirs solaires". Unesco Paris, (1985).
- [49] Mohammed Hassan SELLAMI. " Utilisation de l'énergie solaire pour la déminéralisation des eaux saumâtre dans le sud Algérien". Ouargla, (2000).
- [50] M. A.LEFKI, K. ACHOUR, R. LAKHDAR. "Application des plastiques dans l'agriculture Algérienne". Plasticulture n°75, (1987).
- [51] P. BROCHET, R. DURAND, N. GERBIER. "Recueil de données agro-météorologiques : somme de températures". Météorologie Nationale, Paris, (1976).
-

---

[52] T. BOULARD A. BAILLE. "A simple greenhouse climate models incorporating effects of aeration and evaporative cooling". Agricultural and Forest Meteorology, (1993), p. 65.

[53] V. POLLET I, G. PETERS J. "Condensation and radiation transmittance of greenhouse cladding materials" .

Part 2: "Result for a complete condensation cycle". Journal of Agricultural Engineering Research, vol.75, (2000) , 65-72 .

[54] ANONYME. "Plan de développement et d'aménagement de la Wilaya de Ouargla". Sous direction de la planification et de l'aménagement du territoire, direction des services agricoles de Ouargla, (1995), 90 pp.

---

# *Annexe:*

**Annexe :**

**Tableau 1: Evolutions des températures maximales en (°C)  
sous serre à Ouargla 2008.**

Ouargla Jours	Max. Tint (Juin)	Max. Tint (Juillet)	Max. Tint (août)	Max. Tint (septembre)	Max. Tint (Octobre)	Max. Tint (novembre)
1	55	46	48	47	34	29
2	45	45	49	47	36	33
3	46	48	48	48	40	28
4	50	49	48	50	36	31
5	48	52	51	48	36	32
6	50	53	51	50	38	28
7	50	54	48	48	38	26
8	49	55	49	50	38	27
9	47	55	50	48	36	28
10	45	55	52	48	37	27
11	47	56	53	47	37	28
12	48	56	51	48	38	30
13	48	54	54	47	36	31
14	49	52	53	42	37	26
15	52	49	53	39	38	27
16	55	46	49	43	36	28
17	61	51	48	48	36	27
18	57	52	51	44	38	28
19	51	53	51	44	37	28
20	51	50	51	43	36	29
21	50	50	52	42	36	27
22	49	52	49	46	34	29
23	51	46	50	46	33	24
24	52	47	49	42	31	27
25	54	49	47	41	41	29
26	55	51	46	40	37	30
27	54	52	44	37	38	29
28	51	50	45	37	37	25
29	49	49	46	34	37	25
30	50	50	47	31	29	26
31	---	48	47	---	26	---

**Tableau 2: Evolutions des températures maximales en (°C)  
sous serre à Ouargla 2008 / 2009.**

Ouargla Jours	Max. Tint (décembre)	Max. Tint (janvier)	Max. Tint (février)	Max. Tint (mars)	Max. Tint (avril)	Max. Tint (mai)
1	28	19	20	---	50	49
2	29	23	18	---	43	47
3	28	18	24	---	43	51
4	27	24	21	---	46	49
5	27	17	23	---	42	51
6	30	23	28	---	46	51
7	31	18	24	---	46	---
8	15	26	24	---	46	---
9	15	19	24	---	48	---
10	25	23	28	---	51	---
11	25	23	23	---	52	---
12	25	11	26	---	51	---
13	24	9	22	---	52	---
14	25	21	26	---	45	---
15	25	24	27	---	45	---
16	27	25	25	---	50	---
17	28	20	19	---	52	---
18	24	23	27	---	55	---
19	29	23	28	41	45	---
20	23	15	30	37	55	---
21	24	18	30	32	51	---
22	24	24	23	39	53	---
23	23	28	28	36	50	---
24	25	27	27	39	37	---
25	24	22	25	43	23	---
26	25	16	29	43	49	---
27	22	24	29	47	53	---
28	20	25	30	40	48	---
29	23	25	---	51	46	---
30	21	26	---	49	49	---
31	25	23	---	55	---	---

**Tableau 3: Evolutions des températures maximales en (°C)  
extérieure à Ouargla 2008.**

Ouargla	Max. T ext	Max. T ext	Max.Text	Max. T ext	Max. T ext	Max. T ext
Jours	(Juin)	(Juillet)	(août)	(septembre)	(Octobre)	(novembre)
1	43	40	43	42	28	23,5
2	34	40	43	41	30	27,1
3	35	43	42	42	34	23,9
4	38	44	42	45	31	24,5
5	36	46	44	42	29	24
6	38	46	45	43	31	20,7
7	38	48	42	42	32	20,2
8	37	47	43	44	32	21,6
9	35	46	44	43	30	23
10	34	47	46	42	31	22,3
11	35	48	46	42	30	22
12	37	49	47	44	31	22,7
13	38	48	49	41	30	24
14	37	46	47	37	30	20
15	40	41	47	32	31	20,2
16	43	40	43	37	29	21,5
17	48	44	42	42	30	21,4
18	45	46	46	39	32	22
19	40	47	45	39	30	21,6
20	40	46	45	37	30	22,3
21	37	44	45	35	30	21,3
22	38	46	43	40	28	23,5
23	39	40	44	40	26	19,6
24	40	41	44	36	25	21,6
25	42	44	41	35	34	23
26	44	46	39	35	32	23
27	43	44	38	31	31	24,3
28	39	43	39	28	30	19,3
29	37	43	40	28	31	19,3
30	39	43	41	24	23	20,4
31	---	43	42	---	19	---

