

**UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA**

**Faculté des Sciences de l'Ingénieur**

Département de Génie Mécanique

## **MEMOIRE DE MAGISTER**

En Génie Mécanique

Option : Energétique

MODELISATION D'UNE SERRE TUNNEL AVEC SYSTEME DE STOCKAGE  
THERMIQUE INSTALLEE A GHARDAÏA

Par

**Salah BEZARI**

Devant le jury composé de :

Y. Benkhadda	Professeur, U. de Blida	Président
A. Bouhdjar	Directeur de Recherche, C.D.E.R., Alger	Rapporteur
M. Belhamel	Directeur de Recherche, C.D.E.R., Alger	Examineur
H. Ben Moussa	Professeur, U. de Batna	Examineur
B. Boumeddane	Maître de conférences, U. de Blida	Examineur

Blida, Avril 2011

ملخص:

تدفئة البيوت البلاستيكية هي الأكثر شيوعا لإستخدام الطاقة الشمسية في الزراعة. ركزنا في دراستنا على تصميم وإنجاز دافنتين فلاحيتين، واحدة مزودة بجهاز تجريبي للتخزين الحراري متمثلا في سرير حجارة والأخرى دافنة عادية (شاهدة)، تم ذلك بوحدة البحث التطبيقي في الطاقات المتجددة غرداية.

يعتمد هذا العمل على دراسة حصيللة الطاقة لهذه الدافنة الفلاحية وكذا التحليل التجريبي للمناخ السائد داخلها، ولا سيما تقييم درجة الحرارة والرطوبة النسبية السائدة داخل الدافنة المجهزة ومقارنتها مع الشاهدة. وتم تحسين نظام الكفاءة من خلال تخزين الحرارة الزائدة خلال النهار التي أحدثتها ظاهرة الاحتباس الحراري داخل البيت البلاستيكي ومن ثمة العودة للتدفئة في الليل. يجدر الذكر أنه تم تسجيل تحسن ملحوظ في الإنتاج، بالمقارنة مع الدفيئة العادية.

### **Résume :**

*Le chauffage des serres agricoles constitue l'usage le plus répandu de l'énergie solaire en agriculture. L'étude a porté sur la conception et la réalisation de deux serres agricoles, l'une expérimentale équipée d'un dispositif de stockage thermique en lit de galets et l'autre témoin, installées à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER) Ghardaïa.*

*Notre travail est basé sur l'étude du bilan d'énergie de la serre expérimentale et l'analyse du climat sous serre dans une zone semi aride, en particulier sur la prédiction de la température et de l'humidité relative régnant à l'intérieur de la serre en polyéthylène de type tunnel. L'efficacité du système sera améliorée en stockant l'excès de chaleur diurne captée par l'effet de serre et en la restituant pour le chauffage nocturne. Une nette amélioration de la production a été enregistrée, comparativement à la serre non chauffée.*

### **Abstract :**

*In agriculture, the heating of greenhouses is the most common use of solar energy. This study focuses on the design and construction of two types of greenhouses. The first one is equipped with a rock bed for thermal storage while the other one is used as a witness. This experiment has been implemented in the Ghardaïa area considered to be a semi arid zone.*

*Our work is based on consideration of the energy balance and experimental analysis of the greenhouse climate, particularly on the prediction of temperature and relative humidity prevailing inside the greenhouse of polyethylene tunnel type. It has been found that the system efficiency is improved due to the storing of heat in excess during daytime. This stored energy is returned back at night. Compared to the witness greenhouse, it has been found that the proposed system yields an improvement in term of production.*

## REMERCIEMENTS

*Ce travail n'aurait pu se dérouler dans les meilleures conditions sans l'aide précieuse et nécessaire de Monsieur A. BOUHDIJAR, Directeur de recherche, qui a toujours encadré mon travail avec propos et m'a fait partager son enthousiasme. Un énorme merci pour sa disponibilité sans bornes, sa patience et ses idées toujours constructives. Egalement pour avoir su répondre à mes questions tordues. Encore mille mercis et mille pardons et qu'il trouve ici l'expression de ma profonde estime.*

*Je tiens à remercier Monsieur le Professeur Y. BENKHADDA pour avoir accepté d'évaluer ce travail, et pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury. Qu'il trouve ici l'expression de mes vifs remerciements.*

*Je remercie également Messieurs M. BELHAMEL, Directeur de Recherche au CDER et B. BOUMEDDANE Maître de Conférences à l'Université de Blida, pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce travail.*

*Que Monsieur H. BENMOUSSA, professeur à l'Université de Batna, trouve ici tous mes remerciements pour son aide et son encouragement durant la réalisation de ce travail et pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce travail.*

*Toute ma reconnaissance à Monsieur B. BOUYOUSFI. Son soutien, tant moral que scientifique, ses encouragements, m'ont profondément touché.*

*Je suis reconnaissant à mes professeurs de l'Institut de Mécanique de Blida pour avoir accepté mon inscription à l'Université et pour les cours qu'ils m'ont prodigués.*

*J'adresse tous mes remerciements aux personnes qui ont contribué à l'accomplissement de ce travail, en particulier :*

- *Le personnel de l'URAER, chercheurs et techniciens, pour leur attitude sympathique à mon égard.*
- *Messieurs R. OUAHID et S. MENIAA, Ingénieurs à l'INSFP de Ghardaïa avec qui j'ai eu de nombreuses et amicales discussions et pour leur précieuse collaboration.*
- *Monsieur M. TAHAR CHAOUCH à l'INSFP de Khemis Miliana pour son aide et son encouragement.*

*Enfin, que tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce travail trouvent ici mes plus sincères remerciements.*

## TABLES DE MATIERES

RESUME .....	1
REMERCIEMENTS .....	2
TABLES DE MATIERES .....	3
LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS .....	5
LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX .....	8
INTRODUCTION .....	12
1. BASES PHYSIQUES ET ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES .....	15
1.1 Introduction .....	15
1.2 Echanges thermiques ayant lieu dans un système serre .....	15
1.2.1 Echanges radiatifs .....	16
1.2.2 Echanges conductifs .....	19
1.2.3 Echanges convectifs .....	20
1.2.4 Echanges par renouvellement d'air .....	20
1.2.5 Transferts de masse .....	22
1.3 Synthèse bibliographique .....	24
1.4 Conclusion .....	29
2. MILIEU SERRE .....	30
2.1 Introduction .....	30
2.2 La plante .....	30
2.2.1 Besoins des plantes .....	30
2.2.2 Croissance et développement .....	32
2.2.3 Influence de la température sur la plante .....	33
2.3 La serre .....	34
2.3.1 Types de serre .....	35
2.3.2 Matériaux de charpente .....	35
2.3.3 Matériaux de couverture .....	35
3. MODELISATION THERMIQUE DE LA SERRE .....	42
3.1 Introduction .....	42
3.2 Principe de base .....	42
3.3 Hypothèses simplificatrices .....	43
3.4 Modélisation thermique de la serre .....	44
3.4.1 Représentation des composants de la serre .....	44
3.4.2 Analyse physique du modèle .....	47
3.5 Formulation du système d'équations .....	62
3.6 Paramètres intervenant dans le bilan de puissance .....	63
3.6.1 Grandeurs concernant la radiation solaire .....	63
3.6.2 Grandeurs concernant la radiation thermique .....	65
3.6.3 Grandeurs concernant la convection .....	68
3.6.4 Grandeur concernant la conduction .....	72

3.6.5	Grandeurs concernant le dispositif de stockage .....	73
3.6.6	Grandeurs thermophysiques des éléments de la serre .....	76
4.	EXPERIMENTATION .....	77
4.1	Introduction .....	77
4.2	Description du dispositif expérimental .....	77
4.3	Installation de la serre .....	78
4.3.1	Fixation du film plastique .....	78
4.3.2	Charges .....	79
4.3.3	Couverture transparente.....	79
4.3.4	Contrôle diurne de la température .....	80
4.4	Installation du dispositif de stockage thermique .....	81
4.4.1	Disposition du lit de galets .....	81
4.4.2	Système de ventilation.....	83
4.5	Méthode et appareillages de mesure .....	85
4.5.1	Mesure de la température.....	86
4.5.2	Mesure de la vitesse du vent .....	92
4.5.3	Mesure du flux solaire.....	93
5.	RESULTATS ET INTERPRETATION .....	96
5.1	Introduction .....	96
5.2	Présentation des résultats.....	96
5.2.1	Rayonnement solaire .....	96
5.2.2	Température .....	100
5.2.3	Humidité relative .....	110
5.3	Résultats agronomiques à titre indicatif.....	113
	CONCLUSION .....	114
	ANNEXES .....	116
	A. Aspects géométriques du rayonnement solaire .....	116
	B. Propriétés thermophysiques des éléments de la serre .....	122
	C. Transfert conductif dans un milieu semi-infini en regime périodique .....	125
	REFERENCES.....	129

## LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

$A_c$	: surface de la couverture
$A_{G,A}$	: surface d'échange air-galets
$A_s$	: surface du sol dans la serre
$C$	: facteur de correction de la distance terre-soleil
$C_p$	: chaleur spécifique de l'air
ET	: équation du temps
$F_{ij}$	: facteur de forme entre la surface (i) et la surface (j)
G	: galets
Ha	: humidité absolue de l'air
Hs	: humidité de saturation de l'air
ID	: rayonnement direct reçu par un plan incliné
Id	: rayonnement diffus reçu par un plan incliné
IDh	: rayonnement direct reçu par un plan horizontal
Idh	: rayonnement diffus reçu par un plan horizontal
Ig	: flux d'énergie total reçu
M	: masse
P	: porosité
Pe	: période
Q	: flux de chaleur
Rn	: taux de renouvellement d'air
T	: température
$T_{f,int}$	: température de l'air à l'entrée du stock
$T_{f,out}$	: température de l'air à la sortie du stock
$T_{G,A}$	: taux de surface d'échange
U	: vitesse moyenne du vent sur la couverture
$V_{ai}$	: volume de la serre
$V_{GT}$	: volume total des galets

$V_{st}$	: volume du stock
$X_L$	: facteur de trouble atmosphérique
$Z$	: altitude de lieu
$a$	: diffusivité thermique
$ae$	: air extérieur
$ai$	: air intérieur
$alb$	: coefficient d'albédo
$c$	: couverture
$cd$	: conduction
$cv$	: convection
$d_G$	: diamètre équivalent des galets
$e$	: extérieur
$f$	: forcée
$g$	: accélération de la pesanteur
$h^{cv}$	: coefficient d'échange par convection
$h^E$	: coefficient d'échange par évapotranspiration
$h_G$	: coefficient d'échange thermique surfacique
$h^r$	: coefficient d'échange radiatif
$h_{vG}$	: coefficient volumique de transfert thermique par convection
$h(t)$	: coefficient de transfert de chaleur
$i$	: intérieur
$k_s$	: coefficient de conduction du sol
$m$	: nombre de segments de la couverture
$\dot{m}$	: débit massique de l'air
$ri$	: rayonnement infrarouge
$n$	: naturelle
$rn$	: renouvellement d'air
$rs$	: rayonnement solaire
$s$	: sol
$se$	: sol extérieur
$sk$	: ciel

$s_t$	: stockage
$t$	: temps
$v$	: végétation
$w$	: angle horaire
$y$	: profondeur de la couche du sol
$z$	: sous sol de la serre (profondeur de 1m)
$\alpha$	: coefficient d'absorption
$\varepsilon$	: émissivité
$\sigma$	: constante de Stefan boltzman
$\omega$	: fréquence angulaire
$\delta$	: déclinaison du soleil
$\varphi_i$	: l'inclinaison du plan $i$
$\rho$	: masse volumique
$\theta_i$	: angle d'incidence du rayonnement solaire sur le plan $i$



## LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.1	Présentation des différentes composantes des rayonnements solaire et terrestre	16
Figure 2.1	Courbes spectrales de transmission d'un verre clair	36
Figure 2.2	Courbes spectrales de transmission du polymétacrylate de méthyle	37
Figure 2.3	Courbes spectrales de transmission du verre ordinaire et d'un polyéthylène	38
Figure 2.4	Courbes spectrales de transmission de polyéthylène	39
Figure 2.5	Transmission de certains films PVC plastifié, EVA et PE	40
Figure 2.6	Courbes de transmission des films PVC plastifié, EVA et PE	41
Figure 3.1	Eléments et mécanismes à prendre en compte dans un modèle	46
Figure 3.2	Schéma représentant le bilan de puissance du nœud de couverture	47
Figure 3.3	Schéma représentant le bilan de puissance au niveau du sol	54
Figure 3.4	Représentation schématique de la serre avec ses différents nœuds	58
Figure 3.5	Un élément de volume du stock	60
Figure 3.6	Schéma représentant une paroi inclinée de la serre	67
Figure 4.1	Ensemble des arceaux	78
Figure 4.2	Montage de la couverture (Polyéthylène)	78
Figure 4.3	Fixation du film plastique	79
Figure 4.4	Aération par les portes	80
Figure 4.5	Installation des conduites	81
Figure 4.6	Disposition des galets	82
Figure 4.7	Galets de diamètres entre 5 et 10 cm	82
Figure 4.8	Dispositif de lit des galets	82
Figure 4.9	Entrée de l'air par Ventilation	83
Figure 4.10	Commande par thermostats	83
Figure 4.11	Les quatre sorties d'air du stockage	83

Figure 4.12	Schéma montrant le trajet de l'air dans le système de stockage	84
Figure 4.13	Appareil d'enregistrement digital type FLUKE à 20 voies	85
Figure 4.14	Appareil d'enregistrement digital type LINSEIS à 12 voies	85
Figure 4.15	Cabine abritant les enregistreurs	85
Figure 4.16	Courbe d'étalonnage du thermocouple	86
Figure 4.17	Les différentes sondes utilisées dans l'expérience	86
Figure 4.18	Station météorologique	87
Figure 4.19	Disposition des thermocouples à différentes hauteurs	87
Figure 4.20	Emplacement des sondes dans le sol	88
Figure 4.21	Disposition de la sonde PT100 à une profondeur de 1m	88
Figure 4.22	Emplacement du thermocouple à la surface du sol	89
Figure 4.23	Emplacement des thermocouples à la surface de la plante	89
Figure 4.24	Localisation des sondes dans le lit de galets	89
Figure 4.25	Installation des sondes dans le lit de galets	90
Figure 4.26	Implantation des sondes PT100 dans un lit de galets	90
Figure 4.27	Disposition des thermocouples dans la serre expérimentale	91
Figure 4.28	Anémomètre type NG6313	92
Figure 4.29	Disposition du pyranomètre dans la serre	93
Figure 4.30	Station radiométrique (URAER)	93
Figure 4.31	Vue interne de la serre expérimentale	94
Figure 4.32	Vue interne de la serre témoin	94
Figure 4.33	Vue d'ensemble des serres au site de l'URAER	95
Figure 5.1	Eclairement diffus calculé et mesuré	97
Figure 5.2	Eclairement direct calculé et mesuré	97
Figure 5.3	Eclairement global calculé et mesuré	97
Figure 5.4	Erreur relative sur le rayonnement diffus	97
Figure 5.5	Erreur relative sur le rayonnement direct	97
Figure 5.6	Erreur relative sur le rayonnement global	97
Figure 5.7	Rayonnements solaires global et diffus mesurés sur une surface horizontale et le direct sur un plan normal	98

Figure 5.8	Eclairage global instantané mesuré à l'intérieur et à l'extérieur de la serre	99
Figure 5.9	Eclairage global journalier mesuré à l'intérieur et à l'extérieur de la serre	100
Figure 5.10	Evolution de la température du sol à l'intérieur de la serre	101
Figure 5.11	Evolution des températures mesurées du sol extérieur	102
Figure 5.12	Evolution de la température calculée du sol à différentes profondeurs	103
Figure 5.13	Evolution de la température mesurée dans la serre expérimentale (13/02/2010)	104
Figure 5.14	Evolution de la température mesurée dans la serre expérimentale (12/03/2010)	104
Figure 5.15	Evolution de la température de l'air intérieur pour différentes hauteurs	105
Figure 5.16	Evolution journalière de la température de l'air (11 Février 2010)	107
Figure 5.17	Evolution journalière de la température de l'air (23 Février 2010)	107
Figure 5.18	Evolution de la température mesurée de l'air du stock en fonction du temps pendant deux journées (stockage et déstockage)	108
Figure 5.19	Evolution de la température mesurée de l'air dans le stock en fonction de la distance (stockage)	109
Figure 5.20	Evolution de la température mesurée de l'air dans le stock en fonction de la distance (déstockage)	109
Figure 5.21	Evolution journalière de l'humidité relative de l'air (23/02/2010)	110
Figure 5.22	Evolution journalière de l'humidité relative de l'air (11/03/2010)	111
Figure 5.23	Evolution de l'humidité relative de l'air (02/03/2010)	111
Figure 5.24	Besoin de chauffage de la serre témoin	112
Figure 5.25	Besoin de chauffage de la serre expérimentale	112

Tableau 1.1	Résumé des performances de différentes serres utilisant le lit de galet comme milieu de stockage	28
Tableau 2.1	Besoins des espèces légumières cultivées sous abris en fonction du stade de développement (INRA France)	32
Tableau 3.1	Caractéristiques thermiques des sols	57
Tableau 3.2	Formulation du système d'équations du modèle	62
Tableau 3.3	Coefficients $R_1$ et $R_2$ en fonction des plages de températures	71
Tableau 3.4	Valeurs moyennes des propriétés thermiques des différents sols	73
Tableau 3.5	Propriétés thermo physiques des différents éléments	76

## INTRODUCTION

En Algérie, l'utilisation des serres agricoles a permis d'augmenter la période de production ainsi que les rendements. Mais cela reste en dessous des possibilités qu'offre la culture sous serre, car les quantités de fruits et de légumes qui sont disponibles durant la période hors culture plein champ sont insuffisantes.

En effet, si on examine la période de production sous serre, on remarque que, compte tenu du calendrier de plantation, les fruits et les légumes tels que la courgette, la tomate, le piment, le poivron, le concombre sont produits comme suit :

- dans la zone littorale, à partir de la fin février, alors qu'en pleins champs, ces mêmes cultures n'entrent en production qu'au mois de mai.
- Dans les zones intérieures, à partir du mois de mai et seulement à partir du mois de juillet en culture de plein champ.

Il reste actuellement une période creuse allant de décembre à la fin février pour les zones littorales, et de novembre à la fin avril pour les zones intérieures.

Les raisons principales de ce manque de produits sont les conditions climatiques très défavorables pendant cette période (octobre à mars), car généralement les températures sont basses, la luminosité est faible et l'hygrométrie est forte.

Pour ce qui est des zones intérieures, ce type de production ne peut être envisagé sous serre froide, en raison de la présence de périodes de gelée continue.

C'est pour cela que les plantations ne peuvent être réalisées avant la deuxième quinzaine du mois de février ou du mois de mars.

Une possibilité d'étaler le calendrier de production serait l'utilisation des serres chauffées, à condition de trouver un moyen de chauffage adéquat et bon marché.

La serre conçue à l'origine comme une simple enceinte limitée par une paroi transparente, telle est le cas de la serre tunnel conventionnelle largement répandue dans le Maghreb. La zone de Ghardaïa se caractérise par un rayonnement intense engendrant des températures élevées durant le jour dans la serre et des températures extérieures basses durant la nuit.

Les températures extrêmes à l'intérieur de la serre constituent un facteur nuisible capable de freiner le développement de la plante et dans le meilleur des cas, elles pénalisent le rendement et la qualité des produits.