**Tableau 4: Evolutions des températures minimales (en °C)  
sous serre à Ouargla 2008.**

Ouargla	Min. Tint (Juin)	Min. Tint (Juillet)	Min. Tint (août)	Min. Tint (septembre)	Min. Tint (Octobre)	Min. Tint (novembre)
Jours						
1	29	26	30	29	19	14
2	28	26	31	28	18	13
3	22	29	31	27	19	15
4	26	30	28	26	20	15
5	27	29	29	26	17	11
6	26	30	28	25	17	12
7	29	30	29	25	18	10
8	28	31	25	30	18	9
9	24	30	28	29	19	12
10	24	31	28	28	22	13
11	26	31	27	27	22	11
12	26	32	30	25	23	11
13	25	38	31	29	21	14
14	26	35	32	27	20	10
15	30	30	33	21	22	7
16	29	31	33	19	23	9
17	31	30	30	27	17	10
18	31	31	31	30	17	12
19	32	33	32	25	16	9
20	29	31	31	26	18	10
21	30	31	34	24	18	10
22	27	32	32	28	20	10
23	27	30	30	28	17	14
24	30	30	30	25	19	11
25	29	28	29	24	21	11
26	30	30	29	23	23	9
27	31	33	27	20	21	13
28	30	31	26	19	23	11
29	29	30	27	19	19	8
30	28	31	28	19	12	7
31	---	32	27	---	11	---

**Tableau 5: Evolutions des températures minimales (en °C)  
sous serre à Ouargla 2008 /2009.**

Ouargla	Min. Tint	Min. Tint	Min. Tint	Min. Tint	Min. Tint	Min. Tint
Jours	(décembre)	(janvier)	(février)	(mars)	(avril)	(mai)
1	8	4	11	---	11	12
2	9	7	12	---	10	20
3	6	7	8	---	14	22
4	4	7	7	---	11	17
5	7	7	10	---	11	15
6	12	8	13	---	10	14
7	11	9	12	---	12	---
8	11	9	8	---	14	---
9	15	5	6	---	15	---
10	13	8	7	---	14	---
11	9	9	8	---	20	---
12	7	9	6	---	23	---
13	7	9	7	---	15	---
14	7	9	6	---	14	---
15	7	8	6	---	12	---
16	10	8	5	---	15	---
17	10	7	4	---	16	---
18	9	8	3	---	18	---
19	7	9	4	10	17	---
20	9	10	6	8	16	---
21	7	7	7	5	17	---
22	7	7	6	5	17	---
23	7	11	5	3	18	---
24	5	15	5	3	17	---
25	12	13	6	9	16	---
26	9	10	4	12	15	---
27	6	9	4	10	16	---
28	10	10	6	11	17	---
29	7	12	---	11	17	---
30	6	11	---	11	16	---
31	7	12	---	8	---	---

**Tableau 6: Evolutions des températures minimales (en °C)  
extérieure à Ouargla 2008.**

Ouargla	Min. T ext (Juin)	Min. T ext (Juillet)	Min.Text (août)	Min. T ext (septembre)	Min. T ext (Octobre)	Min. T ext (novembre)
Jours						
1	26	25	28	26	19	12
2	24	26	29	27	18	12,1
3	19	27	28	25	19	14,6
4	23	29	27	25	20	14
5	23	29	27	24	17	10
6	23	30	27	24	17	11,6
7	26	28	27	23	18	8,9
8	24	29	24	27	18	8,1
9	21	29	26	28	20	11
10	21	29	27	26	22	12,6
11	23	29	26	25	23	9,6
12	23	32	28	22	22	10,3
13	23	36	29	27	22	11,6
14	24	34	30	24	19	9,1
15	26	29	31	18	21	5,5
16	26	30	30	18	22	7,5
17	27	29	28	24	18	8,8
18	28	32	29	25	17	10,8
19	28	31	31	21	17	8
20	26	31	30	22	19	10,2
21	26	31	32	22	19	8,9
22	24	32	30	25	19	7,8
23	24	29	28	26	17	12,4
24	26	28	29	20	19	9
25	25	27	26	21	21	10
26	26	31	27	21	23	8
27	27	28	25	18	22	11,5
28	27	31	25	17	23	9
29	26	29	25	16	19	5,4
30	24	29	27	16	12	5,4
31	---	30	26	---	11	---