L'objectif principal de la serre est d'obtenir une récolte à rendement élevé avec une certaine précocité. Ceci est possible par le maintien d'une température optimale à chaque étape de la culture. De ce fait, un système de stockage d'énergie approprié est utilisé conjointement. Ce dernier consiste à emmagasiner l'excédant d'énergie du jour et à le restituer pour son utilisation durant la nuit (stockage de courte durée).

En effet, la serre est un capteur solaire qui ne comporte aucun système de stockage thermique. Alors qu'aux heures les plus chaudes de la journée, il arrive qu'il y ait un excédant d'énergie solaire captée nécessitant souvent un dispositif de ventilation. Par contre la nuit, en certaines périodes, la serre nécessite un chauffage.

Pour palier à ces inconvénients, plusieurs systèmes de stockage d'énergie existent (mur nord, rideau thermique, collecteur d'air du sol etc...). Parmi ceux-ci, on a le stockage en lit de galets dans lequel le solide est parcouru par un fluide caloporteur. Les galets sont souvent utilisés à cause de certaines possibilités techniques et économiques.

Notre étude se base sur la conception et la réalisation, dans la région de Noumérat wilaya de Ghardaïa, de deux serres tunnel à couverture plastique l'une expérimentale équipée d'un dispositif de stockage thermique en lit de galets et la seconde témoin.

Notre étude est organisée de la façon suivante :

Dans le premier chapitre, nous rappelons les principales notions et définitions fondamentales des différents modes de transferts de chaleur à travers une synthèse bibliographique sur les travaux effectués dans le domaine des serres.

Ensuite, le deuxième chapitre traite d'une part les phénomènes relatifs à la végétation et l'influence de la température sur la croissance de la plante et d'autre part, les caractéristiques principales des divers matériaux.

Le troisième chapitre donne les hypothèses simplificatrices et la modélisation mathématique qui traduit les phénomènes de transfert de chaleur par une série d'équations mettant en évidence l'état énergétique des différents éléments de la serre.

La présentation du dispositif expérimental, de l'appareillage de mesure et de la méthodologie adoptée sera abordée dans le quatrième chapitre.

Le chapitre cinq présente les résultats et leurs discussions.

Une conclusion générale vient clôturer les cinq chapitres de ce mémoire, exposant les différents résultats obtenus et des recommandations sont suggérées.

Pour ne pas encombrer le texte, nous avons mis en annexe les détails concernant le gisement solaire, les grandeurs thermophysiques des éléments de la serre et l'analyse de transfert par conduction dans un milieu semi infini en régime périodique.

## CHAPITRE 1

### BASES PHYSIQUES ET ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES

#### 1.1 Introduction

Dans les conditions naturelles, les caractéristiques microclimatiques sont la résultante des différents échanges d'énergie et de masse qui s'établissent entre la surface du sol et l'atmosphère. La méthode dite du bilan d'énergie [1/2/3] est largement utilisée pour analyser ces différents échanges et étudier l'influence des paramètres climatiques et des caractéristiques physiques des surfaces d'échange sur la formation des microclimats.

La délimitation physique d'une enceinte qui représente la mise en place d'une serre, perturbe les différents échanges d'énergie et de masse.

L'application de la méthode du bilan d'énergie au cas d'une serre tunnel (serre solaire) suppose que soit bien identifiés et connus, les différents modes d'échange d'énergie.

#### 1.2 Echanges thermiques ayant lieu dans un système serre

Les conditions climatiques au voisinage du sol résultent des échanges de chaleur et de masse entre le sol, la végétation et l'atmosphère. Ainsi, nous considérons dans notre étude que la serre peut être décrite à partir des transferts d'énergie et de masse. Ces transferts peuvent s'effectuer sous trois formes différentes [4] :

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



### 1.2.1 Echanges radiatifs

Ces échanges correspondent à des transferts d'énergie sans support matériel entre des surfaces à températures différentes.

La figure 1.1 donne une représentation schématique des différents composants des rayonnements solaire et terrestre.

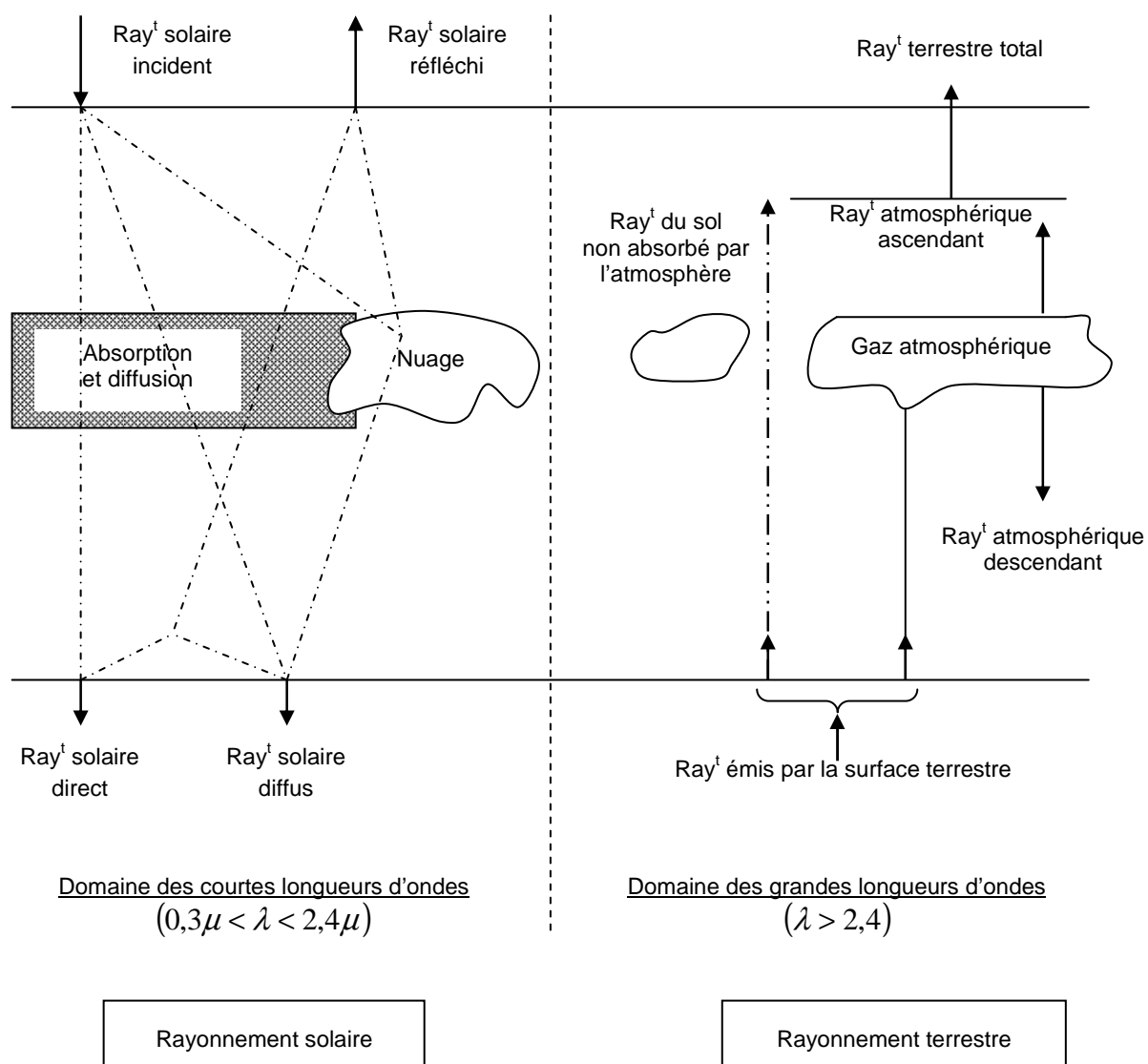


Figure 1.1 Présentation schématique des différentes composantes des rayonnements solaire et terrestre.

L'inclinaison et l'orientation des différentes parois d'une serre peuvent modifier la transmission du rayonnement solaire. A titre d'illustration, notons que lorsque les rayonnements arrivent sous un petit angle par rapport à la surface, une grande partie de la lumière peut être réfléchi.

#### 1.2.1.1 Echanges radiatifs de courtes longueurs 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 $\mu$ m). C'est pourquoi les échanges radiatifs de courtes longueurs d'onde ont été analysés en détail [5/6].

Pour un rayonnement solaire global incident donné au sommet d'un couvert végétal, l'environnement lumineux en son sein dépend de sa forme ainsi que des 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 taches de soleil, des zones d'ombre et de pénombre [7]. Ce problème a été étudié pour une culture de rosiers sous serre [8]. D'une manière générale, il a été montré que :

- La proportion du rayonnement diffus est plus importante sous serre qu'en plein air ;
- L'effet de la saison est très important sur la transmission du rayonnement sous serre.

#### 1.2.1.2 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, la paroi et l'extérieur. La nature de la couverture joue 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 opaque dans le domaine des infrarouges thermiques pour optimiser l'effet de serre radiatif. L'effet de serre peut être considéré comme la somme de deux phénomènes [9] :

- Le piégeage du rayonnement de grandes longueurs d'onde par le matériau de couverture. Il est d'autant plus important que le matériau est plus opaque dans ce domaine. Le rayonnement solaire pénétrant dans la serre est

absorbé par les plantes, le sol et les structures qui, à leur tour, émettent un flux de rayonnement thermique qui est bloqué par les parois. De nombreux modèles détaillés des échanges radiatifs entre les différents constituants de la serre ont été développés [10/11].

- 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 par des parois [9].

### 1.2.1.3 Nature des divers rayonnements

#### *- Rayonnement solaire direct et diffus*

Durant la journée, la surface du sol reçoit les radiations émises par le soleil. Une partie de ces radiations subit l'effet de diffusion lors de son passage à travers l'atmosphère et constitue le rayonnement diffus. L'autre partie reçue directement à la surface du sol constitue le rayonnement direct [12].

La répartition spectrale de l'énergie solaire peut être schématisée comme suit : la partie allant de 0,4 à 0,7 $\mu\text{m}$  est nécessaire à la photosynthèse, l'autre partie allant de 0,7 à 2,5 $\mu\text{m}$  sert à chauffer les plantes.

#### *- Rayonnement solaire global*

Par définition le rayonnement solaire global est la somme des rayonnements direct et diffus arrivant sur une surface.

#### *- Rayonnement atmosphérique*

Le rayonnement atmosphérique résulte de l'émission dans diverses directions des composants de l'atmosphère. Une fraction d'énergie est rayonnée et dirigée vers l'espace tandis que l'autre fraction parvient au sol. Le domaine des longueurs d'ondes du rayonnement atmosphérique s'étend approximativement de 3 à 100  $\mu\text{m}$ .

D'après la loi de STEFAN BOLTZMAN, le flux de chaleur est donné par l'expression suivante :

$$Q_{\text{atm}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{\text{sk}}^4 \quad (1-1)$$

$T_{\text{sk}}$  est la température fictive du ciel et sa valeur est donnée par l'expression de SWINDBANK [13]:

$$T_{sk} = 0,0552.T_{ae}^{1,5} \quad (1-2)$$

$T_{ae}$  : Température de l'air extérieur [K]

#### - Rayonnement terrestre

Ce rayonnement résulte de l'émission du sol dont on admettra en première approximation qu'il se comporte comme un corps noir.

$$Q_{tr} = \sigma.T_s^4 \quad (1-3)$$

$T_s$  exprimée en kelvin, est la température de la surface du sol.

#### 1.2.2 Echanges conductifs

La conduction est un processus physique de transmission de la chaleur qui s'appuie sur un milieu matériel, sans mouvement de matière, et qui fait passer la chaleur des zones chaudes aux zones froides à l'aide de mécanismes à l'échelle microscopique (vibrations atomiques ou moléculaires, diffusion électronique).

La loi fondamentale de la conduction ou loi de Fourier a pour expression :

$$Q = \vec{\lambda} \cdot \overrightarrow{\text{grad}T} \quad (1-4)$$

Où  $\overrightarrow{\text{grad}T}$  représente le gradient local de température (c'est-à-dire le taux de variation spatiale de la température au point considéré).

L'opérateur  $\vec{\lambda}$ , qui définit la conductivité thermique du milieu au point considéré, est un tenseur symétrique du second ordre.

La conduction est le seul mode de transfert de chaleur intervenant au sein des milieux solides opaques [14].

### Echange par conduction dans un milieu semi infini [15]

Le sol est un milieu semi-infini limité sur sa face supérieure par un plan sur lequel est appliqué un signal de température périodique  $T = f(t)$ . En négligeant les effets de bord, à l'intérieur de la serre, l'équation traduisant l'évolution thermique du sol est :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1-5)$$

La variation de température à la surface du sol  $T_{ss}$  est supposée suivre une variation sinusoïdale en fonction du temps  $t$  (en s ou j) avec une amplitude  $\Delta T$  et une fréquence angulaire  $\omega$  (en rad/s ou rad/j) autour d'une valeur moyenne  $T_m$  :

$$T_{ss} = T_m + \Delta T \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (1-6)$$

La solution du problème permet d'obtenir la température du sol  $T(z,t)$  en fonction du temps  $t$  et de la profondeur dans le sol  $z(m)$  :

$$T(z,t) = T_m + \Delta T \cdot \exp\left(-z \cdot \sqrt{\omega / 2 \cdot a}\right) \cdot \sin\left(\omega \cdot t - z \cdot \sqrt{\omega / 2 \cdot a}\right)$$

avec,  $\exp\left(-z \cdot \sqrt{\omega / 2 \cdot a}\right)$  représentant l'amortissement.

### 1.2.3 Echanges convectifs

Ces échanges correspondent à des transferts d'énergie liée aux déplacements des fluides. Selon la nature des mécanismes engendrant le mouvement des fluides, on distingue trois cas de convection.

- Convection libre ou naturelle : En l'absence de toute intervention mécanique extérieure, les différences de températures dans la masse de fluide engendrent des différences de densité qui génèrent des courants gravitaires.
- Convection forcée: Le mouvement du fluide est provoqué par une intervention mécanique indépendante de toute hétérogénéité dans la répartition des températures au sein du fluide.

- Convection mixte : dans ce cas, les deux mécanismes se superposent.

La convection intervient d'une part, à l'extérieur de la serre, entre l'air ambiant et la couverture et d'autre part à l'intérieur entre l'air et les éléments suivants :

- Le sol
- Les galets
- La végétation
- La couverture

NEWTON a développé une relation exprimant les échanges de chaleur par convection intervenant entre une surface solide et un fluide :

$$Q^{cv} = h.A.(T_p - T_f) \quad (1-7)$$

$h$  : coefficient de transfert de chaleur par convection

$A$  : surface d'échange

$T_p$  : température de surface du solide

$T_f$  : température du fluide

#### 1.2.4 Echanges par renouvellement d'air

Le renouvellement d'air se fait à travers différentes ouvertures. Pour sa détermination, il faut prendre en compte les dimensions et l'emplacement des ouvertures, la qualité de l'étanchéité et le montage de la serre.

La densité du flux de chaleur échangée par renouvellement d'air est donnée par [1]:

$$Q^m = D.CA(T_{ai}).V.(T_{ae} - T_{ai}) \quad (1-15)$$

$D$  : Taux de renouvellement (nombre de volume / unité de temps);

$V$  : Volume de la serre [ $m^3$ ];

$T_{ae}$  : Température de l'air ambiant extérieur [K];

$T_{ai}$  : Température de l'air à l'intérieur de la serre [K];

$CA(T_{ai})$  : Chaleur spécifique volumique de l'air ; sa valeur est donnée par la relation empirique proposée par Van Bavel et corrigée par Pruvot [16] :

$$CA(T_{ai}) = \frac{355637}{T_{ai} + 273,16} \quad [J / m^3.K]$$

KITTAS [1] a obtenu, pour une serre tunnel, l'expression donnant le taux de renouvellement d'air en fonction de la vitesse du vent :

$$D = \frac{1 + 0,3.U}{3600}$$

U est la vitesse du vent.

Le renouvellement d'air de la serre est la conséquence de trois mécanismes :

- Les fuites, dues aux défauts d'étanchéité de la serre,
- La ventilation naturelle, correspondant à l'ouverture d'ouvrants,
- La ventilation forcé, liée à la présence d'un ventilateur (ou extracteur) dans la serre.

#### 1.2.5 Transferts de masse

Dans un milieu de composition hétérogène où les concentrations, les températures et les vitesses locales sont différentes, on constate un déplacement d'un point à un autre du milieu d'un ou de plusieurs composés. Ce transport de matière effectué par brassage, par convection ou par diffusion moléculaire, est appelé transfert de masse.

##### Echange de chaleur par changement de phase

Un corps qui fond ou se vaporise absorbe de la chaleur pour effectuer cette transformation. Un corps qui se solidifie ou se liquéfie à partir de la vapeur, cède de la chaleur, appelée chaleur latente.

Les transferts de masse sont liés aux phénomènes d'évaporations au niveau du sol et des plantes et aux phénomènes de condensation sur la couverture.

La puissance  $Q^l$  échangée au cours de ces transferts se déduit de la relation [16] :

$$Q^l = h^l.A.(H_a - H_s(T)) \quad (1-16)$$

A : surface d'échange ;

$h^l$  : coefficient d'échange par chaleur latente ;

Ha : l'humidité absolue de l'air ambiant de la serre [ $\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{air sec}}$ ] ;

Hs(T) : l'humidité saturante de l'air à la température de la surface d'échange ;



### 1.3 Synthèse bibliographique

Dans cette section, nous effectuons une synthèse bibliographique sur les travaux du système de stockage de la chaleur dans les serres agricoles. On distingue deux types de stockage :

- le stockage par chaleur latente et
- le stockage par chaleur sensible.

Dans ce dernier, on retrouve plusieurs formes de stockage telles que le stockage du mur nord, le stockage dans le sol (échangeurs air/sol) et le stockage à lit de galets.

Le système de stockage thermique par chaleur sensible qui fait l'objet de notre étude n'est autre que le stockage avec lit de galet. C'est pourquoi, nous exposerons dans ce qui suit les travaux de recherche effectués sur ce type de stockage thermique.

*ARIZOV et NIYAZOV* [17] ont utilisé un lit de pierres constituées de graviers de 2 à 3 cm de diamètre, placé à une profondeur de 0,5 m à partir de la surface de la serre de 40m<sup>2</sup> couverte de deux films de PE situé à Tascend (45,25°N 70,38°E), dans laquelle des plantes sont cultivées. Un volume total de 2,5m<sup>3</sup> a été utilisé pour stocker 5,7 tonnes de galets. La température de l'air intérieur a été maintenue supérieure à celle ambiante (-5°C en Janvier) par 1 3°C.

*BOUHDJAR et BOULBINA* [18] ont fait l'étude de stockage thermique dans une serre de 240m<sup>2</sup> couverte d'un seul film de PE situé à Baraki (33°N 03°E), Algérie, qui était couplé avec un lit de galets de 10,6m<sup>3</sup> ayant 20 tonnes et de 50-100mm de diamètres. Quand la température de l'air dépasse 27°C, l'air est évacué de l'intérieur de la serre. Tandis que lorsque la température décroît à 13°C, le système inverse la direction de l'écoulement de l'air en récupérant la chaleur stockée. Le système pourrait atteindre une augmentation de la température de l'air intérieur de 4-6°C par rapport à celle d'extérieure .

Dans un second travail, *BOUHDJAR et al* [19] font une étude expérimentale utilisait un lit de galets renfermé dans des tubes cylindriques placés horizontalement

sous sol d'une serre tunnel en polyéthylène. L'étude présentait le rendement de lit de pierres par l'analyse de différents paramètres enregistrés, notamment les températures d'entrée et de sortie des tubes constituant le lit de pierres et la grandeur des radiations.

*KÜRKLÜ et al* [20] ont mené une étude sur un lit de pierres placé sous le sol qui a été utilisé pour le chauffage d'une serre de 15m<sup>2</sup> couverte de PE située en Turquie. Les pierres ont été enterrées dans deux canaux creusés et isolés. L'air (1100m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup>) était poussé à travers le lit de pierres. L'arrangement peut maintenir la température de l'air intérieur supérieure à celle ambiante par 10°C sous les conditions d'hiver.

L'étude de *HUANG et al* [21] a porté sur un lit de galets de 15,7 tonnes et de diamètre de 12,7 à 50,8 mm qui a été utilisé dans une serre de 176 m<sup>2</sup> située en Caroline du nord (34.83°N 77.30°W), USA. Le lit a été enterré pour assurer une uniformité de l'écoulement d'air et augmenter le stockage thermique. Le système était capable de maintenir une température de l'air supérieure à celle ambiante extérieur par 5°C durant les nuits d'hiver.

*JAIN* [22], dans son travail de séchage solaire, a mené une étude expérimentale des serres avec lit de pierres pour le séchage d'oignons à Delhi (28,40°N 77,13°E), en Inde. On observait que, dans une serre de 6x4m ayant un lit de pierres de 0,25m de hauteur avec 0,278 kg.s<sup>-1</sup> de masse d'écoulement d'air permet de sécher 2280 kg d'oignons de contenu d'humidité de 0,614-0,21 kg d'eau par kg de matière sèche.

*BRENDENBECK* [23] a fait une étude expérimentale concernant le système de stockage à lit de pierres constitué de graviers de 5 à 15cm de diamètres pour le chauffage d'une serre de 1700m<sup>2</sup> situé à Hanovre (52.50°N 09.69°E), Danemark et couverte de trois couches de feuilles de polycarbonate et d'un rideau thermique à proximité du plafond de la serre. L'air était mis en circulation à travers des tuyaux en béton de 0.6m de diamètre. L'écoulement d'air total était de l'ordre de 60.000 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, créé par 12 ventilateurs qui forçaient l'air à travers le stockage. Le système pouvait satisfaire jusqu'à 30% des besoins en chaleur annuel de la serre.

*OZTURK et BASCETINCELİK* [24] ont utilisé les roches volcaniques pour le stockage de l'énergie thermique afin de chauffer une serre de 120m<sup>2</sup> couverte de PE situé à Adana, (37.01°N 35.18°E), Turquie. L'unité de système de stockage de la chaleur constituée d'un lit a été construite en sous sol au centre d'une serre tunnel. L'unité de stockage de la chaleur était remplie de 6480 kg de matériaux volcaniques. 18,9% des besoins en chaleur exigés par cette serre tunnel ont été obtenus.

*FOTIADES* [25] a expérimenté un système de stockage dans un lit de pierres de 40mm de diamètre et pesant environ 74 tonnes, placé en sous sol dans une serre de 300m<sup>2</sup>, couverte de PE situé à Nicosia (35,20°N 33,29°E), Chypre. L'air était mis en circulation en utilisant un ventilateur de 1,7 kw. Le système pouvait fournir 76% des besoins annuels en chaleur de la serre (la température ambiante était 9,8°C en Janvier).

*JELINKOVA* [26] s'est intéressé à l'étude d'une serre de 432m<sup>2</sup> de surface couverte de verre, située à Prague (50,10°N 14,30°E ), qui était couplée avec un système de stockage à lit de pierres de 43 tonnes placé en sous sol. Un ventilateur mettait en mouvement l'air de l'intérieur de la serre jusqu'au milieu de stockage placé en dehors de la serre avec un débit de 400 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> à l'accumulateur chargé, où la chaleur lui sera transmise. Durant la nuit, le processus s'inverse. Un gain de température de l'air interne de 4 à 6°C a été enregistré durant la période d'expérimentation.

*KAVIN et KURTAN* [27] ont étudié l'influence de types de briques qui sont utilisées comme milieu de stockage dans une application pour une serre de 100 m<sup>2</sup> couverte de PE situé à Budapest, Hongrie (47.43°N 19.10°E). L'air était mis en circulation à un débit de 5500 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> à travers un milieu de stockage en briques de 48 tonnes placé dans le sous sol de la serre. Le système était capable de fournir environ 53,4% de l'énergie requise.

*BRICAULT* [28] a fait l'étude expérimentale sur un système de stockage thermique à lit de galets enterré à une profondeur de 0,4 m et rempli de 202 tonnes de graviers de 40 mm et utilisé dans une serre de 2850 m<sup>2</sup> couverte de PE situé à Montréal, Canada (45,50°N 73,50°W), dans laquelle des tomates sont cultivées. Le système pouvait satisfaire 40% des besoins annuels en chaleur de la serre quand les conditions extérieures étaient mesurées entre -8 et 7°C en Janvier, 2 à 4°C en Novembre et 0 à 9°C en Mars.

*SANTAMOURIS et al* [29] ont présenté une petite serre de 19 m<sup>2</sup> de surface utilisant 13 tonnes du gravier pour le stockage de la chaleur, qui a été utilisée pour des raisons expérimentales en Oregon, USA (39,56°N 95,11°W). Le système a pu maintenir des températures moyennes de l'air interne de la serre dans l'intervalle de 10 à 20°C durant les conditions d'hiver (-2.8 à 3°C de Janvier à Mars, 24h moyenne).

Références	Surface et location de la serre (m <sup>2</sup> )	Matériau de couverture et culture	Type et masse de pierres utilisées (kg)	Capacité de chaleur totale des pierres utilisées (KJ/kg.C°)	Capacité de chaleur des pierres utilisées par m <sup>2</sup> d'air	Performance puissance utilisée
<b>Fotiades [25]</b>	300 35.20°N 3.29°E Nicosia, Chypre	PE	Gravier 74,000	53,280	177.6	76% besoin en chaleur en utilisant un ventilateur de 1.7kw
<b>Jelinkova [26]</b>	432 50.10°N 14.30°E Prague, CZ	Verre	Gravier 43,000	30,960	71.67	4-6°C gains 400m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> taux d'écoulement
<b>Bendenbeck [23]</b>	1700 52.50°N 09.69°E Hannover, Danemark	Polycarbonate	Gravier non connue	-	-	30% de besoin en chaleur 600m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> taux d'écoulement en utilisant 12 ventilateurs
<b>Bricault [28]</b>	2850 45.50°N 73.50°W Montréal, Canada	PE, Tomate	Gravier 202,000	145,440	51.03	40% de besoin en chaleur
<b>Kavin et Kurtan [27]</b>	100 47.43°N 19.10°E Budapest, Hongrie	PE	Briques 48,000	48,960	489.6	5500m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> taux d'écoulement avec 53.4% de récupération de chaleur
<b>Santamouris et al [29]</b>	19 39.56°N 95.11°W Oregon, USA	Verre	Gravier 13,000	9360	492.60	10-20°C gains
<b>Bouhdjar, et boulbina [18]</b>	240 28°N 03°E Baraki, Algérie	PE	Galets 20,000	14,440	60.17	4-6°C gains
<b>Arizov et Niyazov [17]</b>	40 45.25°N 70.38°E Tascend, URSS	Double PE	Gravier 5700	4104	102.6	13°C gains
<b>Huang et al [21]</b>	176 34.83°N 77.30°E Caroline nord, USA	Verre	Gravier 15,700	11,304	64.22	5°C gains
<b>Ozturk et Bascetincelik [24]</b>	120 37.01°N 35.18°E Adana, Türk	-	Roche volcanique 6480	-	-	18.9% de besoin en chaleur

Tableau 1.1 Résumé des performances de différentes serres utilisant le lit de galets comme milieu de stockage

#### 1.4 Conclusion

L'étude du bilan d'énergie d'une serre dépend essentiellement de la connaissance des coefficients d'échange thermique et massique à l'intérieur de la serre et de cette dernière avec le milieu extérieur. La détermination de ces coefficients s'obtient à partir des résultats expérimentaux transcrits en des relations empiriques.

La bibliographie montre que, généralement, le volume de stockage est placé dans le sous-sol de la serre ou à côté, à une profondeur qui varie entre 40 et 70 cm. Ces systèmes peuvent satisfaire environ 20-70% des besoins annuels en chaleur avec un gain en température dans l'intervalle de 2 à 10°C par rapport à la température minimale ambiante. Les informations collectées à travers notre revue bibliographique nous ont permis de constater que le matériau le plus utilisé pour le stockage d'énergie dans les serres est la pierre ou le galet ayant un diamètre qui varie entre 20 et 100mm. Le PE et le verre sont matériaux les plus utilisés comme couvertures des serres.

Pour notre part, nous proposons une étude et une réalisation d'une serre tunnel à couverture plastique équipée d'un dispositif de stockage thermique dans un lit de galets dans la région désertique (Noumerat, wilaya de Ghardaïa).

## CHAPITRE 2

### MILIEU SERRE

#### 2.1 Introduction

La serre est un moyen pour créer, à partir des conditions extérieures, un climat favorable à la croissance des plantes. Les principaux facteurs climatiques du milieu interne à une serre sont la température, la lumière et l'humidité. Il est connu que, par l'effet de serre, le sol et les plantes situés sous abris recevant les rayons du soleil, s'échauffent bien plus qu'à l'air libre. Ceci est dû à la réduction de l'effet du vent et aussi aux propriétés physiques de la couverture de la serre (assez transparente pour le rayonnement solaire visible, mais opaque pour l'infrarouge émis par le sol et les autres surfaces à l'intérieur de la serre) d'où effet de "piégeage" des radiations solaires.

Les serres permettent de produire des végétaux dans des conditions économiques rentables : fruits et légumes hors saison ou bien dans des régions froides ou désertiques afin d'être produites en avant saison ou même en n'importe quelle saison. Ce sont donc des outils fort utiles à l'horticulteur ou au cultivateur spécialisé sans compter leur utilisation en recherches physico biologique, technologique et agronomique.

#### 2.2 La plante

Les mécanismes photosynthétiques qui permettent d'expliquer la croissance des végétaux ne seront pas traités dans ce chapitre, néanmoins il est nécessaire de donner un aperçu général relatif à la photosynthèse, afin de comprendre et d'orienter la conception des serres.

La partie du spectre solaire utile à la photosynthèse se situe approximativement entre 0,4 et 0,8  $\mu\text{m}$  (spectre visible). Cette zone spectrale correspond aux radiations photo actives. L'activité photosynthétique n'est pas uniforme sur cette bande de longueurs d'onde et il y a, en général, deux crêtes correspondant à une activité maximale.

D'autre part, la plante a besoin de chaleur pour sa croissance. Elle a aussi besoin d'eau pour compenser l'évaporation qui se produit au niveau des stomates. L'évapotranspiration est continue; ce qui nécessite le maintien d'une hygrométrie et d'une température données dans l'ambiance.

De nuit, le refroidissement peut être important. La plante a besoin de chaleur. En raison de ce phénomène, nous traitons dans la première partie de ce chapitre l'influence de la température sur la croissance et le développement de la plante.

### 2.2.1 Besoins des plantes

Les plantes sont sensibles à la lumière, au gaz carbonique, à l'eau, à la température, ainsi qu'aux mouvements de l'air qui interviennent lors de l'aération et de l'apport de certains éléments (approvisionnement en produits fertilisants, enrichissement en gaz carbonique, fourniture d'eau, brumisation, etc.).

Ces différents facteurs agissent sur la plante par l'intermédiaire de :

- La photosynthèse
- La respiration
- La transpiration

Les facteurs tels que la température, la lumière, l'humidité et la teneur en gaz carbonique agissent simultanément et d'une façon dépendante.

La température est le facteur privilégié d'action sur la croissance et le développement des plantes.

Les exigences thermiques idéales des différentes cultures sont assez mal connues. Elles ont fait l'objet de peu de travaux, étant donné leur complexité (dépendance vis-à-vis des autres facteurs, étalement dans le temps...)

Malgré ces contraintes, l'INRA France propose des plages de températures à respecter en fonction du stade de développement de la plante (tableau 2.1).



Le tableau 2.1, que nous propose l'INRA, classe les plantes maraîchères en quatre catégories, suivant leurs exigences thermiques :

- Les plantes peu exigeantes : laitues et céleri,
- les plantes moyennement exigeantes : la tomate,
- les plantes exigeantes : melon, piment, aubergine, haricots,
- les plantes très exigeantes : le concombre

Espèce légumière cultivée	Durée entre la semi et le début de récolte (Jours)	Température de germination (°C)		Température pour la croissance (°C)		Température pour la floraison (°C)		Humidité relative (%)	Températures critiques (°C)	
		Air	Sol	Air	Sol	Air	Sol		6 Heures	5 Jours
Laitue	110 à 120	10 à 12	12 à 15	06 à 08 (N) 10 à 15 (J)	08 à 10	04 à 06 (N) 08 à 10 (J)	08 à 10	60 à 70	-2	3
Tomate	110 à 120	18 à 20	22 à 25	12 à 15 (N) 18 à 22 (J)	15 à 18	15 à 18 (N) 20 à 28 (J)	16 à 20	60 à 65	+4	8
Concombre	50 à 60	25 à 30	26 à 30	18 à 20 (N) 25 à 30 (J)	20 à 22	16 à 18 (N) 23 à 30 (J)	20 à 22	75 à 85	+6	12
Melon	115 à 125	22 à 25	25 à 27	13 à 16 (N) 25 à 35 (J)	18 à 20	16 à 18 (N) 25 à 30 (J)	18 à 20	50 à 60	+5	11
Piment	110 à 120	22 à 25	24 à 30	14 à 16 (N) 23 à 27 (J)	18 à 20	16 à 18 (N) 23 à 27 (J)	18 à 20	60 à 70	+5	10
Aubergine	100 à 120	22 à 25	24 à 30	16 à 18 (N) 23 à 27 (J)	18 à 20	16 à 18 (N) 23 à 27 (J)	18 à 20	60 à 70	+5	10
Haricot	55 à 65	18 à 20	20 à 22	16 à 18 (N) 20 à 25 (J)	18 à 20	16 à 18 (N) 20 à 25 (J)	18 à 20	60 à 70	+4	8
Céleri	110 à 120	14 à 16	15 à 17	08 à 10 (N) 12 à 16 (J)	10 à 12	-	-	60 à 70	-1	4

Tableau 2.1 Besoins des espèces légumières cultivées sous abris en fonction du stade de développement (INRA) [30]

### 2.2.2 Croissance et développement

Les transformations qui se succèdent, lorsque la plante évolue de la germination à la production de graines, peuvent être envisagées sous deux angles différents :

Pour le premier, il s'agit de développement du végétal si l'on s'intéresse à l'aspect purement qualitatif de cette évolution. Celui-ci est le passage par des étapes différentes à savoir apparition des premières feuilles, des organes floraux, fécondation, embryogenèse, etc.... Chacune de ces étapes correspond à une transformation du végétal aussi bien sa morphologie que sa physiologie. Le cycle de développement qui englobe l'ensemble des phases successives correspond en somme à deux états successifs : l'état végétatif et l'état reproducteur.

En seconde approche, la croissance est quantitativement mesurable. Elle correspond à une augmentation irréversible du poids ou des dimensions (il existe des cas où il y a réversibilité, c'est lorsque la plante se trouve à un état inférieur au point de compensation lumineuse ou soumise à des températures critiques). D'après KOFLER [30], il s'agit d'un accroissement de parties déjà existantes ou d'addition de parties nouvelles pareilles à celles qui existent déjà. Elle peut être mesurée par un allongement ou par un accroissement du poids. Cet accroissement dépend à la fois d'un agrandissement et d'une multiplication des cellules.

### 2.2.3 Influence de la température sur la plante

Dans les limites permises par le code génétique de la plante et en plus de la lumière reçue, sa croissance dépend de nombreux facteurs. La chaleur constitue l'élément le plus important de cette morphogenèse. Elle règle le rythme de développement et limite l'aire géographique de la culture de la plante.

Climatiquement, la mesure la plus courante est la température, et ce qui importe le plus c'est la quantité de chaleur reçue. La tolérance des températures compatibles avec une vie active est assez étroite et varie en général de  $-10^{\circ}\text{C}$  à  $45^{\circ}\text{C}$  (sauf pour quelques rares exceptions). L'effet de la température sur la croissance est le résultat de son action sur la photosynthèse, sur les réactions métaboliques et aussi sur l'alimentation hydrique et minérale.

Les températures ambiantes sont normalement mesurées sous abri de 1,20m à 1,50m au-dessus du sol.

Les températures du sol, dont dépend dans une large mesure, le développement des plantes, sont repérées à différentes profondeurs caractéristiques. Par contre la température des surfaces foliaires est difficile à mesurer.

### Conséquences des températures extrêmes

- Basses températures : Il existe un certain nombre de phénomènes biologiques dont la réalisation est tributaire de l'exposition de la plante à de faibles températures, c'est ce qu'on appelle la vernalisation. Il s'agit là, d'un traitement par le froid de graines ou de jeunes plantes (plantules) provoquant une floraison précoce. Un couvert végétal soumis à de faibles températures (températures critiques) peut donner naissance à un accident climatique : la gelée.

- Hautes températures: Quand la température dépasse un seuil défini pour chaque espèce, des modifications biochimiques irréversibles se produisent dans la plante. Celles-ci se traduisent par une dégradation de la qualité appelée échaudage physiologique. La perte de rendement enregistrée varie de 10 à 80% parfois.

### 2.3 La serre

La fonction essentielle de la serre, en tant qu'enceinte enveloppant dans l'espace, un volume d'air limité, est de créer à partir des conditions extérieures, un microclimat dont les caractéristiques sont la résultante des différents échanges d'énergie et de masse qui s'établissent entre le sol ou son couvert végétal et son environnement immédiat.

### 2.3.1 Types de serre

Il paraît nécessaire d'établir une classification dans ce domaine, car les problèmes d'économie (investissement) ne sont pas abordés de la même façon pour toutes les serres. La diversité se manifeste au niveau :

- De la forme (chapelles, tunnels, multichapelles etc.)
- Du matériau utilisé pour l'enveloppe (verre, film en plastique)
- Du climat entretenu (serre antigel, serre tempérée ou moyennement chauffée, serre chaude)
- Du système de chauffe (générateur d'air chaud, aérothermes, conduites à eau chaude, paillage radiant etc...)
- De la fonction de la serre (cultures maraîchères, plante en pots)
- Du modèle de serre (fixe ou pivotante)

A partir de ces éléments, chaque type de serre présente ses propres avantages et ses insuffisances.

### 2.3.2 Matériaux de charpente

La structure qui doit donner la rigidité à l'ensemble de la serre et résister aux charges et aux poussées peut être réalisée en béton et bois (construction dure), en acier galvanisé ou traité à l'antirouille et en aluminium. Du point de vue de l'ombrage, les dimensions des arceaux et de tous les éléments constituant la structure en hauteur de la serre, doivent être aussi réduites que possible [30].

### 2.3.3 Matériaux de couverture

Le matériau de paroi est l'élément essentiel de la serre. Sa fonction principale est d'assurer un effet de serre aussi favorable que possible tout en laissant pénétrer la lumière.

Les courbes de transmission spectrale des matériaux de synthèse qui seront présentées dans ce chapitre, ne sont qu'à titre indicatif et ne préjugent en rien les variations susceptibles d'exister d'une qualité à une autre.

Nous nous limiterons donc, dans cette partie à dégager en quelque sorte la philosophie de l'emploi des matériaux de couverture et de présenter enfin un tableau récapitulatif donnant avec l'imprécision inhérente à ce genre de synthèse, les principales caractéristiques de leurs propriétés [30].