**Tableau 7: Evolutions des humidités maximales (en%)  
sous serre à Ouargla 2008.**

Ouargla	Max. U int	Max. U int	Max. U int	Max. U int	Max. U int	Max. U int
Jours	(Juin)	(Juillet)	(août)	(septembre)	(Octobre)	(novembre)
1	---	54	66	75	95	---
2	---	52	61	74	92	---
3	---	55	58	77	77	---
4	---	56	80	78	81	---
5	---	54	55	77	73	---
6	---	53	53	75	88	---
7	---	54	59	76	81	---
8	---	61	51	78	85	---
9	---	77	56	97	83	---
10	---	88	54	92	91	---
11	---	81	62	91	85	---
12	---	79	75	88	90	---
13	---	61	51	74	68	---
14	---	69	45	82	74	---
15	---	55	57	71	62	---
16	---	58	78	72	63	---
17	---	81	74	87	85	---
18	---	80	65	85	86	---
19	---	79	56	79	84	---
20	---	86	65	90	89	---
21	---	84	63	91	89	---
22	---	82	54	88	88	---
23	---	86	61	91	89	---
24	---	86	71	90	91	---
25	---	91	62	96	95	---
26	---	80	82	82	83	---
27	---	64	87	79	71	---
28	---	66	79	96	70	---
29	---	76	75	93	82	---
30	---	69	65	96	75	---
31	---	96	67	---	97	---

**Tableau 8: Evolutions des humidités maximales (en%)  
sous serre à Ouargla 2008 / 2009.**

Ouargla	Max. U int (décembre)	Max. U int (janvier)	Max. U int (février)	Max. U int (mars)	Max. U int (avril)	Max. U int (mai)
Jours						
1	72	95	85	---	75	80
2	70	95	85	---	77	40
3	74	98	88	---	74	32
4	91	98	89	---	81	43
5	94	98	89	---	81	49
6	94	91	89	---	84	67
7	95	95	84	---	80	---
8	97	89	85	---	75	---
9	97	93	81	---	74	---
10	98	90	80	---	80	---
11	98	89	78	---	31	---
12	97	98	76	---	65	---
13	99	99	80	---	85	---
14	98	99	77	---	85	---
15	99	94	81	---	81	---
16	96	93	76	---	71	---
17	97	95	76	---	68	---
18	98	94	69	---	65	---
19	98	96	74	---	64	---
20	97	97	70	65	68	---
21	99	97	71	86	66	---
22	96	97	76	85	74	---
23	94	95	81	88	75	---
24	95	93	74	73	86	---
25	94	94	78	64	86	---
26	94	88	66	66	86	---
27	94	86	69	76	84	---
28	94	89	71	85	84	---
29	93	89	---	85	84	---
30	95	90	---	84	72	---
31	94	92	---	85	---	---

**Tableau 9: Evolutions des humidités maximales (en%)  
extérieure à Ouargla 2008.**

Ouargla	Max.U ext	Max.U ext	Max.U ext	Max. U ext	Max.U ext	Max. U ext
Jours	(Juin)	(Juillet)	(août)	(septembre)	(Octobre)	(novembre)
1	---	---	45	38	90	96
2	---	---	41	45	89	95
3	---	---	39	57	71	95
4	---	---	38	46	77	92
5	---	---	36	43	68	95
6	---	---	35	36	84	84
7	---	---	39	59	77	90
8	---	---	36	42	80	94
9	---	---	36	34	77	96
10	---	---	31	30	88	91
11	---	---	41	32	81	88
12	---	---	51	40	79	89
13	---	---	29	34	61	89
14	---	---	29	58	69	75
15	---	---	36	51	55	79
16	---	---	58	41	58	82
17	---	---	51	31	81	86
18	---	---	43	46	80	82
19	---	---	35	75	79	86
20	---	---	44	58	86	79
21	---	---	43	62	84	88
22	---	---	30	52	82	90
23	---	---	40	50	86	84
24	---	---	49	64	86	92
25	---	---	41	50	91	76
26	---	---	60	50	80	83
27	---	---	67	64	64	62
28	---	---	58	93	66	71
29	---	---	52	88	76	72
30	---	---	47	94	69	73
31	---	---	47	---	96	---

**Tableau 10: Evolutions des humidités minimales (en%)  
sous serre à Ouargla 2008.**

Ouargla	Min. U int	Min. U int	Min. U int	Min. U int	Min. U int	Min. U int
Jours	(Juin)	(Juillet)	(août)	(septembre)	(Octobre)	(novembre)
1	---	33	33	53	63	---
2	---	30	35	51	53	---
3	---	30	31	52	39	---
4	---	29	32	50	42	---
5	---	28	30	49	53	---
6	---	30	35	48	48	---
7	---	31	27	48	55	---
8	---	30	29	49	50	---
9	---	41	35	74	48	---
10	---	49	36	67	59	---
11	---	45	37	63	58	---
12	---	44	29	65	59	---
13	---	36	32	56	46	---
14	---	33	34	53	41	---
15	---	31	31	49	42	---
16	---	38	38	50	49	---
17	---	44	41	57	57	---
18	---	37	39	47	50	---
19	---	42	35	51	50	---
20	---	52	40	63	62	---
21	---	50	36	65	61	---
22	---	53	34	67	57	---
23	---	54	37	69	67	---
24	---	62	35	75	69	---
25	---	35	33	55	46	---
26	---	42	41	58	52	---
27	---	35	38	55	44	---
28	---	45	36	65	55	---
29	---	35	41	59	47	---
30	---	29	34	72	37	---
31	---	34	39	---	39	---