### - Verres

Le verre possède la propriété remarquable d'être transparent au rayonnement solaire [0,38 à 2,4 $\mu\text{m}$ ] et opaque au rayonnement infrarouge de grandes longueurs d'onde [5 à 39 $\mu\text{m}$ ] correspondant à l'émission de corps à la température ordinaire. Cette propriété favorise le phénomène d'effet de serre qui provoque un réchauffement de l'enceinte protégée par ce matériau et crée les conditions de cultures bien connues des serristes.

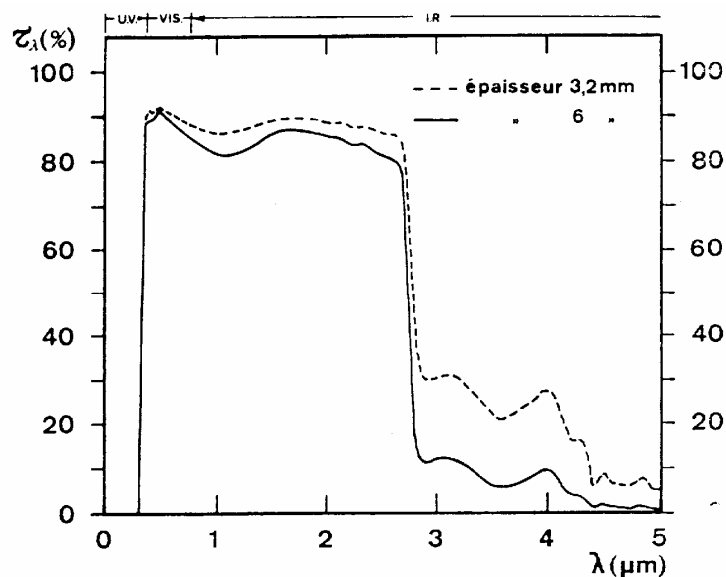


Figure 2.1 Courbes spectrales de transmission d'un verre clair [30]

Les autres matériaux verriers modifient le bilan énergétique et lumineux par rapport à celui obtenu par le verre ordinaire dans la mesure où leurs propriétés s'écartent de celles de ce dernier :

- Réduction des pertes de chaleur par conduction-convection pour les vitrages isolants
- Réduction de l'énergie solaire pénétrant dans la serre pour les matériaux absorbants, colorés ou réfléchissants

### - Matériaux plastiques rigides

Ces matériaux se présentent sous forme de plaques plus ou moins rigides de l'épaisseur de l'ordre du mm. Ils possèdent en général une bonne transparence au rayonnement solaire (bien qu'inférieure à celle du verre ou des films plastiques) et ont une opacité marquée au rayonnement infrarouge, ce qui leur assure un "effet de serre" plus ou moins net. A titre indicatif nous présentons ci-dessous des courbes spectrales de transmission du polyméthacrylate [30].

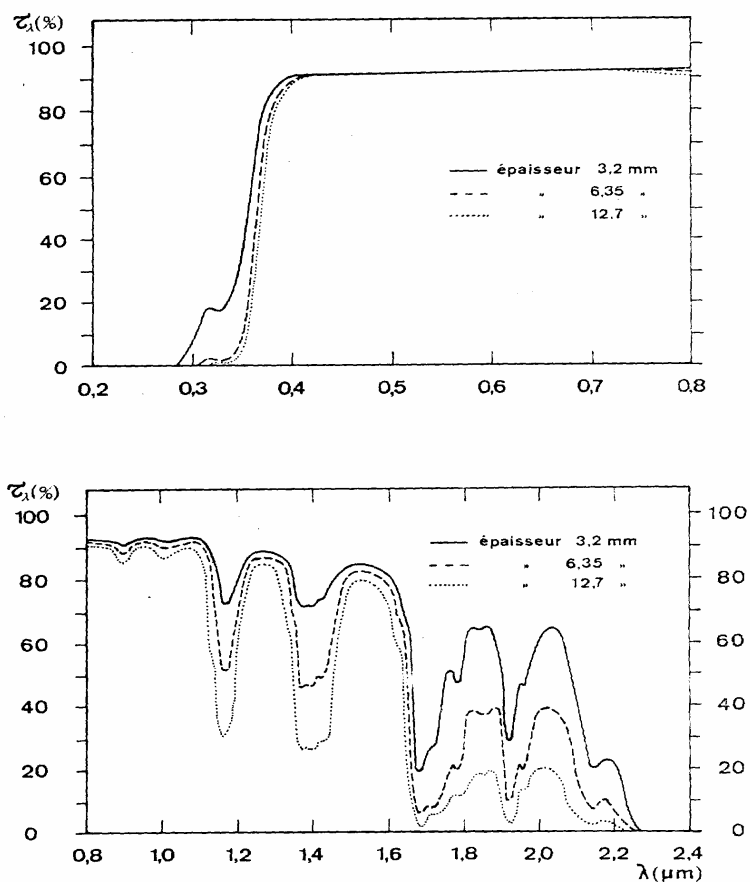


Figure 2.2 Courbes spectrales de transmission du polyméthacrylate de méthyle (échantillon contenant des absorbants ultraviolets) [30]

### - Matériaux plastiques en film

Etant donné leurs très faibles épaisseurs (de l'ordre de 1/10 mm), ces matériaux possèdent, en général, une excellente transparence au rayonnement solaire et une transmission dans l'infrarouge lointain. Seuls, le chlorure de polyvinyle et le polyéthylène vinylacétate assurent, dans une certaine mesure, un effet de serre.

Les polyéthylènes (PE) sont disponibles en faibles épaisseurs et en très grande largeur (12m). Leur transparence est élevée dans les domaines spectraux de 0,4 à 39  $\mu\text{m}$ . Ils ne possèdent pas l'aptitude d'effet de serre sauf traitement spécial ou en présence d'un film d'eau condensé sur sa face inférieure.

Le PE infrarouge dont la transmission du spectre visible est identique à celle du film ordinaire ne laisse passer qu'un faible pourcentage d'infrarouge long, égalant ainsi les propriétés du film PVC classique.

Le Chlorure de polyvinyle (PVC) sous forme de film possède pratiquement les mêmes caractéristiques que celles des plaques à l'exception de la durabilité et du prix.

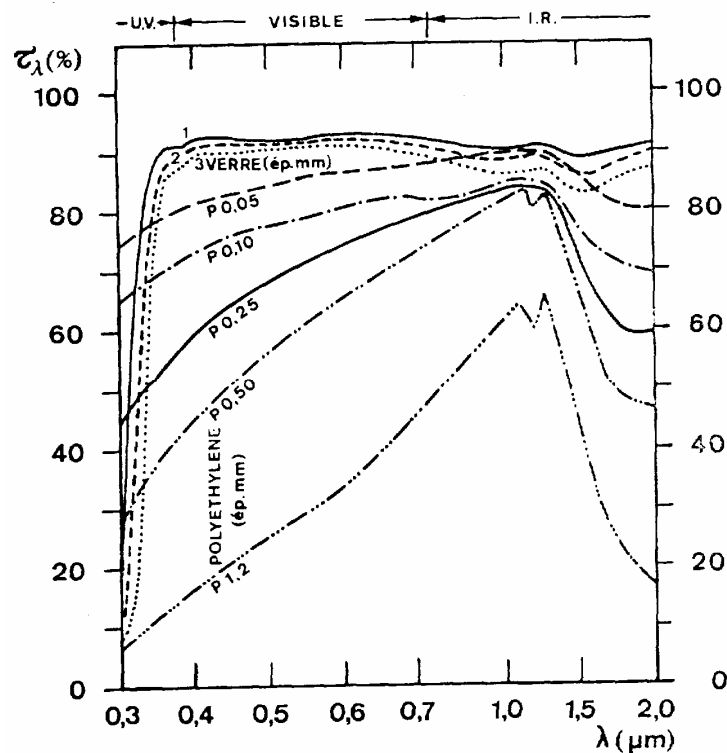


Figure 2.3 Courbes spectrales de transmission (%) du verre ordinaire et d'un polyéthylène avec diverses épaisseurs [30]

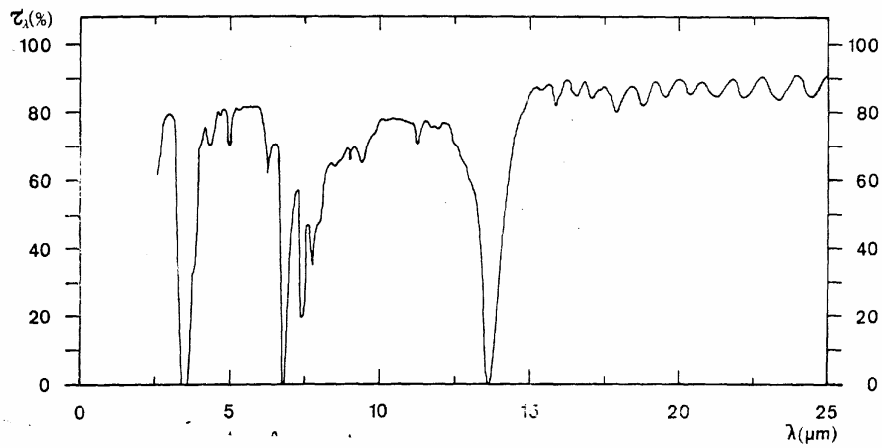


Figure 2.4 Courbes spectrales de transmission de polyéthylène de 0,15mm d'épaisseur, facteur de transmission  $\tau' = 0,729$  dans le domaine de 2,5 à 25  $\mu\text{m}$

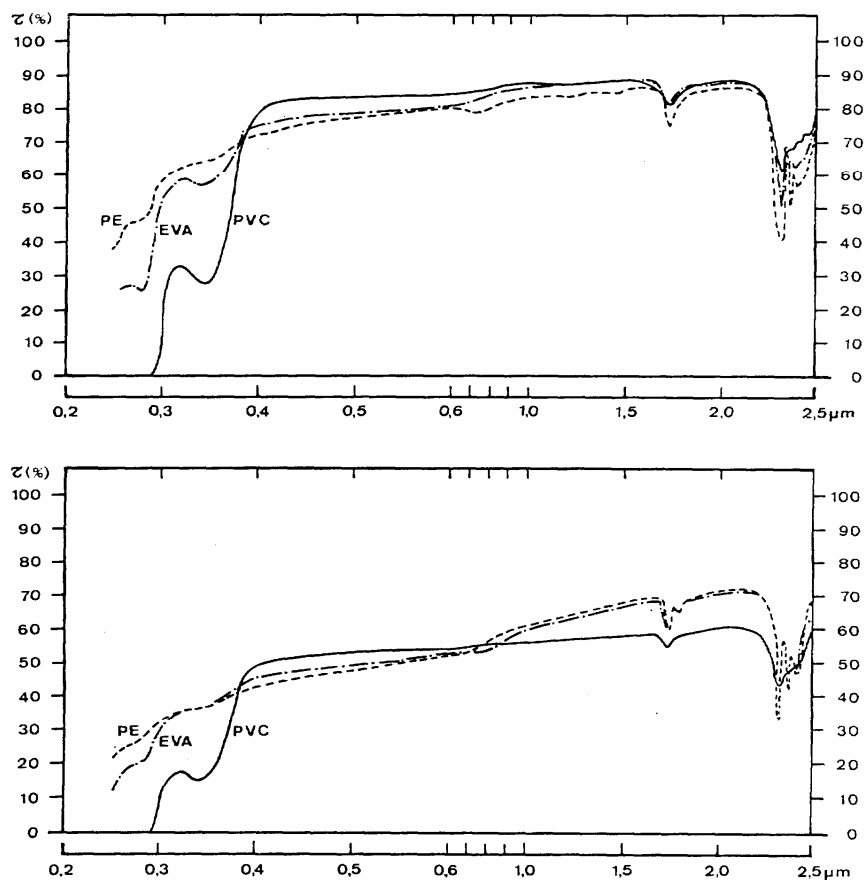


Figure 2.5 Transmission de certains films PVC plastifiés, EVA et PE entre 0,2 et 2,5  $\mu\text{m}$  [30].

- (a) l'état neuf
- (b) après quelques mois d'utilisation sous des conditions méditerranéennes



### - Caractéristiques principales des divers matériaux de couverture

Une approche globale des matériaux de couverture nous amène à relever certaines constatations relatives à leur utilisation, notamment les facteurs qui apparaissent dans le temps au niveau de la paroi de la serre. Les plus importants de ces facteurs et qui influent sur l'effet thermique de la serre sont :

#### ❖ Condensation sur la paroi de la serre

En ce qui concerne la condensation d'eau sur la face intérieure de la serre, l'humidité relative élevée conduit à l'obtention d'un point de rosée qui s'observe dès qu'il y a une diminution de la température externe. La quantité d'eau condensée est pratiquement la même sur la face intérieure de la couverture, alors qu'il n'en est pas le cas sur le mode d'évacuation de cette eau :

- tantôt elle se condense sous forme de gouttelettes qui s'accroissent en volume et tombent sur place.
- tantôt apparaît un film d'eau continue très mince et plus ou moins mobile suivant la forme géométrique et la pente de la couverture.

#### ❖ Salissure de la couverture de la serre

La saleté qui se dépose sur la paroi de la serre consiste en des poussières atmosphériques ainsi qu'en des résidus industriels à base de suie et de mazout provenant notamment des brûleurs utilisés dans l'agriculture. Ce dépôt provoque une perte assez importante de transmission lumineuse et bien entendue une implication sur le rendement de la culture sous serre. Certaines études estiment à 10% la perte moyenne annuelle de lumière dans les conditions normales d'utilisation et davantage encore dans le cas des matériaux à faces non lisses [30].

#### ❖ Vieillissement des matériaux

Parmi les problèmes optiques causés par le vieillissement, nous retenons :

- Le jaunissement du matériau de couverture résultant du déplacement de bandes d'absorption qui apparaissent dans l'ultraviolet (ce jaunissement s'observe notamment chez les polyéthylènes et les chlorures de polyvinyle et peut s'accroître jusqu'à une opacité quasi-totale);

- La microfissuration de la surface exposée au rayonnement solaire qui favorise le caractère diffusant et altère la transparence du matériau.

Ce phénomène de vieillissement est parfaitement illustré sur la figure (2.5). Nous présentons sur la figure 2.6 d'autres courbes de vieillissement de différents matériaux de couverture largement répandus dans les serres [30].

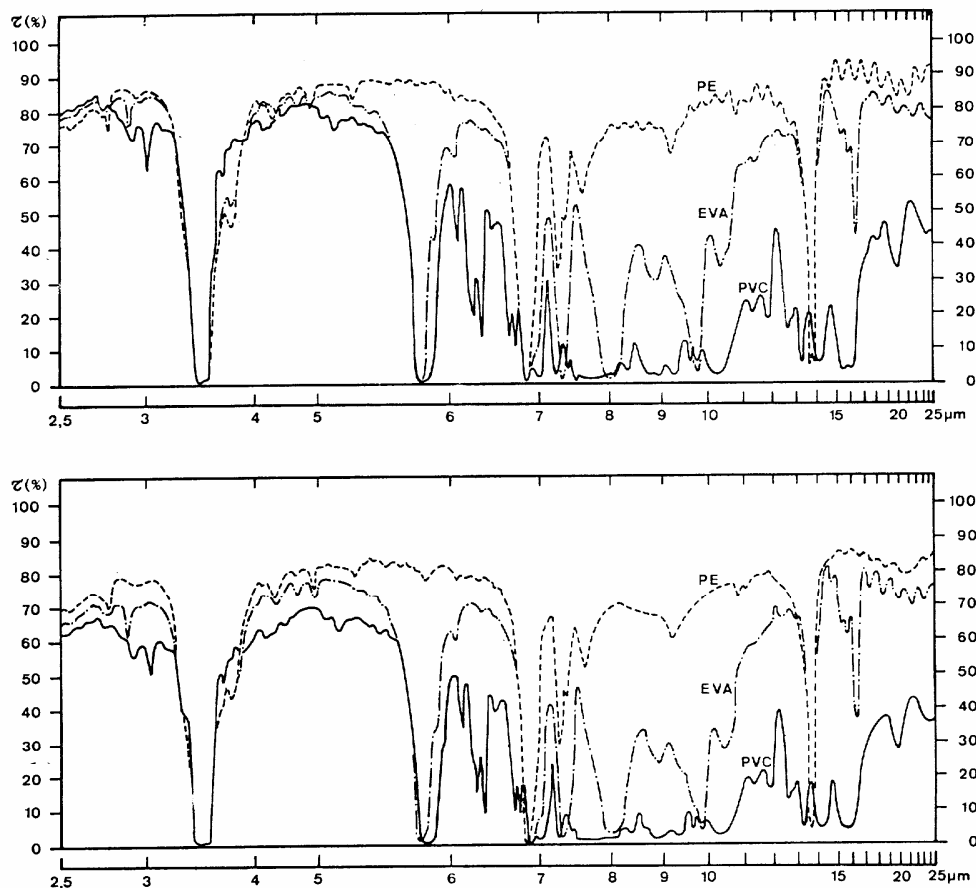


Figure 2.6 Courbes de transmission des films PVC plastifié, EVA et PE entre 2,5 à 25 $\mu$ m à l'état neuf (a) et après quelques mois d'utilisation (b)

D'après certaines études [30], nous retenons la conclusion suivante : l'énergie de rayonnement électromagnétique est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde, ce qui explique que les rayons ultraviolets sont les principaux responsables de l'altération des matériaux.

Les ultraviolets courts sont davantage absorbés par l'atmosphère que les ultraviolets longs. Ces derniers sont les vrais agents de vieillissement des matériaux.

## CHAPITRE 3

### MODELISATION THERMIQUE DE LA SERRE

#### 3.1 Introduction

Nous nous proposons d'étudier le bilan énergétique d'une serre solaire expérimentale (type tunnel équipée d'un lit de galets). Cette dernière est orientée Nord-Sud avec une déviation vers l'Ouest de 20°. Elle est de géométrie régulière et a, dans son sous sol, un système de stockage thermique. Son comportement thermique est simulé par un modèle mathématique basé sur des bilans globaux.

#### 3.2 Principe de base

L'étude de la serre couvre tous les phénomènes physiques mis en jeu dans son fonctionnement. Elle est donc un préalable à l'élaboration d'un modèle mathématique.

Les bilans énergétiques représentent les règles d'évolution du modèle (évolution du système d'état de départ, appelé aussi état initial, à un état final appelé aussi état d'arrivée). Ils traduisent le principe de conservation de l'énergie. Chaque élément du système peut donc être représenté par une équation du bilan d'énergie qui, sous sa forme la plus générale, s'écrit [30] :

$$\text{ENERGIE REÇUE} + \text{ENERGIE GENEREE} = \text{ENERGIE PERDUE} + \text{ENERGIE STOCKEE}$$

La variation d'énergie interne traduit un terme différentiel par rapport au temps. Il caractérise l'inertie de l'élément. C'est l'aptitude de la variable d'état à évoluer rapidement (inertie faible) ou lentement (inertie forte) sous l'action de sollicitations extérieures.

Les échanges énergétiques seront considérés comme étant régis par les lois physiques de transfert : conduction, rayonnement, convection, échange de masse...

Ou encore sous forme mathématique :

$$\sum_e Q_i - \sum_s Q_i = (M.Cp)_i \cdot \frac{dT_i}{dt} \quad (3-1)$$

dans laquelle :

$M_i$  : La masse du nœud  $i$ ;

$Cp_i$  : La chaleur spécifique à pression constante du nœud  $i$  ;

$T_i$  : La variable d'état considérée (température);

### 3.3 Hypothèses simplificatrices

Pour établir un bilan énergétique d'une serre, un certain nombre d'hypothèses simplificatrices peut être considéré, d'une part pour faciliter la mise en équations des échanges énergétiques au niveau de chaque nœud et d'autre part pour avoir une valeur moyenne des températures des nœuds considérés.