**Tableau 11 : Evolutions des humidités minimales (en%)  
sous serre à Ouargla 2008 / 2009.**

Ouargla Jours	Min. U int (décembre)	Min. U int (janvier)	Min. U int (février)	Min. U int (mars)	Min. U int (avril)	Min. U int (mai)
1	30	81	65	---	21	17
2	29	75	72	---	21	15
3	49	89	76	---	18	12
4	44	90	60	---	24	17
5	70	76	65	---	24	27
6	72	84	65	---	18	23
7	76	66	71	---	22	---
8	95	79	74	---	27	---
9	97	74	69	---	25	---
10	79	81	64	---	17	---
11	80	85	56	---	19	---
12	79	89	60	---	32	---
13	80	98	56	---	30	---
14	91	80	58	---	25	---
15	84	63	61	---	23	---
16	77	81	59	---	23	---
17	83	80	51	---	24	---
18	75	79	50	---	25	---
19	76	93	50	---	31	---
20	79	96	54	31	26	---
21	79	97	54	27	27	---
22	81	90	47	30	29	---
23	80	90	51	19	28	---
24	80	89	46	23	45	---
25	77	75	44	23	75	---
26	79	72	44	17	31	---
27	74	75	50	23	28	---
28	60	76	48	28	28	---
29	81	80	---	31	24	---
30	80	82	---	25	24	---
31	79	65	---	26	---	---

**Tableau 12 : Evolutions des humidités minimales (en%)  
extérieure à Ouargla 2008.**

Ouargla	Min. U ext	Min. U ext	Min. U ext	Min. U ext	Min. U ext	Min. U ext
Jours	(Juin)	(Juillet)	(août)	(septembre)	(Octobre)	(novembre)
1	---	---	22	26	48	57
2	---	---	22	27	41	38
3	---	---	19	26	25	58
4	---	---	19	16	32	40
5	---	---	21	21	41	36
6	---	---	19	24	35	47
7	---	---	16	24	41	51
8	---	---	17	20	36	43
9	---	---	18	23	41	50
10	---	---	18	11	49	53
11	---	---	16	16	45	45
12	---	---	14	16	44	50
13	---	---	15	15	36	29
14	---	---	20	25	33	36
15	---	---	17	27	31	28
16	---	---	20	20	38	38
17	---	---	26	18	44	41
18	---	---	25	18	37	43
19	---	---	18	26	42	39
20	---	---	21	31	52	41
21	---	---	20	36	50	38
22	---	---	19	28	53	31
23	---	---	21	21	54	42
24	---	---	20	30	62	30
25	---	---	21	27	35	28
26	---	---	30	29	42	26
27	---	---	23	40	35	26
28	---	---	23	51	45	37
29	---	---	24	54	35	29
30	---	---	23	68	29	25
31	---	---	24	---	34	---

**Tableau 13 : Evolutions des températures maximales (en °C)  
extérieure à Oran 2008.**

Oran Jours	Max. T ext (Juin)	Max. T ext (Juillet)	Max. T ext (août)	Max. T ext (septembre)	Max. T ext (Octobre)	Max. T ext (novembre)
1	32,83	34,56	42,38	38,49	34,94	32,49
2	32,03	38,02	40,1	36,44	34,27	33,73
3	36,37	38,62	36,84	35,45	33,35	33,38
4	34,91	43,08	38,1	35,52	34,14	33,33
5	33,53	37,56	38,02	38,82	36,35	35,61
6	31,59	36,08	36,89	36,57	35,91	35,66
7	30,47	34,87	36,45	36,07	37,74	33,04
8	31,61	35,52	36,75	38,03	38,05	32,72
9	32,62	37,27	38,43	33,47	36,55	32,95
10	34,11	34,4	37,2	34,15	36,97	32,47
11	35,2	36,89	42,04	34,48	36,71	33,16
12	35,15	39,77	41	37,91	32,35	32,44
13	35,1	35,1	39,89	36,99	35,98	31,34
14	37,97	36,12	37,43	37,71	31,76	27,49
15	36,54	35,55	39	39,16	31,96	27,64
16	33,94	35,29	39,04	35,27	35,41	28,79
17	36,03	41,32	39,54	35,55	33,89	28,96
18	34,97	41,85	34,17	36,36	35,76	33,37
19	37,98	40,91	36,39	34,79	33,63	33,27
20	34,35	39,81	37,77	37,26	35,68	30,51
21	33,59	37,88	36,72	34,35	32,5	27,45
22	35,11	37,94	39,16	34,26	34,46	23,02
23	35,67	41,29	37,86	36,29	33,99	22,97
24	35,97	39,91	37,32	36,15	31,16	26,99
25	38,11	35,72	39,68	40,61	25,91	19,83
26	34,3	37,25	43,16	39,23	31,29	15,59
27	32,7	37,3	43,42	38,39	31,36	23,52
28	26,7	37,47	42,35	38,84	30,91	20,73
29	31,71	38,1	42,82	36,54	18,71	24,84
30	33,94	37,02	40,75	39,55	33,34	31,94
31	---	38,17	35,77	---	28,75	---