Dans cette étude, on a considéré les hypothèses suivantes :

- la vitesse de l'air est uniforme dans le stock en une section donnée ;
- Les pertes thermiques du lit sont négligeables ;
- la conduction dans le sol est unidirectionnelle ;
- l'écoulement dans le stock est monodimensionnel ;
- la température du sol au-delà de 0,7m est constante ;
- le rayonnement solaire diffus est considéré isotrope ;
- la convection naturelle est négligeable dans le stock ;
- l'air de la serre est transparent du point de vue radiatif ;
- la température de l'air intérieur de la serre est uniforme ;
- la pression dans la serre est supposée égale à la pression atmosphérique ;
- les propriétés thermophysiques de l'air et des galets dans le stock sont constantes ;
- Le relevé expérimental des températures sur la paroi (couverture plastique) a révélé un gradient de température de 0,7°C entre les deux faces de la couverture. Ce dernier étant faible, la température de la couverture sera représentée par un seul point ;

- les températures de l'air et des galets sont uniformes sur une section droite normale à l'écoulement ;

### 3.4 Modélisation thermique de la serre

#### 3.4.1 Représentation des composants de la serre

Pour développer un modèle de représentation capable de prédire le comportement dynamique de la serre mono tunnel considéré, nous approchons le fonctionnement réel de cette dernière par l'application de la méthode dite des nœuds (Analyse nodale).

Cette méthode consiste à découper le système en plusieurs sous systèmes (ou nœuds), ensuite à établir les équations générales du bilan de puissances régissant les masses agissant en chacun de ces nœuds en régime variable.

D'une manière générale, quel que soit le dispositif de stockage, les éléments de base à représenter pour construire un modèle du système « serre-stockage » sont les suivants :

- le sol
- le stockage
- la couverture
- le couvert végétal
- l'air ambiant intérieur

L'ensemble des modèles répertoriés repose sur l'écriture de bilans massiques et énergétiques sur ces différents éléments. La modélisation de la serre est basée sur la prise en compte simultanée d'échanges de chaleur et d'échanges de vapeur d'eau, physiquement très couplés.

La serre constitue un système biologique et énergétique complexe dans lequel la plupart des modes d'échange thermique et de masse sont mis en jeu :

- Les apports solaires au travers du matériau de la couverture ;

- Les échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde entre les différents éléments ;
- Les échanges de convection à la surface de la couverture, des plantes et ceux à la surface du sol ;
- L'évaporation au niveau du sol et des plantes ;
- Le renouvellement d'air dû à la perméabilité de la serre.

La figure 3.1 représente schématiquement l'ensemble des éléments à prendre en compte et les différents processus mis en jeu.

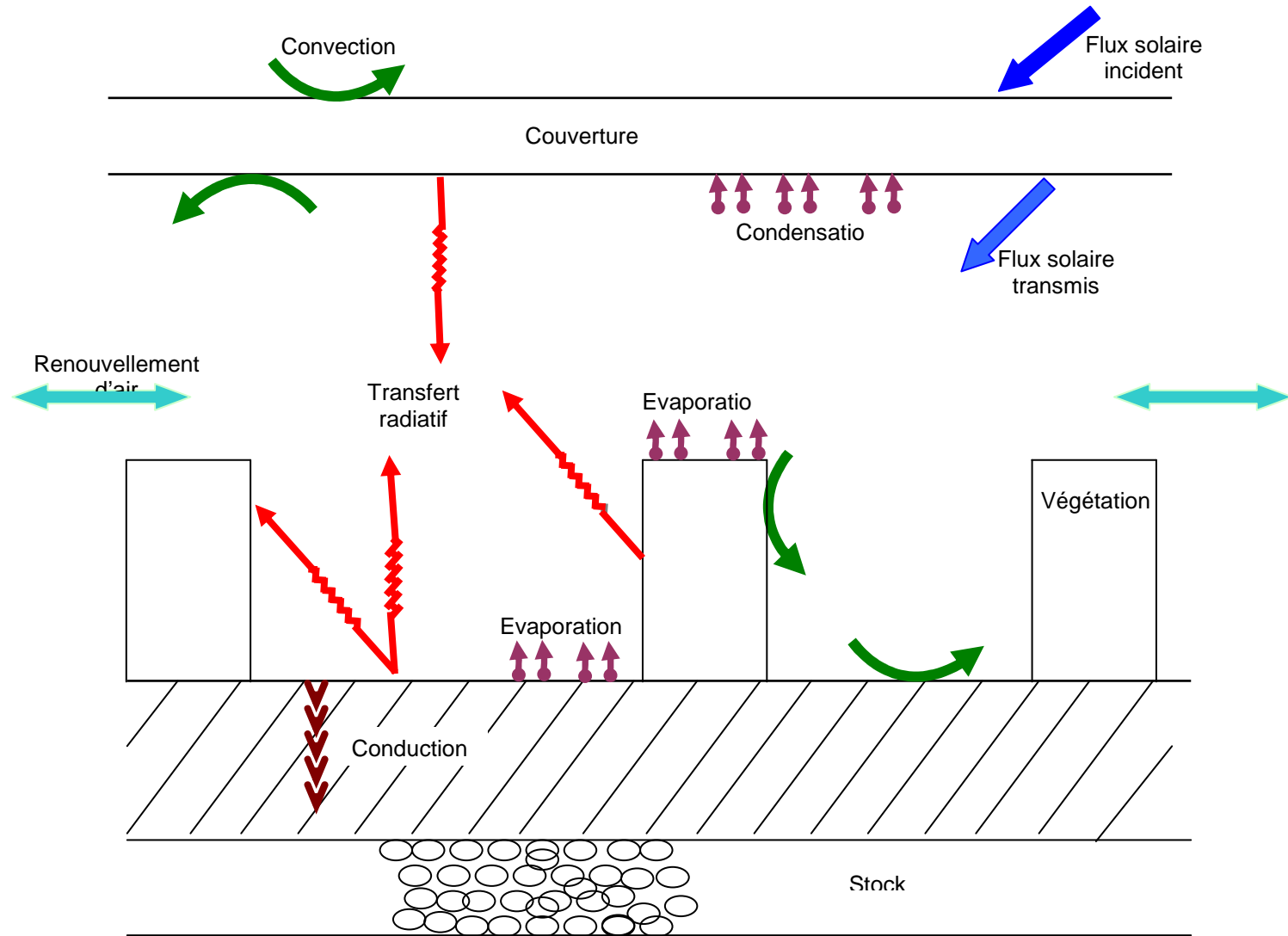


Figure 3.1 Eléments et mécanismes à prendre en compte dans un modèle « serre-stockage »

### 3.4.2 Analyse physique du modèle

Dans ce qui suit, nous allons mettre sous forme d'équations les différents modes de transfert de chaleur et de masse mis en jeu au niveau de la serre, en écrivant le bilan d'énergie pour chacun de ses nœuds (couverture, végétation, sol, stock et air intérieur).

#### 3.4.2.1 Bilan thermique au niveau de la couverture

Pour le calcul de la puissance solaire et les flux de chaleur convectifs échangés par la couverture, nous assimilons la section de la serre à un demi-cercle de diamètre  $D$ , découpé en un certain nombre de plans de surfaces égales et assimilées à des plans inclinés d'un angle  $\phi_i$  par rapport à l'horizontal.

L'inclinaison du plan  $i$  :

$$\phi_i = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} \left( i - \frac{1}{2} \right)$$

$m$  : le nombre de segments de la couverture ( $m = 5$ ).

La figure 3.2 représente un volume de contrôle délimitant une des plaques avec ses différents échanges thermiques.

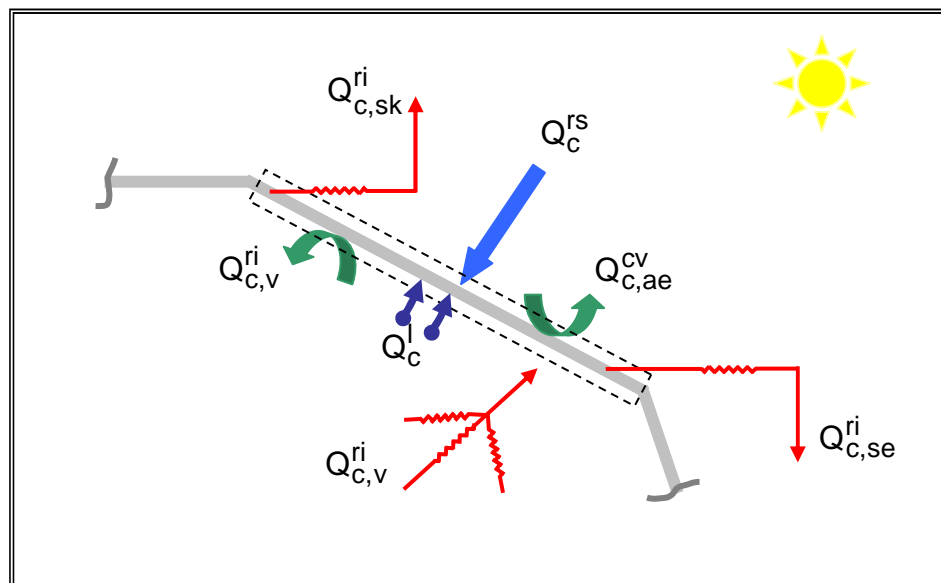


Figure 3.2 Schéma représentant le bilan de puissance du nœud de couverture



L'équation du bilan de puissance de conservation d'énergie au niveau de la couverture s'écrit comme suit :

$$Q_C^{rs} + Q_C^{ri} + Q_C^{cv} + Q_C^l = 0 \quad (3-2)$$

► *Expression de la puissance radiative solaire absorbée par la couverture*

En négligeant le phénomène de multireflexion, l'expression de la puissance solaire atteignant la couverture de la serre peut être donnée par :

$$Q_C^{rs} = RA_C + RR_C + RA_V \quad (3-3)$$

- Le terme «  $RA_C$  » représentant la puissance solaire absorbée par la couverture de l'extérieur est égale à :

$$RA_C = \sum_{i=1}^5 ID \cdot \cos(\theta_i) \cdot \alpha_c(\theta_i) \cdot A_C + Idh \cdot F_{c,sk} \cdot \alpha_c(60) \cdot A_C + alb \cdot (IDh + Idh) \cdot F_{c,se} \cdot \alpha_c(60) \cdot A_C \quad (3-4)$$

Dans laquelle :

ID : densité du flux solaire direct incident suivant la normale à la surface de la plaque ;

Idh : densité du flux solaire direct reçu sur un plan horizontal ;

Idh : densité du flux solaire diffus reçus sur un plan horizontal ;

$\theta_i$  : angle d'incidence du rayonnement solaire direct sur la couverture ;

alb : albédo du sol ;

$A_C$  : surface de la couverture ;

- le terme «  $ID \cdot \cos(\theta_i) \cdot \alpha_c(\theta_i) \cdot A_C$  » représente la puissance solaire directe absorbée par la couverture et exprimé par son absorptivité au rayonnement solaire direct  $\alpha_c(\theta_i)$  qui dépend de l'angle d'incidence  $\theta_i$ .

- le terme «  $Idh.F_{c,sk}.\alpha_c(60).A_c$  » représente la puissance solaire diffuse provenant de la voûte céleste absorbée par la couverture et exprimée par le facteur de forme  $F_{c,sk}$  et l'absorptivité  $\alpha_c(60)$ .
- le terme «  $alb.(IDh + Idh).F_{c,se}.\alpha_c(60).A_c$  » représente la puissance solaire globale diffuse réfléchiée par le sol extérieur et absorbée par la couverture.
- Le terme «  $RR_c$  » représente la puissance solaire reçue par la couverture d'elle-même. Il est donnée par :

$$RR_c = \alpha(60).F_{cc}.RT_c \quad (3-5)$$

avec :

$F_{cc}$  : facteur de forme couverture-couverture ;

$RT_c$  : puissance solaire transmise par la couverture. On peut l'exprimer sous la forme :

$$RT_c = \sum_{i=1}^5 ID.\cos(\theta_i).\tau_c(\theta_i).A_c + Idh.F_{c,sk}.\tau_c(60).A_c + alb.(IDh + Idh).F_{c,sk}.\tau_c(60).A_c \quad (3-6)$$

- Le terme «  $RA_v$  » représente la puissance solaire qui arrive de la végétation.

$$RA_v = \alpha(60).\gamma_v.RT_c \quad (3-7)$$

► *Expression de la puissance radiative thermique échangée par la couverture*

La couverture de la serre échange de la chaleur par rayonnement de grandes longueurs d'onde vers l'extérieur (avec la voûte céleste et le sol extérieur) et vers l'intérieur (avec les différents autres nœuds de la serre).

$$Q_c^{ri} = Q_{c,sk}^{ri} + Q_{c,se}^{ri} + Q_{c,v}^{ri} \quad (3-8)$$

- Le terme,  $Q_{c,sk}^{ri}$ , représentant le rayonnement échangé avec le ciel, est exprimé par :

$$Q_{c,sk}^{ri} = h_{c,sk}^r \cdot A_c \cdot (T_{sk} - T_c) \quad (3-9)$$

$h_{c,sk}^r$  : coefficient d'échange radiatif équivalent entre la couverture et le ciel;

$T_{sk}$  : température équivalente de la voûte céleste;

$T_c$  : température de la couverture;

- Le terme  $Q_{c,se}^{ri}$  représentant le rayonnement échangé avec le sol extérieur est exprimé par :

$$Q_{c,se}^{ri} = h_{c,se}^r \cdot A_c \cdot (T_{se} - T_c) \quad (3-10)$$

$h_{c,se}^r$  : coefficient d'échange radiative équivalent entre la couverture et le sol extérieur ;

$T_{se}$  : température du sol extérieur avoisinant ;

- Le terme  $Q_{c,v}^{ri}$  représentant le rayonnement échangé avec la végétation est exprimé par :

$$Q_{c,v}^{ri} = h_{c,v}^r \cdot A_s \cdot (T_c - T_v) \quad (3-11)$$

$h_{c,v}^r$  : coefficient d'échange par rayonnement équivalent entre la couverture et la plante ;

$T_v$  : température au niveau de la surface du végétal ;

► *Expression de la puissance convective échangée par la couverture*

La couverture s'échauffe et devient assimilable à des parois chaudes dont les faces extérieure et intérieure échangent de l'énergie thermique par convection, respectivement avec l'air extérieur et l'air intérieur de la serre.

Si la convection entre la face extérieure de la couverture et l'ambiance est supposée mixte (naturelle + forcée); la puissance convective échangée peut être exprimée par :

$$Q_{c,ae}^{cv} = h_{c,ae}^{cv} \cdot A_c \cdot (T_{ae} - T_c) \quad (3-12)$$

$h_{c,ae}^{cv}$  : Coefficient global d'échange par convection mixte entre la couverture et l'air extérieur ;

$A_c$  : Surface d'échanges de la couverture.

Pour une serre bien étanche et non ventilée, la convection à l'intérieur est supposée naturelle car elle est générée par l'écart de densité de l'air [18], donc de température de l'air intérieur et celle des surfaces intérieures de la couverture ; d'où sa puissance est donnée par :

$$Q_{c,ai}^{cv} = h_{c,ai}^{cv} \cdot A_c \cdot (T_{ai} - T_c) \quad (3-13)$$

$h_{c,ai}^{cv}$  : Coefficient d'échange par convection naturelle entre l'air intérieur et la couverture ;

► *Expression de puissance par chaleur latente*

Dans notre étude, nous avons considéré le phénomène de condensation sur la paroi de l'enceinte. Le flux échangé s'écrit :

$$Q_c^l = \zeta_e \sum_{j=1}^5 h_{e_j}^l \cdot A_{c_j} \cdot (H_{ae} - H_s(T_c)) + \zeta_i \sum_{j=1}^5 h_{i_j}^l \cdot A_{c_j} \cdot (H_{ai} - H_s(T_c)) \quad (3-14)$$

$\zeta_e$  et  $\zeta_i$  sont des coefficients qui permettent de ne prendre le flux en considération que s'il y a condensation sur la couverture de la serre.

$$\begin{aligned} \zeta_i = 1 & \text{ si } Hai > Hs(T_c) & ; & \quad \zeta_i = 0 & \text{ si } Hai < Hs(T_c) \\ \zeta_e = 1 & \text{ si } Hae > Hs(T_c) & ; & \quad \zeta_e = 0 & \text{ si } Hae < Hs(T_c) \end{aligned}$$

### 3.4.2.2 Bilan thermique au niveau de la végétation

$$(M.Cp)_v \frac{dT_v}{dt} = Q_v^l + Q_v^{cv} + Q_v^{rs} + Q_v^{ri} \quad (3-15)$$

Où :

- Le premier terme du membre de droite représente le flux de chaleur échangé par chaleur latente ;

$$Q_v^l = h_v^l . A_v . (Hai - Hs(T_v)) \quad (3-16)$$

$h_v^l$  : coefficient d'échange par évapotranspiration pour la végétation ;

- Le second terme du membre de droite représente le flux de chaleur échangé par convection entre la plante et l'air intérieur ;

$$Q_v^{cv} = h_v^{cv} . A_v . (T_{ai} - T_v) \quad (3-17)$$

$h_v^{cv}$  : coefficient d'échange par convection ;

- Le troisième terme du membre de droite représente la puissance solaire absorbée par la végétation ;

$$Q_v^{rs} = \alpha_v . RT_c . \chi \quad (3-18)$$

dans laquelle :

$\alpha_v$  : absorptivité de la végétation ;

$\chi$  : fraction du surface ;

- Le dernier terme du membre de droite représente le rayonnement infrarouge échangé par la végétation ;

$$Q_V^{ri} = Q_{V,c}^{ri} + Q_{V,s}^{ri} + Q_{ex,in}^{ri} \quad (3-19)$$

avec :

$Q_{V,c}^{ri}$  : rayonnement infrarouge échangé entre la couverture et le végétal ;

$$Q_{V,c}^{ri} = h_{c,v}^r \cdot A_v \cdot (T_c - T_v) \quad (3-20)$$

$Q_{V,s}^{ri}$  : rayonnement infrarouge échangé entre le sol et le végétal ;

$$Q_{V,s}^{ri} = h_{v,s}^r \cdot A_v \cdot (T_s - T_v) \quad (3-21)$$

$Q_{ex,in}^{ri}$  : rayonnement infrarouge qui provient de l'extérieur et traverse la couverture ;

$$Q_{ex,in}^{ri} = \sigma \cdot \tau \cdot \alpha_v \cdot (F_{c,sk} \cdot T_{sk}^4 + F_{c,se} \cdot T_{se}^4) \quad (3-22)$$

#### 3.4.2.3 Bilan thermique au niveau du sol

Le sol intérieur constitue l'essentiel de la masse thermique de la serre ; En effet, c'est l'élément prédominant de stockage, suite à sa grande inertie thermique qui tend à stabiliser la température à l'intérieur de la serre.

Dans notre cas, on a traité le sol avec végétation, donc il est carrément le siège de chaleur sensible par rayonnement, convection et conduction et par chaleur latente. La figure 3.3 montre les échanges thermiques effectués au niveau du sol intérieur.