**Tableau 14 : Evolutions des températures minimales (en °C)  
extérieure à Oran 2008.**

Oran Jours	Min. T ext (Juin)	Min. T ext (Juillet)	Min. T ext (août)	Min. T ext (septembre)	Min. T ext (Octobre)	Min. T ext (novembre)
1	17,67	22,38	20,7	21,92	18,07	10,47
2	15,87	20,49	21,9	21,51	23,07	12,43
3	14,32	17,67	25,16	22,27	19,3	11,59
4	15,84	18,04	24,82	20,99	17,22	13,01
5	17,93	22,25	23,37	21,08	16,81	11,44
6	19,78	20,68	21,32	20,91	17,22	12,56
7	19,81	22,4	19,38	18,34	16,36	11,98
8	19,05	22,89	21,02	17,22	17,8	10,63
9	19,73	21,1	21,33	19,67	17,84	7,73
10	18,84	22,36	23,95	21,77	17,4	11,87
11	16,93	20,96	21,39	22,41	16,37	9,45
12	17,63	23,27	21,68	22,49	15,64	8,76
13	18,69	21,85	23,07	23,1	15,31	12,28
14	18,34	22,44	21,02	21,75	17,81	11,48
15	20,02	23,02	19,5	21,07	17,16	9,57
16	20,19	22,97	21,3	20,71	18,38	8,18
17	18,26	22,01	22,8	22,42	17,94	4,79
18	19,41	19,8	24,26	21,04	16,8	5,57
19	19,5	20,8	24,36	21,38	17,71	9,13
20	20,11	21,98	23,44	22,68	15,74	11,29
21	18,7	20,23	21,5	22,14	14,54	14,21
22	18,21	20,27	23,04	19,15	13,42	13,46
23	20,78	18,54	20,99	18,14	14,71	10,73
24	22,49	19,81	23,17	18,19	16,46	8,09
25	20,59	23,04	24,17	18,85	14,58	13,61
26	19,78	24,07	24,28	18,85	15,59	12,34
27	17,03	23,74	21,97	19,04	11,75	12,36
28	21,79	23,7	18,91	18,69	16,38	10,81
29	21,09	23,34	21,14	20,15	16,14	10,19
30	21,87	23,51	21,49	17,61	13,85	8,52
31	---	24,12	19,54	---	12,16	---

**Tableau 15 : Evolutions des humidités maximales (en%)  
extérieure à Oran 2008.**

Oran Jours	Max. Uext (Juin)	Max. Uext (Juillet)	Max. Uext (août)	Max. U ext (septembre)	Max. Uext (Octobre)	Max. Uext (novembre)
1	91,8	90,03	88,43	91,45	90,35	94,95
2	92,3	86,33	93,03	91,78	88,15	93,38
3	89,15	89,98	90,28	90,45	92,77	94
4	87,5	86,73	90,05	90,78	94,03	94,57
5	89,9	90,85	91,35	92,23	91,12	95,47
6	91,17	90,45	91,03	80,2	90,37	92,95
7	92	91,42	87,72	85,33	90,43	94,53
8	93,13	92,6	88,67	87,05	92,33	95,43
9	90,5	93,22	89,1	90,28	91,4	93,82
10	86,02	91,92	89,93	91,28	94,1	95,62
11	83,38	93,03	90,35	88,72	93,35	93,55
12	85,7	78,8	65,12	88,67	90	94,23
13	88,43	92,08	81,23	89,33	88,37	93,78
14	84,03	94,82	83,78	90,15	90,02	94,55
15	81,52	93,73	84,53	90,5	93,82	96,15
16	81,7	93,37	89,57	91,65	90,82	95,03
17	86,43	92,15	90,37	90,33	93,03	86,67
18	84,02	86,13	89,28	89,03	90,98	87,37
19	84,83	76,42	89,93	90,17	89,22	88,88
20	75,13	65,45	89,35	91,33	88,1	83,6
21	80,37	72,4	87,6	93,75	91,62	90,37
22	87,18	72,5	90,18	92,28	91,87	92,02
23	91,18	81,97	84,33	91,3	81,48	94,02
24	91,13	92,15	90,88	89,03	90,67	94,97
25	92,43	92,83	92,7	92,78	92,92	92,78
26	88,13	90,3	89,88	93,9	94,02	97,55
27	89,9	89,7	79,35	90,8	91,35	97,53
28	91,58	90,22	76,67	90,18	90,72	97,23
29	92,32	90,98	88,93	89,68	95,12	98,07
30	93,28	89,5	67,18	88,63	96,12	98,77
31	---	88,98	87,37	---	90,82	---

**Tableau 16 : Evolutions des humidités minimales (en%)  
extérieure à Oran 2008.**

Oran Jours	Min. U ext (Juin)	Min. U ext (Juillet)	Min. U ext (août)	Min. U ext (septembre)	Min. U ext (Octobre)	Min. U ext (novembre)
1	38,92	44,65	25,78	31,38	41,35	33,26
2	33,78	30,5	34	37,9	45,98	31,4
3	26,97	29,72	44,76	41,7	41,38	31,16
4	31,2	18,8	42,06	38,86	37,46	30,96
5	33,38	39,42	41,36	24,71	35,93	30,51
6	50,13	39,37	38,58	26,28	34,96	28,36
7	53,88	47,85	37,26	29,51	28,2	32,78
8	50	44,95	40,38	30,33	34,58	35,36
9	48,75	42,57	38,73	43,58	32,36	32,88
10	37,3	47,97	41	43,68	32,08	34,15
11	31,63	30,9	22,6	42,81	27,58	36,03
12	33,03	23,56	21,55	35,78	34,86	33,68
13	27,92	46,55	28,58	39,65	28,51	35,91
14	23,32	43,45	27,8	34,03	36,43	49,15
15	34,88	46,28	26,95	33,11	44,3	41,73
16	44,45	45,61	30,51	42,8	29,96	31,15
17	33,08	23,58	35,43	40,5	39,93	21,55
18	41,4	18,45	53,5	31,4	34,13	17,86
19	29,57	20,93	45,13	44	39,98	24,91
20	31,98	21,95	41,96	40,25	30,2	34,38
21	38,15	29,11	40,73	36,55	37,25	40,38
22	34,63	24,63	30,78	40,4	31,26	65,68
23	45,48	17,41	33,13	30,63	27,85	46,05
24	46,55	26,26	38,23	36,55	28,71	35,7
25	35,23	45,76	36,9	25,11	51,55	63,7
26	39,5	40,53	24,91	29,23	40,71	86,4
27	47,48	39,45	16,25	31,43	39,41	55,81
28	71,45	39,38	22,11	22,03	39,21	65,9
29	55,47	40,13	19,75	36,46	74,56	50,5
30	49,47	43,95	25,83	23,66	36,98	33,48
31	---	38,65	39,75	---	34,8	---

**Tableau 17 : Evolutions des températures minimales (en °C)  
sous serre à Oran 2008.**

Oran Jours	Min. T int (décembre)	Min. T int (janvier)	Min. T int (février)	Min. T int (mars)	Min. T int (avril)	Min. T int (mai)
1	---	8,1	11,2	---	16,5	16,8
2	---	8,7	7,5	---	10	15,7
3	---	8,2	7,7	---	10,8	16,2
4	---	8,8	8,8	---	8	11
5	---	11,1	9,9	---	13,1	18,5
6	---	3,5	11,4	---	14,2	13,9
7	---	2,9	8,2	---	11,4	---
8	---	4,3	7,6	---	11	---
9	---	4	9,2	---	12,6	---
10	---	5,4	7,8	---	12,4	---
11	---	6,4	11,6	---	7,4	---
12	---	9	11,1	---	6,8	---
13	---	8,4	12	---	8,5	---
14	---	11,4	7,6	---	13,8	---
15	---	10,7	6,5	---	11	---
16	---	5,9	5,6	---	11,7	---
17	---	9,3	6,6	---	11,1	---
18	---	8,9	10,1	---	13,4	---
19	---	6,4	11,2	13,17	10,9	---
20	---	4,5	9,7	13,14	10,9	---
21	---	5	12	8,38	12,7	---
22	---	5,4	9,8	8,62	14	---
23	---	6	9,1	10,54	11	---
24	---	4	12,2	12,72	9,2	---
25	---	9,2	12,5	14,69	12,4	---
26	---	9,4	9,5	8,86	11,2	---
27	---	6,6	9,4	6,71	16,2	---
28	---	12,1	9,8	5,91	16,5	---
29	---	8,8	---	6,16	18,2	---
30	---	8	---	12,14	15,1	---
31	---	9,8	---	12,8	---	---

**Tableau 18 : Evolutions des températures maximales (en °C)  
sous serre à Oran 2008 / 2008.**

Oran Jours	Max. T int (décembre)	Max. T int (janvier)	Max. T int (février)	Max. T int (mars)	Max. T int (avril)	Max. T int (mai)
1	---	27	31,9	---	41,2	42,9
2	---	30,8	30,4	---	36,2	39,8
3	---	33	35,2	---	38,7	40,4
4	---	19,6	35	---	38,5	42,7
5	---	23	34	---	41,2	42,7
6	---	29	38,2	---	41,2	40,8
7	---	31,9	33,7	---	41,7	---
8	---	31	34,7	---	40,8	---
9	---	30	35,5	---	44,7	---
10	---	32,2	36,8	---	37	---
11	---	32,9	35,8	---	39,4	---
12	---	33	33	---	41,7	---
13	---	27,8	34,6	---	43,5	---
14	---	31	37,8	---	43,6	---
15	---	30,1	37,4	---	41,2	---
16	---	29,8	39,7	---	45,2	---
17	---	31,7	37,9	---	44,4	---
18	---	33	35,4	---	42,6	---
19	---	27,4	32,6	37,2	44,3	---
20	---	24,1	35,6	36	45	---
21	---	27	33,9	37,3	42,8	---
22	---	28	34,7	37,2	41,8	---
23	---	30,8	36,7	38,7	43,5	---
24	---	28	35,2	36,7	41,4	---
25	---	30,4	36,2	38,2	42,9	---
26	---	32,3	36,6	39,9	45	---
27	---	31,6	39,4	41	44,7	---
28	---	39,6	35,3	40	44	---
29	---	32,2	---	38	49,6	---
30	---	31	---	37	45,1	---
31	---	34,4	---	38	---	---

**Tableau 19 : Evolutions des humidités minimales (en%)  
sous serre à Oran 2008 / 2008.**

Oran Jours	Min. U int (décembre)	Min. U int (janvier)	Min. U int (février)	Min. U int (mars)	Min. U int (avril)	Min. U int (mai)
1	---	63	67	---	81	68
2	---	61	70	---	58	70
3	---	81	73	---	57	63
4	---	87	75	---	63	68
5	---	82	69	---	60	68
6	---	66	73	---	55	68
7	---	74	80	---	62	---
8	---	85	74	---	63	---
9	---	80	74	---	65	---
10	---	82	78	---	72	---
11	---	76	72	---	58	---
12	---	85	64	---	63	---
13	---	90	65	---	60	---
14	---	89	68	---	61	---
15	---	84	69	---	45	---
16	---	81	67	---	62	---
17	---	82	71	---	65	---
18	---	82	78	---	63	---
19	---	91	74	74	60	---
20	---	91	73	73	60	---
21	---	79	74	70	58	---
22	---	70	72	66	57	---
23	---	71	76	69	64	---
24	---	71	75	68	62	---
25	---	72	74	68	63	---
26	---	74	71	68	67	---
27	---	70	71	64	54	---
28	---	81	70	66	63	---
29	---	68	---	60	65	---
30	---	68	---	57	66	---
31	---	70	---	61	---	---