Compte tenu des différents échanges thermiques effectués par le sol intérieur, l'équation du bilan de puissance au niveau de ce nœud prend la forme suivante :

$$(M.Cp)_s \frac{dT_s}{dt} = Q_s^{cv} + Q_s^{cd} + Q_s^{rs} + Q_s^{ri} + Q_s^l \quad (3-23)$$

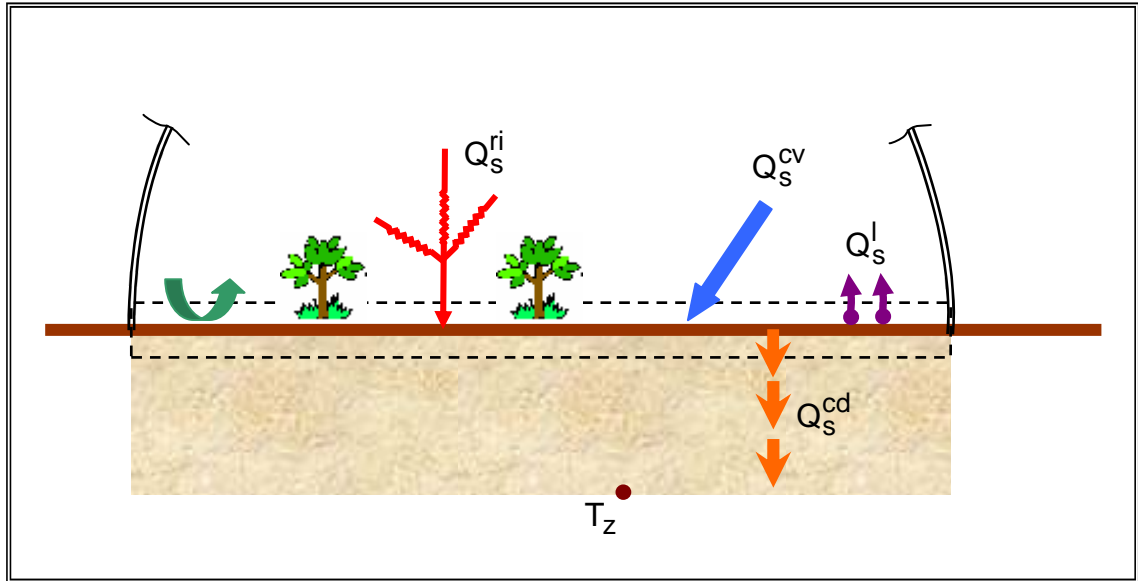


Figure 3.3 Schéma représentant le bilan de puissance au niveau du sol

► *Expression de la puissance radiative solaire absorbée par le sol*

Le flux thermique peut être écrit comme suit :

$$Q_s^{rs} = I_d h_c \tau_c \alpha_s \chi A_s \quad (3-24)$$

- Le terme «  $Q_s^{rs}$  » représente la puissance solaire directe absorbée par le sol intérieur après transmission à travers la couverture de l'enceinte ;

► *Expression de la puissance radiative thermique échangée par le sol*

$$Q_s^{ri} = h_{s,v}^r A_s (T_v - T_s) + h_{s,c}^r A_s (T_c - T_s) \quad (3-25)$$

$T_s$  : température à la surface du sol

$h_{s,c}^r$  : coefficient d'échange par rayonnement entre la couverture et le sol ;

$h_{s,v}^r$  : coefficient d'échange par rayonnement entre le sol et le couvert végétal ;

► *Expression de la puissance convective échangée par le sol*

Le sol à l'intérieur de la serre échange de la chaleur par convection avec l'air intérieur environnant et le flux convectif échangé s'écrit sous la forme suivante :

$$Q_S^{cv} = h_S^{cv} \cdot A_S \cdot (T_{ai} - T_S) \quad (3-26)$$

$h_S^{cv}$  : coefficient d'échange par convection entre le sol et l'air intérieur ;

► *Expression du flux de chaleur latente*

$$Q_S^l = h_S^l \cdot A_S \cdot (H_{ai} - H_s(T_S)) \quad (3-27)$$

$h_S^l$  : coefficient d'échange par évaporation de la surface du sol ;

► *Expression de la puissance conductive échangée par le sol*

$$Q_S^{cd} = k_S \cdot A_S \cdot \left( \frac{T_Z - T_S}{Z} \right) \quad (3-28)$$

$k_S$  : coefficient de conduction du sol ;

$T_Z$  : température du sol à une profondeur de Z ;

► *Modélisation de la température du sol*

L'analyse de la température du sol se fera à l'aide d'un modèle mathématique de conduction en régime périodique (Annexe C) dont nous justifierons les hypothèses à priori et dont nous vérifierons les résultats par comparaison avec les mesures expérimentales.

Une fois justifié, l'évolution en fonction du temps de la température de la surface du sol ( $T_S$ ) sera supposée connue, et de ce fait, injectée dans le système d'équations régissant le fonctionnement de la serre.



### Loi de variation de la température dans le sol

Les variations périodiques des flux radiatifs à la surface y déterminent des variations de température dont l'extension vers la profondeur obéit à l'équation générale de la propagation des phénomènes périodiques avec amortissement. A tout instant t, la température du sol  $T(y,t)$  à la profondeur z se déduit de l'équation suivante [31] :

$$T(y,t) = T_m + T_0 \cdot \text{Re}(e^{[i\omega t - \delta y]}) \quad (3-29)$$

La température à la surface du sol  $T_s$  s'écrit donc :

$$T_s = T(0,t) = T_m + T_0 \cdot \text{Re}(e^{i\omega t}) \quad (3-30)$$

avec 
$$\delta = \sqrt{\frac{i\omega}{a}} = \frac{1+i}{D} \quad (3-31)$$

$T_m$  : température moyenne de la période considérée ;

$T_0$  : amplitude de la variation de la température à la surface du sol ;

$\omega$  : pulsation du phénomène de période  $Pe$  ;  $\omega = \frac{2\pi}{Pe}$

$a$  : diffusivité thermique du sol ;  $a = \frac{k_s}{\rho_s \cdot Cp_s}$

$k_s$  : conductivité thermique du sol

$Cp_s$  : chaleur spécifique

$\rho_s$  : densité du sol

$D$  : profondeur d'amortissement, variable selon les propriétés du sol et de la périodicité du phénomène considéré  $D = \sqrt{\frac{2 \cdot a}{\omega}}$

### Caractéristique thermique de la terre

Les différentes sources bibliographiques [31/15/32], qui donnent des valeurs caractéristiques thermiques de la terre (conductivité  $k$  ; chaleur spécifique  $C_p$  ; masse volumique  $\rho$ ) ne s'accordent pas les unes aux autres à cause de l'hétérogénéité des sols. En particulier, ces trois grandeurs varient fortement en fonction de la densité et surtout de l'humidité.

Type du sol	Conductivité thermique ( $W/m^2K$ )	Chaleur spécifique ( $J/kgK$ )	Masse volumique ( $kg/m^3$ )
Argile	1,1	2100	1700
Sable	2,9	700	2000
Terre à 10% humidité	1,8	1083	1680

Tableau 3.1 Caractéristiques thermiques des sols

Nous pouvons tracer les courbes issues de l'équation (3.29) pour les profondeurs 10 cm, 20 cm, 50 cm et 100 cm de façon à ce qu'elles permettent une comparaison des courbes expérimentales.

### 3.4.2.4 Bilan thermique au niveau de l'air intérieur

L'air intérieur est caractérisé par une variable d'état : sa température. L'hypothèse d'uniformité volumique de la variable d'état a été admise par souci de simplification. Il faut cependant garder à l'esprit le fait que, dans la réalité, un gradient de température pourrait apparaître au niveau vertical entre le haut et le bas de la serre (résultat d'expérience), ou même au niveau horizontal entre une extrémité et une autre de la serre. La température de l'air ainsi définie doit être considérée comme une valeur moyenne conduisant aux mêmes effets globaux.

L'air de la serre échange de la chaleur sensible d'une part, par convection avec la couverture, le couvert végétal, le stockage et le sol de la serre, et d'autre part, par fuites avec l'air extérieur.

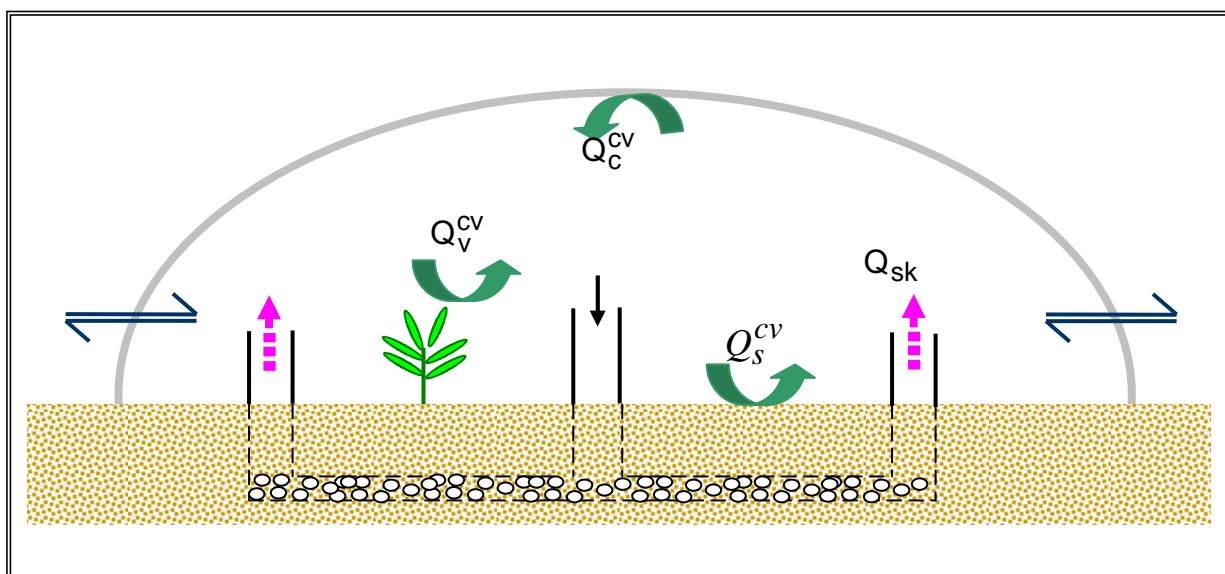


Figure 3.4 Représentation schématique de la serre avec ses différents nœuds

Le bilan thermique de l'air intérieur de la serre s'écrit comme suit :

$$(MCp)_{ai} \frac{dT_{ai}}{dt} = Q_{sk} - Q_S^{cv} - Q_V^{cv} - Q_C^{cv} + Q_{ai,ae}^m \quad (3-32)$$

► *Echange de chaleur sensible par convection*

Les expressions de ces puissances sont déduites :

$$Q_s^{cv} = h_s^{cv} \cdot A_s \cdot (T_{ai} - T_s) \quad \text{pour sol intérieur ;}$$

$$Q_v^{cv} = h_v^{cv} \cdot A_v \cdot (T_{ai} - T_v) \quad \text{pour végétation ;}$$

$$Q_{c,ai}^{cv} = h_{c,ai}^{cv} \cdot A_c \cdot (T_{ai} - T_c) \quad \text{pour couverture ;}$$

► *Echange de chaleur sensible par renouvellement d'air*

Le renouvellement de l'air se fait grâce aux fuites, aux ouvertures et aux extracteurs (ventilation dynamique).

Dans notre modèle, on considère que les échanges avec l'air extérieur ne se font que par les fuites ; dans ce cas la puissance échangée s'exprime par la relation :

$$Q_{ai,ae}^{rn} = \rho \cdot V \cdot C_p \cdot Rn \cdot (T_{ae} - T_{ai}) \quad (3-33)$$

$Rn$  : Taux de renouvellement d'air.

► *Echange de chaleur avec le stockage*

$$Q_{sk} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{f,out} - T_{f,int}) \quad (3-34)$$

$\dot{m}$  : Débit massique de l'air ;

$C_p$  : Chaleur spécifique de l'air ;

$T_{f,out}$  : Température de l'air à la sortie du stock ;

$T_{f,int}$  : Température de l'air à l'entrée du stock ;

### 3.4.2.5 Bilan thermique au niveau du stock

#### - Phase fluide

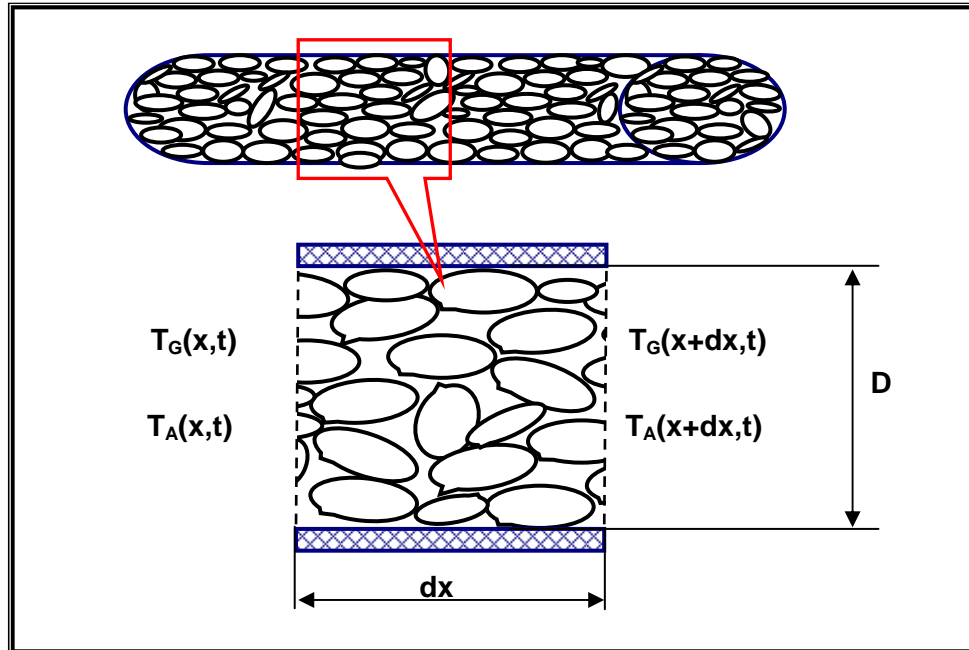


Figure 3.5 Un élément de volume du stock

Examinons un élément de volume du stock de longueur  $dx$ , pendant le temps  $dt$ .

La quantité de chaleur reçue par l'air au contact des galets est :

$$dQ = M_A \cdot c_{pA} \frac{dT_A(x,t)}{dt} \cdot dt \quad (3-35)$$

Où :

$$M_A = \rho_A \cdot V_{st} \cdot P$$

$\frac{dT_A(x,t)}{dt}$  est la dérivée totale définie par :

$$\frac{dT_A(x,t)}{dt} = \frac{\partial T_A(x,t)}{\partial t} + U_{st} \cdot \frac{\partial T_A(x,t)}{\partial x} \quad (3-36)$$

$U_{st}$  est la vitesse de l'air à l'intérieur du stock en [m/s]

$$\text{Alors : } dQ = \rho_A \cdot V_{st} \cdot P \cdot Cp_A \left[ \frac{\partial T_A(x,t)}{\partial t} + U_{st} \cdot \frac{\partial T_A(x,t)}{\partial x} \right] \quad (3-37)$$

Cette quantité de chaleur  $dQ$  peut aussi s'exprimer en fonction du coefficient global de transfert air-galets.

$$dQ = h_G \cdot A_{G,A} [T_G(x,t) - T_A(x,t)] dt \quad (3-38)$$

D'où on aura l'expression suivante :

$$\rho_A \cdot V_{st} \cdot P \cdot Cp_A \left[ \frac{\partial T_A(x,t)}{\partial t} + U_{st} \cdot \frac{\partial T_A(x,t)}{\partial x} \right] = h_G \cdot A_{G,A} \cdot [T_G(x,t) - T_A(x,t)] \quad (3-39)$$

#### - Phase solide

On fait le même raisonnement pour les galets. Si on considère toujours un élément de volume, la quantité de chaleur cédée par les galets est donnée par :

$$dQ = M_G \cdot Cp_G \frac{dT_G(x,t)}{dt} \quad (3-40)$$

$$M_G = \rho_G \cdot V_{st} \cdot (1 - P) \cdot Cp_G$$

Cette quantité de chaleur est également équivalente à la quantité échangée avec l'air par convection, on aura :

$$dQ = h_G \cdot A_{G,A} [T_A(x,t) - T_G(x,t)] dt \quad (3-41)$$

D'où on aura l'expression suivante :

$$\rho_G \cdot V_{st} \cdot (1 - P) \cdot Cp_G \left[ \frac{\partial T_G(x,t)}{\partial t} \right] = h_G \cdot A_{G,A} \cdot [T_A(x,t) - T_G(x,t)] \quad (3-42)$$

### 3.5 Formulation du système d'équations

Les flux thermique du modèle sont exprimés en fonction des inconnues potentielles. La formulation consiste à définir le bilan global avec les variables d'état de chaque élément et l'ensemble des paramètres utilisés dans le modèle.

<p><i>Bilan d'énergie sur la couverture</i></p> $Q_C^{rs} + Q_C^{ri} + Q_C^{cv} + Q_C^l = 0$
<p><i>Bilan d'énergie sur la végétation</i></p> $(M.Cp)_v \frac{dT_v}{dt} = Q_v^l + Q_v^{cv} + Q_v^{rs} + Q_v^{ri}$
<p><i>Bilan d'énergie sur la surface du sol</i></p> $(M.Cp)_s \frac{dT_s}{dt} = Q_s^{cv} + Q_s^{cd} + Q_s^{rs} + Q_s^{ri} + Q_s^l$
<p><i>Bilan d'énergie sur l'air intérieur</i></p> $(MCp)_{ai} \frac{dT_{ai}}{dt} = Q_{sk} - Q_s^{cv} - Q_v^{cv} - Q_c^{cv} + Q_{ai,ae}^{rn}$
<p><i>Bilan d'énergie sur le stock (phase fluide)</i></p> $\rho_A \cdot V_{st} \cdot P \cdot Cp_A \left[ \frac{\partial T_A(x,t)}{\partial t} + U_{st} \cdot \frac{\partial T_A(x,t)}{\partial x} \right] = h_G \cdot A_{G,A} \cdot [T_G(x,t) - T_A(x,t)]$
<p><i>Bilan d'énergie sur le stock (phase solide)</i></p> $\rho_G \cdot V_{st} \cdot (1-P) \cdot Cp_G \left[ \frac{\partial T_G(x,t)}{\partial t} \right] = h_G \cdot A_{G,A} \cdot [T_A(x,t) - T_G(x,t)]$

Tableau 3.2 Formulation du système d'équations du modèle

### 3.6 Paramètres intervenant dans le bilan de puissance

Le bilan des échanges thermiques au sein du système étudié fait intervenir plusieurs grandeurs intrinsèques à la serre dont la détermination est indispensable à la modélisation.

Dans cette étude, nous allons expliciter ces grandeurs et définir le choix des modèles adaptés.

#### 3.6.1 Grandeurs concernant la radiation solaire

L'évaluation des flux de rayonnement solaire reçu par les différentes parois de la serre nécessite la connaissance du gisement au niveau du site de construction de la serre.

Pour cela un certain nombre de paramètres qui permettent la détermination précise de la position du soleil dans le ciel et son mouvement apparent par rapport au site doivent être calculés (voir annexe A).

Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie (A.S.A) [33], Capderou donna un modèle d'estimation du rayonnement direct, diffus et global par un ciel clair.

- *Irradiation reçue sur un plan horizontal par ciel clair*

Le rayonnement solaire direct reçu sur un plan horizontal est défini par l'expression suivante [33] :

$$IDh = I_0 \cdot C \cdot \sin(h) \cdot \exp\left(-X_L \left(0.9 + \frac{9.4}{0.89^Z} \sin(h)\right)^{-1}\right) \quad (3-43)$$

avec :

$I_0$  : constante solaire = 1367 W/m<sup>2</sup> ;

C : correction de la distance terre - soleil ;

h : hauteur du soleil ;

Z : l'altitude de lieu ;

$X_L$  : facteur de troubles atmosphériques de Linke (voir annexe A) ; il est donné par :



$$X_L = X_0 + X_1 + X_2 \quad (3-44)$$

Le flux diffus sur une surface horizontale sera donc donné par la formule suivante [33] :

$$I_{dh} = I_0.C. \exp \left[ -1 + 1,06. \log(\sin(h)) + a - \sqrt{a^2 + b^2} \right] \quad (3-45)$$

Avec

$$a = 1,1$$

$$b = \log(X_L - X_0) - 2,8 + 1,02[1 - \sin(h)]^2$$

- *Irradiation reçue sur un plan incliné*

Nous écrivons le flux solaire direct incident normale à la surface de la plaque, de la manière suivante [33] :

$$ID = I_0.C. \exp \left( -X_L \left( 0,9 + \frac{9,4}{0,89^Z} \sin(h) \right)^{-1} \right) \quad (3-46)$$

Le rayonnement direct sur un plan d'azimut « a » et de pente « φ » est calculé à l'aide de l'expression suivante :

$$ID_\theta = ID \cos(\theta) \quad (3-47)$$

Où  $\theta$  est l'angle d'incidence des rayons solaires sur le plan considéré.

Pour une surface d'un plan incliné d'un angle  $\varphi$  par rapport à l'horizontal, le rayonnement diffus reçu est constitué en partie par ce qui est émis par la voûte céleste et en partie par le flux solaire total réfléchi par le sol.

Le rayonnement solaire diffus reçu par le plan est donc [33] :

$$I_d = I_{d_{ciel}} + I_{d_{sol}} \quad (3-48)$$

avec :

$I_{d_{ciel}}$  : le rayonnement diffus incident en provenance du ciel ;

$I_{d_{sol}}$  : le rayonnement diffus incident en provenance du sol ;

Le détail des relations reprises par Capderou est en annexe A.

- *Rayonnement global reçu par la surface de la couverture*

$$I_g = \sum_{j=1}^5 [I_{D_j} \cdot \cos(\theta_j) + I_d] \quad (3-49)$$

### 3.6.2 Grandeurs concernant la radiation thermique

Les coefficients d'échange par rayonnement infrarouge qui apparaissent dans les expressions de la puissance radiative thermique sont définis à partir de la méthode du bilan net appliquée pour deux surfaces grises et diffuses [14].

- *Coefficient d'échange radiatif entre deux nœuds i et j de la serre*

Le coefficient d'échange par rayonnement de grandes longueurs d'onde est défini par :

$$h_{i,j}^r = \sigma \cdot \bar{F}_{i,j} \cdot (T_i^2 + T_j^2) \cdot (T_i + T_j) \quad (3-50)$$

Dans laquelle :

$\sigma$  : constante de Stefan Boltzmann =  $5,67 \cdot 10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>];

$T_i$  : température du nœud i ;

$T_j$  : température du nœud j ;

$\bar{F}_{ij}$  : facteur de forme gris entre le nœud i et le nœud j de la serre, qui s'écrit

comme suit :

$$\bar{F}_{ij} = \frac{1}{\frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_i} + \frac{1}{F_{ij}} + \frac{1-\varepsilon_j}{\varepsilon_j} \cdot \frac{A_i}{A_j}} \quad (3-51)$$

$\varepsilon_i$  : émissivité de la surface du nœud i ;

$\varepsilon_j$  : émissivité de la surface du nœud j ;

$A_i$  : surface du nœud i ;

$A_j$  : surface du nœud j.

- *Coefficient d'échange radiatif entre la couverture et le ciel*

La surface de la couverture de la serre étant négligeable devant celle du ciel, le coefficient d'échange radiatif entre la voûte céleste et la couverture se définit comme suit :

$$h_{c,sk}^r = \frac{\sigma \cdot (T_c^2 + T_{sk}^2) \cdot (T_c + T_{sk})}{\frac{1 - \varepsilon_c}{\varepsilon_c} + \frac{1}{F_{c,sk}}} \quad (3-52)$$

avec  $F_{c,sk}$  : facteur de forme noir entre la couverture et le ciel ;

$T_{sk}$  : température apparente du ciel ;

- *Coefficient d'échange radiatif entre la couverture et le sol extérieur*

Le coefficient d'échange radiatif entre la couverture et le sol extérieur est calculé d'une façon similaire au précédent et s'écrit :

$$h_{c,se}^r = \frac{\sigma \cdot (T_c^2 + T_{se}^2) \cdot (T_c + T_{se})}{\frac{1 - \varepsilon_c}{\varepsilon_c} + \frac{1}{F_{c,se}}} \quad (3-53)$$

avec  $F_{c,se}$  : facteur de forme noir entre la couverture et le sol extérieur ;

$T_{se}$  : température du sol extérieur.

- *Facteur de forme entre la surface de la couverture et le ciel*

La surface du ciel est considérée comme étant infinie, ce qui donne l'expression de  $F_{C,sk}$  suivante :

$$F_{C,sk} = \frac{1 + \cos(\varphi_i)}{2} \quad (3-54)$$

$\varphi_i$  : angle d'inclinaison de la surface de la paroi  $i$  de la serre par rapport à l'horizontale, (voir figure 3.6)

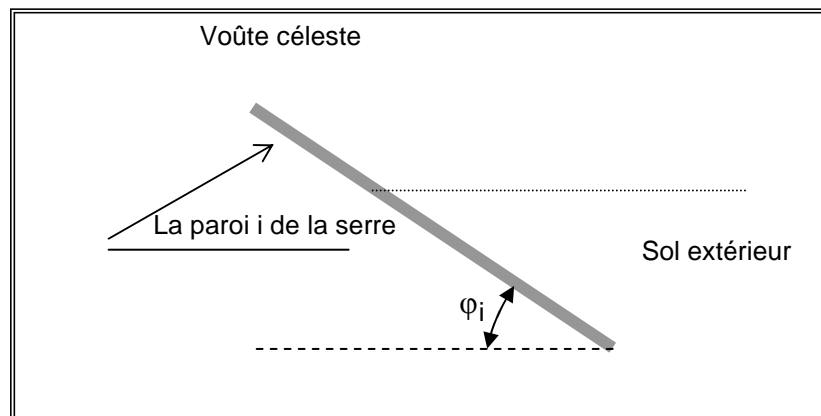


Figure 3.6 Schéma représentant une paroi inclinée de la serre

- *Facteur de forme entre la surface de la couverture et le sol extérieur*

Ce facteur de forme est donné par :

$$F_{C,se} = \frac{1 - \cos(\varphi_i)}{2} \quad (3-55)$$

### 3.6.3 Grandeurs concernant la convection [1/34/35]

MAC AdAMS et ECKERT proposèrent pour le cas d'une plaque plane que le nombre de Nusselt relatif à un transfert de chaleur en convection libre s'écrit de manière général comme suit :

$$Nu = a.(Gr.Pr)^b \quad (3-56)$$

$a$  et  $b$  sont des constantes.

#### 3.6.3.1 Coefficient d'échange convectif intérieur

##### ➤ *la couverture et l'air intérieur*

La couverture est composée de quatre plans inclinés et un plan horizontal. Pour la détermination des coefficients de convection, nous avons utilisé pour les plans inclinés les expressions de HOTTEL et WOERTZ [36].

Ces expressions ont été vérifiées expérimentalement par KITTAS [1] sur une serre de dimension réelle.

Dans le cas où la convection à l'intérieur est supposée naturelle, le coefficient d'échange convectif entre la face intérieure de la couverture et l'air intérieur de la serre s'écrit :

$$h_{ci} = 1,162.(5,05 - 1,39\varphi_i + 0,277\varphi_i^2).|T_{ci} - T_{ai}|^{0,25} \quad (3-57)$$

avec :

$\varphi_i$  : angle d'inclinaison de la face intérieure de la paroi (i) par rapport au plan horizontal [rd];

$T_{ai}$  : température de l'air intérieur [K];

$T_{ci}$  : température du plan i de la serre [K];

$h_{ci}$  : coefficient de convection naturelle [W/m<sup>2</sup>.K];

### Plan horizontal

Nous utilisons les expressions de MAC ADAMS [34] pour le cas de l'air. Deux cas sont à considérer :

1<sup>er</sup> cas : la face supérieure du plan est plus chaude que l'air ou la face inférieure du plan est plus froide que l'air.

- Régime laminaire  $10^5 < Gr \cdot Pr < 2 \cdot 10^7$

$$h_c = 1,32 \cdot \left| \frac{T_{ai} - T_c}{L} \right|^{0,25} \quad (3-58)$$

- Régime turbulent  $2 \cdot 10^7 < Gr \cdot Pr < 3 \cdot 10^{10}$

$$h_c = 1,52 \cdot \left| \frac{T_{ai} - T_c}{L} \right|^{0,33} \quad (3-59)$$

2<sup>ème</sup> cas : la face supérieure du plan est plus froide que l'air ou la face inférieure du plan est plus chaude que l'air.

- Régime laminaire  $10^5 < Gr \cdot Pr < 2 \cdot 10^{10}$

$$h_c = 0,59 \cdot \left| \frac{T_{ai} - T_c}{L} \right|^{0,25} \quad (3-60)$$

L : représente une longueur caractéristique (longueur de référence).

#### ➤ *l'air intérieur et les montants latéraux*

Pour les portes (plans verticaux), nous utilisons l'expression de MAC ADAMS pour le cas de l'air:

- Régime laminaire  $10^4 < Gr \cdot Pr < 10^9$

$$h_p = 1,42 \cdot \left| \frac{T_{ai} - T_p}{L} \right|^{0,25} \quad (3-61)$$

- Régime turbulent  $10^9 < Gr \cdot Pr < 10^{13}$

$$h_c = 1,31 \cdot \left| \frac{T_{ai} - T_p}{L} \right|^{0,33} \quad (3-62)$$

➤ *Air intérieur et sol*

Pour le sol, nous utilisons l'expression de MAC ADAMS pour un plan horizontal.

➤ *Air intérieur et couvert végétal*

▪ Pour  $h_v$

Nous utilisons l'expression donnée par KIMBAL [37]. Elle est donnée par :

$$h_v = 1,9 \cdot \left| \frac{T_v - T_{ai}}{L_v} \right|^{0,25} \quad (3-63)$$

Où  $L_v$  représente la dimension caractéristique du végétal.

▪ Pour  $h_E$

On utilise l'expression qui détaille le coefficient  $h_E$  [1] :

$$Q_E = h_0 \cdot A_v [P(T_v) - H \cdot P(T_{ai})] \quad (3-64)$$

avec :

- $h_0 = 0,013h_v$
- H: humidité relative est égale 0,8.
- $P(T_v)$ : pression partielle de la vapeur d'eau à l'intérieur de la serre donnée en fonction de la température  $T_v$  :

$$P(T_v) = R_1 T_v + R_2 \quad (3-65)$$

$R_1$  et  $R_2$  sont deux constantes dépendantes de la plage de température et obtenues par une interpolation, en utilisant la méthode des moindres carrés.

Plage de température [°C]	$R_1$ [atm/°C]	$R_2$ [atm]
10 - 30	$- 4,788.10^{-3}$	$1,487.10^{-3}$
30 - 50	$- 8,316.10^{-2}$	$4,014.10^{-3}$
50 - 70	$- 3,616.10^{-1}$	$9,484.10^{-3}$

Tableau 3.3 Coefficients  $R_1$  et  $R_2$  en fonction des plages de températures [38]

Le flux de chaleur échangée par évapotranspiration entre la plante et l'air intérieur est donné par :

$$Q_E = h_E \cdot A_V \cdot (T_V - T_{ai}) \quad (3-66)$$

En combinant les équations (3.64) et (3.66), on tire  $h_E$  ; après simplification :

$$h_E = [0,013 \cdot R_1 \cdot h_v \cdot (T_V - H \cdot T_{ai}) + h_v \cdot R_2 \cdot 0,013 \cdot (1 - H)] / (T_V - T_{ai}) \quad (3-67)$$

### 3.6.3.2 Coefficient d'échange convectif extérieur

La convection à l'extérieur de la serre est supposée mixte et le coefficient d'échange correspondant est donné par [36] :

$$h_{cei} = \sqrt{(h_{ei}^n)^2 + (h_{ei}^f)^2} \quad (3-68)$$

dans laquelle  $h_{ei}^n$  représente le coefficient d'échange par convection naturelle et est donné par:

$$h_{ei}^n = 1,162 \cdot (1,54 - 0,42 \cdot \varphi_i + 0,277 \varphi_i^2) \cdot |T_{ce} - T_{ae}|^{0,25} \quad (3-69)$$

$\varphi_i$  : angle d'inclinaison de la face extérieure de la paroi  $i$  par rapport au plan horizontal [rd] ;



et  $h_{ei}^f$  relatif à la convection forcée s'écrit :

$$h_{ei}^f = 3,068.U_i^{0,8} \quad (3-70)$$

$U_i$  : est la vitesse moyenne du vent sur la surface extérieure du plan i [m/s]. Elle est donnée par l'expression suivant :

$$U_i = U \cdot \frac{\ln\left(\frac{Z_i}{0,005}\right)}{\ln\left(\frac{5}{0,005}\right)} \quad (3-71)$$

avec

$U$  : vitesse du vent mesurée à 5 mètre au dessus du sol [m/s];

$Z_i$  : hauteur du milieu du plan i au dessus du sol [m];

0,005 : coefficient qui tient compte de la rugosité.

#### 3.6.4 Grandeur concernant la conduction

Ce mode de transfert de chaleur n'intervient qu'au niveau du sol intérieur. Celui-ci stocke l'énergie solaire captée pendant le jour pour la céder vers le haut pendant la nuit. Le tableau suivant donne les valeurs moyennes des propriétés thermiques pour différents types de sol [38]:

Type de sol	Porosité $X_T$	Teneur en eau $X_w$	Conductivité thermique [w/m <sup>2</sup> K]	Capacité thermique [J/m <sup>3</sup> .°C].10 <sup>6</sup>	Profondeur d'amortissement [10 <sup>-2</sup> m]
Sable	0.4	0.0	0.29	1.25	8.0
	0.4	0.2	1.75	2.09	15.2
	0.4	0.4	2.92	2.92	14.3
Argile	0.4	0.0	0.25	1.25	7.4
	0.4	0.2	1.15	2.09	12.4
	0.4	0.4	1.59	2.92	12.2
Tourbe	0.8	0.0	0.06	1.46	3.3
	0.8	0.4	0.29	3.13	5.1
	0.8	0.8	0.5	4.81	5.4
Neige	0.95	-	0.06	0.21	9.1
	0.8	-	0.13	0.83	6.6
	0.5	-	0.71	2.09	9.7

Tableau 3.4 Valeurs moyennes des propriétés thermiques des différents sols

### 3.6.5 Grandeurs concernant le dispositif de stockage

#### 3.6.5.1 Diamètre équivalent

Bien que les galets ne soient pas en général sphériques, on peut les caractériser par le diamètre équivalent  $d_G$  défini par AHMET KÜRKLÜ [20]:

$$d_G = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_{TG}(1-P)}{\pi \cdot n_{TG}}} \quad (3-72)$$

avec

$V_{TG}$  : volume total des galets (expérience) ;

$n_{TG}$  : nombre des galets.

#### 3.6.5.2 Porosité

Par définition, la porosité est le rapport du volume occupé par l'air sur le volume total (air + galets).

H. TORAB et D. E. BESLY [39] ont donné une expression de la porosité en fonction du rapport entre le diamètre du stock et le diamètre équivalent des galets.

- Pour  $D_{st}/d_G < 28$

$$P = 0,4272 - 4,1516 \cdot 10^{-3} \cdot (D_{st} / d_G) + 7,881 \cdot 10^{-5} \cdot (D_{st} / d_G)^2 \quad (3-73)$$

- Pour  $D_{st}/d_G > 28$

$$P = 0,3625 \quad (3-74)$$

### 3.6.5.3 Longueur caractéristique

La longueur caractéristique est le rapport du volume d'un galet à sa surface.

$$L_G = \frac{V_G}{S_G} \quad (3-75)$$

### 3.6.5.4 Surface d'échange

La surface d'échange  $A_{G,A}$  (air-galets) d'un milieu poreux de volume  $V_{st}$  et de porosité  $P$  est égal à :

$$A_{G,A} = n_{TG} \cdot S_G \quad (3-76)$$

$n_{TG}$  est le nombre des galets contenus dans l'élément de volume  $V_{st}$  et  $S_G$  est la surface d'un galet.

On a aussi :

$$n_{TG} = \frac{V_{TG}}{V_G} = \frac{(1-P) \cdot V_{st}}{V_G} \quad (3-77)$$

avec :

$V_{TG}$  : volume total des galets ;

$V_G$  : volume d'un galet représentatif ;

La surface de contact air-galets dans le volume  $V_{st}$  est :

$$A_{G,A} = n_{TG} \cdot S_G = \frac{(1-P) \cdot V_{st}}{L_G} \quad (3-78)$$

### 3.6.5.5 Taux de surface d'échange

Le taux de surface d'échange est le rapport de la surface de contact au volume correspondant.

$$T_{G,A} = \frac{A_{G,A}}{V_{st}} = \frac{(1-P)}{L_G} \quad (3-79)$$

Pour des sphères identiques :

$$T_{G,A} = 6 \cdot \frac{(1-P)}{d_G} \cdot h_{vG} \quad (3-80)$$

### 3.6.5.6 Coefficient de transfert de chaleur air-galets

Le coefficient de transfert de chaleur a une grande influence dans le phénomène de transfert de chaleur et conditionne la forme du front thermique [40].

La détermination de ce paramètre a fait l'objet de plusieurs études et évaluations. Dans notre cas, nous avons utilisé la relation déduite par ALANIS, ROVETTA et ROSETTTA [41] qui a été déterminée dans des conditions proches de notre expérimentation.

$$h_{vG} = 824 \cdot \left( \frac{\rho_A \cdot U_{st}}{d_G} \right)^{0,92} \quad (3-81)$$

avec  $U_{st}$  : vitesse de l'air à l'intérieur du stock ;

$d_G$  : diamètre équivalent des galets ;

$\rho_A$  : masse volumique de l'air.

Le coefficient d'échange thermique surfacique  $h_G$  est alors déduit en utilisant la relation suivante [40] :

$$h_G = \frac{d_G}{6 \cdot (1-P)} \cdot h_{vG} \quad (3-82)$$

### 3.6.6 Grandeurs thermophysiques des éléments de la serre

Jusqu'à présent, nous avons précisé les grandeurs intervenant dans les équations du bilan de puissance qui sont indépendantes du choix de la serre.

Il reste à déterminer les propriétés physiques dont les valeurs numériques dépendent de chaque nœud de la serre considérée.

Éléments	Chaleur spécifique [J/Kg.°C]	Conductivité thermique [W/m.°C]	Densité [Kg/m <sup>3</sup> ]
Air	1003	0,024	1,127
Eau	4180	0,598	1000
Sol	2100	1,15	1700
Galet	785	2,108	2575
polyéthylène	2280	0,29	920

Tableau 3.5 Propriétés thermo physiques des différents éléments [20]

## CHAPITRE 4

### EXPERIMENTATION

#### 4.1 Introduction

L'étude expérimentale entreprise consiste à mesurer systématiquement les températures à l'intérieur de la serre à trois hauteurs, dans le sol à différentes profondeurs et dans le stockage, ainsi que les sollicitations extérieures (l'éclairement solaire, température ambiante et la vitesse du vent).