**Tableau 20 : Evolutions des humidités maximales (en%)  
sous serre à Oran 2008 / 2008.**

Oran Jours	Max. U int (décembre)	Max. U int (janvier)	Max. U int (février)	Max. U int (mars)	Max. U int (avril)	Max. U int (mai)
1	---	92	96	---	92	94
2	---	93	95	---	93	92
3	---	92	95	---	91	91
4	---	95	94	---	90	91
5	---	98	93	---	90	91
6	---	100	96	---	90	93
7	---	100	93	---	89	---
8	---	100	98	---	89	---
9	---	100	96	---	91	---
10	---	100	95	---	90	---
11	---	100	96	---	94	---
12	---	100	93	---	90	---
13	---	100	91	---	88	---
14	---	100	94	---	90	---
15	---	100	92	---	90	---
16	---	100	95	---	88	---
17	---	100	95	---	89	---
18	---	100	93	---	90	---
19	---	100	98	96	89	---
20	---	100	95	94	89	---
21	---	100	96	95	91	---
22	---	93	97	92	88	---
23	---	92	95	92	89	---
24	---	97	96	94	91	---
25	---	95	98	93	90	---
26	---	96	95	93	89	---
27	---	95	95	92	87	---
28	---	91	95	92	91	---
29	---	97	---	93	89	---
30	---	95	---	92	92	---
31	---	95	---	94	---	---

**Tableau 21 : Evolutions des températures (en °C) et humidités relative de l'air (en %) sous serre à Ouargla (23mars et 16 avril) 2009.**

Jours	23 mars 2009		16 avril 2009	
	T intérieure	U intérieure	U intérieure	T intérieure
1heurs	5	86	61	17
2	4	87	64	16
3	4	88	66	16
4	3	87	69	15
5	3	86	70	18
6	3	86	71	21
7	10	80	65	23
8	17	65	60	25
9	20	50	50	28
10	26	37	40	35
11	32	25	29	45
12	34	24	28	47
13	36	22	25	48
14	31	20	24	50
15	33	19	23	48
16	29	20	23	47
17	26	20	23	42
18	20	24	28	35
19	11	35	45	25
20	9	61	61	23
21	8	70	66	21
22	7	67	61	21
23	7	67	60	20
24h	6	66	61	19

**Tableau 22: Evolutions des températures (en °C) et humidités relative de l'air  
(en %) sous serre diurne et nocturne de 23 mars 2009 à Ouargla.**

Jours	23 mars 2009	
	T intérieure diurne.	U intérieure diurne.
6h	10	80
7h	17	65
8h	20	50
9h	26	37
10h	32	25
11h	34	24
12h	36	22
13h	31	20
14h	33	19
15h	29	20
16h	26	20
17h	20	24

Jours	23 mars 2009	
	T intérieure nocturne.	U intérieure nocturne.
18h	11	35
19h	9	61
20h	8	70
21h	7	67
22h	7	67
23h	6	66
24h	5	86
1h	4	87
2h	4	88
3h	3	87
4h	3	86
5h	3	86

**Tableau 23 : Evolutions des températures (en °C) et humidités relative de l'air (en%)  
à Ouargla (1.2 juillet et 1.2.3 novembre) 2008.**

Jours	1 et 2 Juillet 2008			Jours	1.2.3. novembre 2008	
Temps	U intérieure	T intérieure	T extérieure	Temps	T extérieure	U extérieure
				1h	13	97
1h	48	30	28	4h	13,5	92
4h	51	27	26	7h	12	95
6h	53	26	25	10h	16,5	77
7h	54	30	26	13h	22	64
10h	47	36	34	16h	23	59
13h	33	45	39	19h	19	75
14h	34	46	39	22h	17	86
16h	35	43	40	1h	17	80
19h	40	38	36	4h	14	93
22h	45	35	33	7h	13	93
1h	46	31	30	10h	18	71
4h	50	28	27	13h	25	48
6h	52	26	27	16h	27	39
7h	52	31	28	19h	21	69
10h	49	37	35	22h	18	82
13h	30	45	38	1h	17	81
14h	30	45	39	4h	15	86
16h	31	43	40	7h	15,5	94
19h	36	39	37	10h	18	79
22h	41	34	33	13h	20,5	71
1h	42	34	32	16h	22	69
4h	50	31	29	19h	19	84
				22h	17	90

**Tableau 24 : Evolutions des températures (en °C) et humidités relative de l'air (en %) sous serre à Ouargla (23 et 24 décembre) 2008.**

Jours	23 décembre 2008		24 décembre 2008	
	T intérieure	U intérieure	T intérieure	U intérieure
1h	10	91	7	93
2	9	92	6	94
3	9	93	6	95
4	9	94	6	95
5	9	94	5	95
6	8	94	5	95
7	8	94	5	95
8	14	94	10	95
9	19	91	16	95
10	22	82	21	90
11	23	84	23	85
12	23	80	20	81
13	22	80	25	81
14	21	81	24	82
15	20	82	17	80
16	17	83	16	82
17	15	85	14	84
18	13	86	15	86
19	12	87	15	87
20	10	89	14	88
21	9	90	14	89
22	8	91	14	90
23	8	92	13	91
24h	7	93	13	92

**Tableau 25 : Evolutions des températures moyennes (°C) en juin 2008 aux quatre points d'observation (toiture et au dessous du sol) à Ouargla.**

Juin Jours	Températures au dessous du sol (°C)			T toiture 2,8 m
	100 cm	60 cm	20cm	
1	28	29,5	32	42
2	28	29,5	27	37
3	28,5	29,5	25	35
4	28	29	30	38
5	28,5	29,5	29	38
6	29	30	32	38
7	29	30,5	32	39
8	29	30	29	38
9	28	30,5	29	36
10	28	30,5	29	35
11	28,5	30,5	29	37
12	29	30	29	38
13	29	30	31	38
14	29	30	31	38
15	28,5	30	32	40
16	28,5	30,5	33	40
17	29	30,5	35	45
18	29	30,5	35	43
19	29	30,5	33	39
20	29	30	31	39
21	29	30	31	37
22	29	30	30	38
23	29	30,5	30	36
24	29	31	33	40
25	29,5	31	33	41
26	29,5	31	34	41
27	29,5	31	34	41
28	29	31,5	33	39
29	29	31,5	31	38
30	29,5	31,5	31	38

**Tableau 26 : Evolutions des températures moyennes (°C) en juillet 2008 aux quatre points d'observation (toiture et au dessous du sol) à Ouargla.**

Juillet Jours	Températures au dessous du sol (°C)			T toiture
	100 cm	60 cm	20cm	2,8 m
1	29	30	32	37
2	29,5	30,5	32	37
3	29,5	30,5	34	39
4	30	30,5	35	40
5	29,5	30,5	36	40
6	30	31	37	42
7	29,5	31,5	36	43
8	29,5	30,5	37	41
9	30,5	31,5	38	43
10	30,5	31,5	37	43
11	30,5	31,5	39	44
12	30	31,5	41	43
13	30,5	31,5	40	46
14	30	32	39	44
15	30	31,5	34	40
16	30,5	32	35	39
17	30,5	32	35	41
18	30,5	32	37	43
19	30,5	32	38	44
20	30,5	32	37	42
21	30	32	37	41
22	30	32	38	42
23	29,5	31,5	33	37
24	29,5	31,5	34	38
25	30,5	32	35	39
26	30,5	32	37	41
27	30	32	36	42
28	30,5	32	36	41
29	30,5	32	36	40
30	31	32	35	40
31	31	32	35	39

**Tableau 27 : Evolutions de rayonnement global (en W/m<sup>2</sup>) sous serre 2008.**

Temps (h)	Rg int juin	Rg int juillet	Rg int août	Rg int septembre	Rg int octobre	Rg int novembre
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	14,11	26,45	0	0	0	0
7	106,07	146,53	89,14	48,31	19	0
8	290,33	349,33	307,52	195,21	122,27	54,12
9	417,296	471,98	435,25	351,72	261,47	161,62
10	539,04	572,18	538,34	484,3	384,07	266,03
11	598,37	652,11	602,11	571,51	481,48	366,24
12	641,7	675,36	652,31	625	542,73	402,85
13	678,3	699,81	677,98	639,54	548,75	410,12
14	657,44	669,78	654,75	587,47	483,1	375,16
15	591,63	613,25	589,25	501,2	403,17	285,53
16	451,48	494,53	461,81	369,27	255,62	187,37
17	270,37	325,17	295,08	187,67	151,59	62,63
18	133,07	195,2	154,66	54,14	31,08	15,38
19	47,63	102,23	38,37	25,92	14,36	0
20	10,33	22,31	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0

**Tableau 28 : Evolutions de rayonnement global à l'extérieure de la serre 2008  
(en W/m<sup>2</sup>).**

Temps (h)	Rg ext juin	Rg ext juillet	Rg ext août	Rg ext septembre	Rg ext octobre	Rg ext novembre
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	17,56	32,78	0	0	0	0
7	132,15	180,46	110,84	63,22	24	0
8	355,89	429,49	384,95	242,18	154,07	75,16
9	514,07	573,52	551,71	441,2	339,12	221,43
10	657,66	707,68	671,13	611	495,04	372,07
11	734,93	797,45	750,58	723,45	619,91	488,32
12	778,22	827,71	817,77	789,66	686,87	530,14
13	822,22	863,29	846,16	809,34	692,23	544,8
14	803,81	835	819,45	739,23	629,76	491,24
15	720,22	751,39	735,81	627,95	511,54	378,97
16	548,26	606,39	568,58	466,71	332,48	243,35
17	329,59	402,1	365,97	247,14	161,12	86,93
18	164,7	240,81	186,61	68,56	39,14	21,08
19	59,7	125,23	52,13	33,62	18,1	0
20	12,63	26,35	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0