Le dispositif expérimental sur lequel on a effectué les mesures comprend essentiellement :

- deux serres tunnel (témoin et avec stockage) ;
- l'instrumentation pour les mesures physiques ;
- deux systèmes d'acquisitions de type HYDRA FLUKE et AGILENT

Ce travail consiste en l'installation et l'expérimentation de deux serres agricoles, l'une non chauffée (serre témoin) et l'autre chauffée (serre avec dispositif de stockage thermique), dans la région de GHARDAIA.

#### 4.2 Description du dispositif expérimental

La serre expérimentale construite à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables « URAER » de Ghardaïa est utilisée pour le chauffage. C'est un système qui transforme l'énergie solaire en énergie calorifique par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (l'air). Elle est localisée en milieu saharien dans une zone dégagée de toute habitation. On note la présence d'une carrière à 800 m environ au Sud de la serre.

La serre témoin et la serre avec stockage thermique sont orientées dans le sens Nord-Sud avec une déviation vers l'Ouest de 20°. La distance entre les deux serres est sept fois la hauteur.

### 4.3 Installation de la serre

La structure de la serre est constituée de 36 cintres et de 24 pieds d'implantation ainsi que de plusieurs éléments de maintien (Figure 4.1). Le montage complet de la charpente se fait de la façon suivante :

Les cintres sont assemblés par emmanchement puis fixés par une bride au niveau de chaque emboîtement. Un arceau est formé de 03 cintres puis monté sur deux pieds d'implantation, les arceaux sont reliés entre eux en cinq points au niveau des brides et des emboîtements des pieds par des tubes d'intervalle de maintien.

#### 4.3.1 Fixation du film plastique

On doit déposer le rouleau du film juste au niveau du premier arceau, dérouler une longueur dépassant la courbure de la serre de un à deux mètres et découper Figure (4.2). On recommence autant de fois qu'il faut l'opération en décalant de 3,2m à chaque fois jusqu'à obtention complète de la couverture de la structure de la serre expérimentale. Les bords du film sont bien étirés par l'effet du poids du remblai.



Figure 4.1 Ensemble des arceaux



Figure 4.2 Montage de la couverture

On a utilisé 24 fils de fer galvanisé tendus par des tirets forts (tendeurs) comme support pour l'enveloppe, afin que cette dernière résiste aux vents violents et évite les perforations ou déchirures provoquées par le flottement du film.



Figure 4.3 Fixation du film plastique

#### 4.3.2 Charges

Les serres à film plastique doivent supporter les charges suivantes :

- le vent
- le poids de la culture
- le poids propre de la serre

#### 4.3.3 Couverture transparente

Le matériau de la paroi est l'élément nécessaire de la serre. Sa fonction principale est d'assurer un effet de serre aussi favorable que possible tout en laissant pénétrer le rayonnement.

La majorité des matériaux de couverture de serre actuellement utilisés dans les régions méditerranéennes sont des films en polyéthylène basse densité (Pebd). Cependant, d'autres films sont employés (PVC, polyester...) mais de manière plus restreinte.

Le film utilisé pour notre serre est en polyéthylène basse densité linéaire. Il a une bonne résistance mécanique mais il est très extensible (allongement réversible).



#### 4.3.4 Contrôle diurne de la température

Les problèmes majeurs auxquels sont confrontées les cultures sous serre en zone saharienne sont :

- l'excès de chaleur dès le début du mois d'Avril jusqu'à la fin du mois d'Octobre ;
- le manque d'hygrométrie en cas d'aération non convenable ;
- l'excès d'humidité en hiver, à la fin de la nuit et au début de la journée.

En effet, la température à l'intérieur de la serre dépasse très souvent le niveau souhaité pour les plantes cultivées :

- à partir du mois de mars jusqu'à la fin de la culture pour les primeurs
- de la mi-août jusqu'à la fin novembre pour les cultures d'arrière-saison

Une température trop élevée dans la serre, dépassant parfois 50°C, met en danger la vie des plantes par des effets sur leur morphologie et sur leur processus physiologique, tels que la chute des fleurs, brûlures des feuilles et des fruits.

##### ❖ *Aération statique*

La serre est aérée normalement par la création de fentes latérales en écartant les laizes à l'aide de planches en bois de 0,4m. Ceci crée des fentes en forme de losange d'une hauteur de 1,7 m. Ce qui représente un taux d'ouverture de 1,5 à 3%. L'ouverture des portes permet d'améliorer le taux d'ouverture de 1%, alors que celle du pignon complet permet une amélioration de 5,5% environ [38].



Figure 4.4 Aération par les portes

### ❖ *Ombrage*

La technique de l'ombrage est très ancienne et différents matériaux (lattes en bois, feuilles de palmier ...) sont utilisés.

L'influence de l'ombrage sur la température de l'air est faible si la serre est bien aérée, mais son effet sur la température du sol, surtout en surface, est nettement plus important. L'influence sur l'hygrométrie est faible.

### ❖ *Humidification de l'air*

L'humidification de l'air est un moyen intéressant pour abaisser la température de l'air surtout si l'hygrométrie sous la serre est faible. C'est donc un outil de régulation qui pourrait être utilisé en combinaison avec l'aération statique.

## 4.4 Installation du dispositif de stockage thermique

Le stockage thermique dans les lits de galets est utilisé dans les systèmes utilisant l'air comme fluide caloporteur. Dans ce système, l'air de la serre est récupéré et envoyé dans un stockage par une ventilation forcée, généralement disposé sous l'espace de culture de la serre. C'est un stockage de courte durée (jour/nuit).

### 4.4.1 Disposition du lit de galets

Le système de stockage thermique est composé de quatre conduites cylindriques en PVC de 200 mm de diamètre. Les conduites sont disposées en formant deux H.



Figure 4.5 : Installation des conduites

Les tubes sont remplis des galets ayant un diamètre approximatif variant de 50 à 100mm. Les galets ont été préalablement lavés et séchés. Leur disposition est aléatoire. Le lit de galets est placé horizontalement à l'intérieur de la serre, enterré à 0,70m de profondeur (Figure 4.6 et 4.7).



Figure 4.6 Disposition des galets

Figure 4.7 Galets de diamètre entre 5 et 10 cm



Figure 4.8 Disposition du lit des galets

#### 4.4.2 Système de ventilation

L'air est soufflé dans la même direction à l'aide de deux ventilateurs disposés aux milieux de conduite (H).

Les ventilateurs sont commandés par des thermostats fixant les températures de consigne. Le système se met en marche lorsque la température à l'intérieur de la serre est supérieure à 27°C pour le stockage et lorsque la température est inférieure à 15°C pour le déstockage (Figure 4.10 et 4.11).



Figure 4.9 Entrée de l'air par Ventilation



Figure 4.10 Commande par thermostats



Figure 4.11 : Les quatre sorties d'air du stockage

L'air de la serre est mis en mouvement par l'intermédiaire de deux ventilateurs installés au milieu, c'est-à-dire deux entrées d'air (situées dans le centre de gravité de format H) et huit sorties de l'air (disposées à deux mètres par rapport aux montants latéraux de la serre).

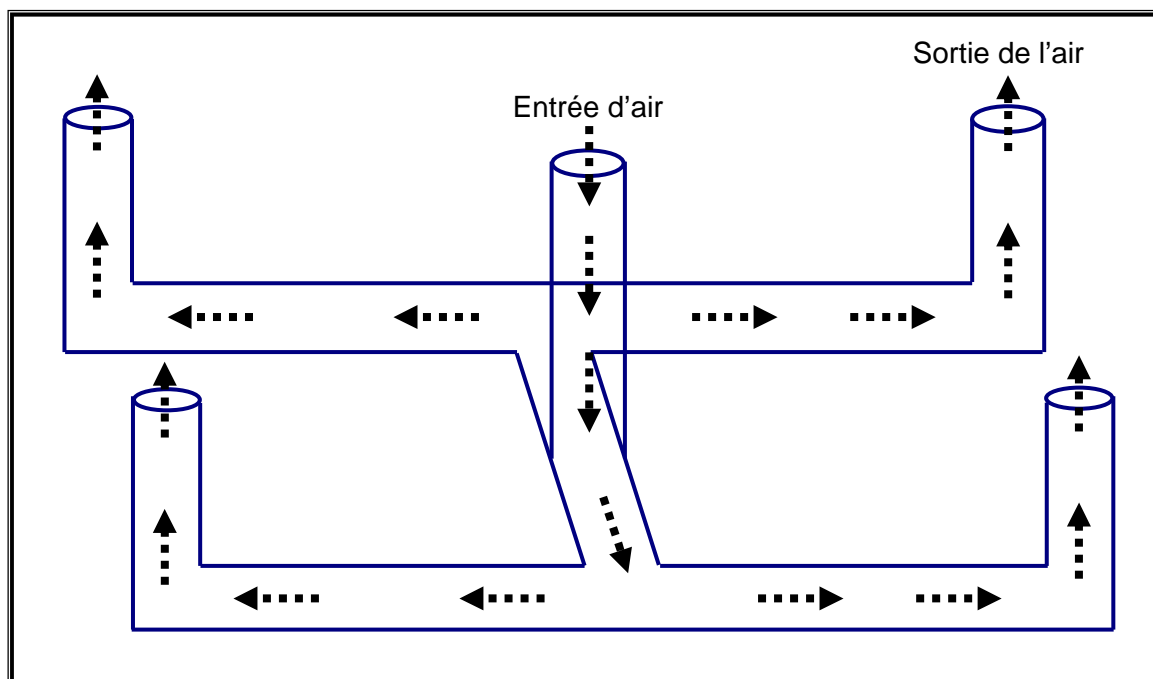


Figure 4.12 Schéma montrant le trajet de l'air dans le système de stockage

#### 4.5 Méthode et appareillages de mesure

Le relevé des différents paramètres physiques (flux solaire global, température, humidité relative de l'air) se fait à travers deux acquisitions de données l'une de type LINSEIS et l'autre de type HYDRA FLUKE. Cette dernière est reliée à un microordinateur où sont affichées les mesures effectuées en temps réel.



Figure 4.13 Appareil d'enregistrement digital type FLUKE à 20 voies



Figure 4.14 Appareil d'enregistrement digital type LINSEIS à 12 voies



Figure 4.15 Abris des enregistreurs

#### 4.5.1 Mesure de la température

La mesure de la température est assurée par des thermocouples de type PT100 et de type K (Nickel-crome/Nickel) dont la courbe d'étalonnage suit une droite, figure (4.16).

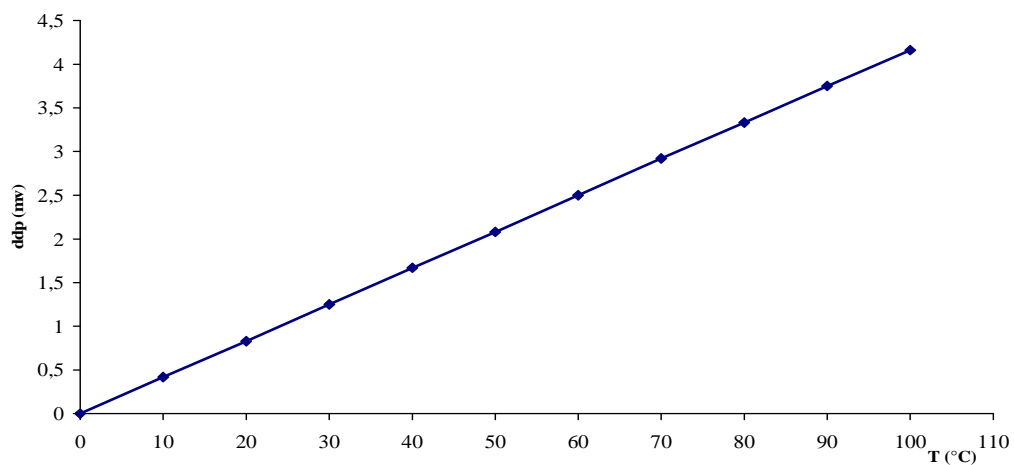


Figure 4.16 Courbe d'étalonnage du thermocouple (Nickel-crome/Nickel)

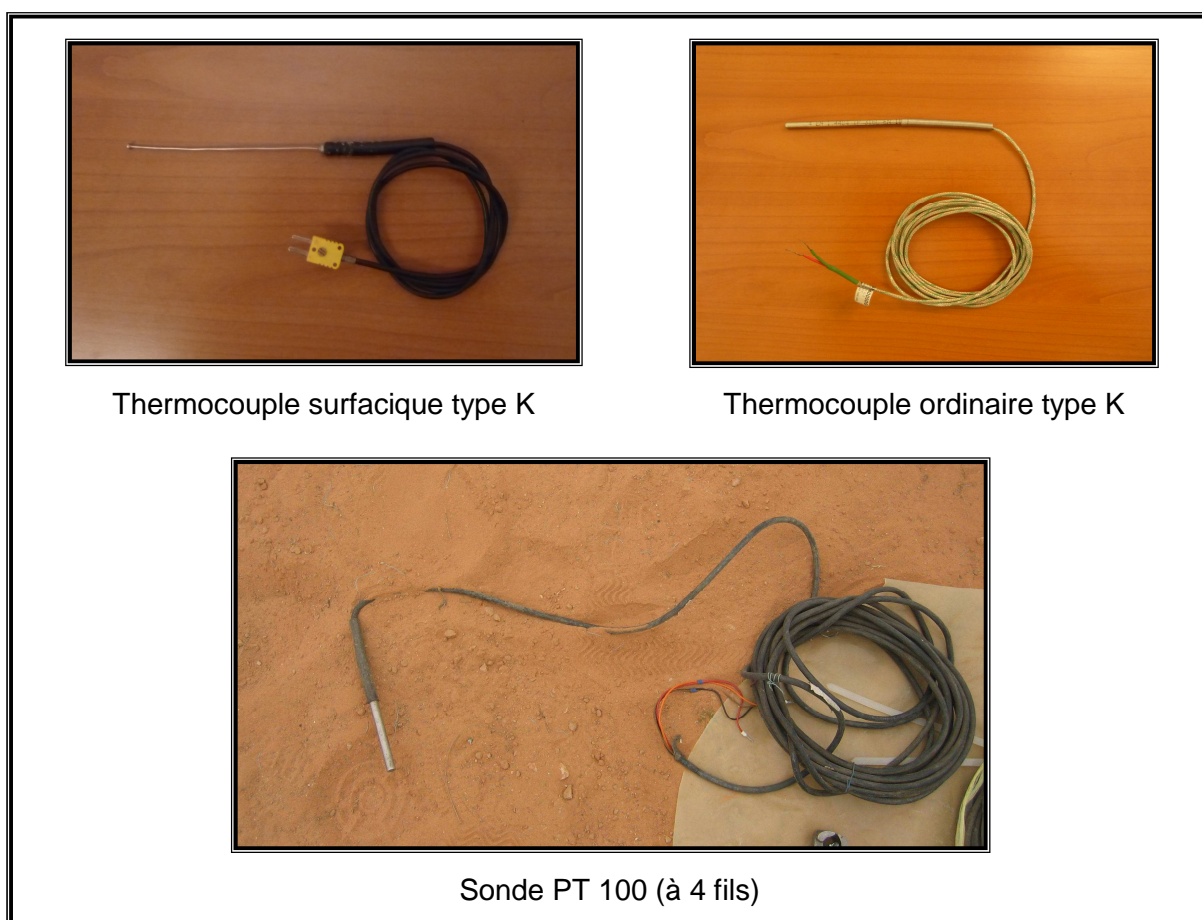


Figure 4.17 Sondes utilisées dans l'expérimentation

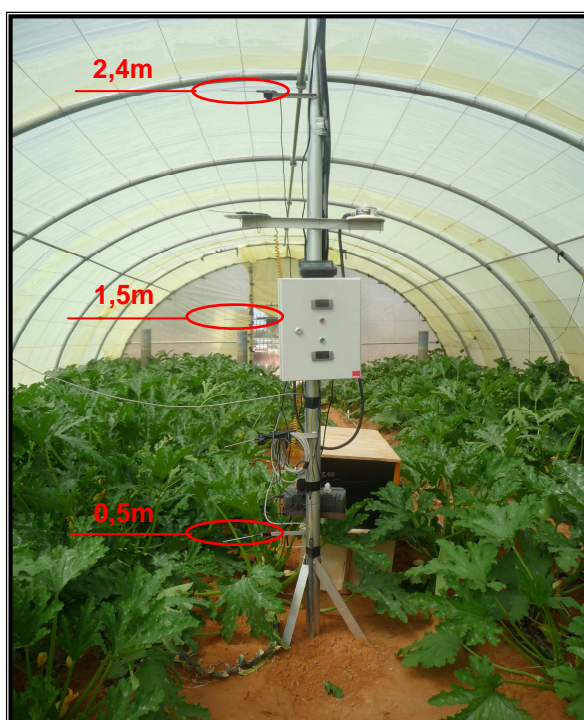


Figure 4.18 Station météorologique

Des mesures de la température en plusieurs endroits ont été effectuées, à l'intérieur et à l'extérieur de la serre, dans le stock et dans le sol.

#### 4.5.1.1 Mesure de la température de l'air intérieur de la serre

Pour mesurer la température de l'air à l'intérieur de la serre, nous avons placé trois (03) thermocouples type K en différentes hauteurs. La mesure s'effectue à 0.5 m, 1.5 m et 2.4 m du sol, (Figure 4.19). Certains thermocouples sont raccordés aux enregistreurs à travers par des câbles téléphoniques à cause de l'éloignement de leur emplacement.



4.19 Disposition des thermocouples en hauteur



#### 4.5.1.2 Mesure de la température du sol

Trois sondes PT100 permettent de mesurer les températures du sol à 3 niveaux de profondeurs, (Figures 4.20 & 4.21) et la surface du sol avec des thermocouples surfaciques type K (Nickel-crome/Nickel), (Figure 4.20).



Figure 4.20 Emplacement des sondes dans le sol



Figure 4.21 Disposition de la sonde PT100 dans le sol à 1m de profondeur

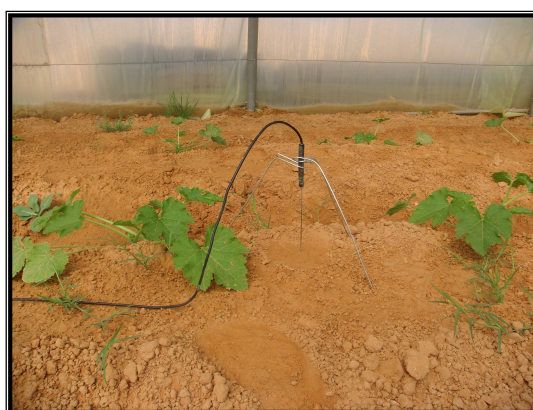


Figure 4.22 Emplacement du thermocouple à la surface du sol

#### 4.5.1.3 Mesure de la température de la plante

Les températures au niveau de la surface de la végétation sont mesurées à l'aide des thermocouples surfaciques type K connectés à des enregistreurs type HYDRA-FLUKE, dans les deux serres (témoin et avec stockage).



Figure 4.23 Emplacement des thermocouples à la surface de la plante

#### 4.5.1.4 Mesure de la température dans le stock

Les températures à l'entrée et à la sortie du stock et le long du lit sont mesurées par des sondes thermométriques PT100 à quatre fils connectées à des enregistreurs type HYDRA-FLUKE. Les sondes d'entrée et de sortie sont munies d'un cache en Aluminium pour éviter tous les échanges par rayonnement entre les sondes et les éléments de la serre, (Figure 4.24 et 4.25).



Figure 4.24 Localisation des sondes dans le lit de galets

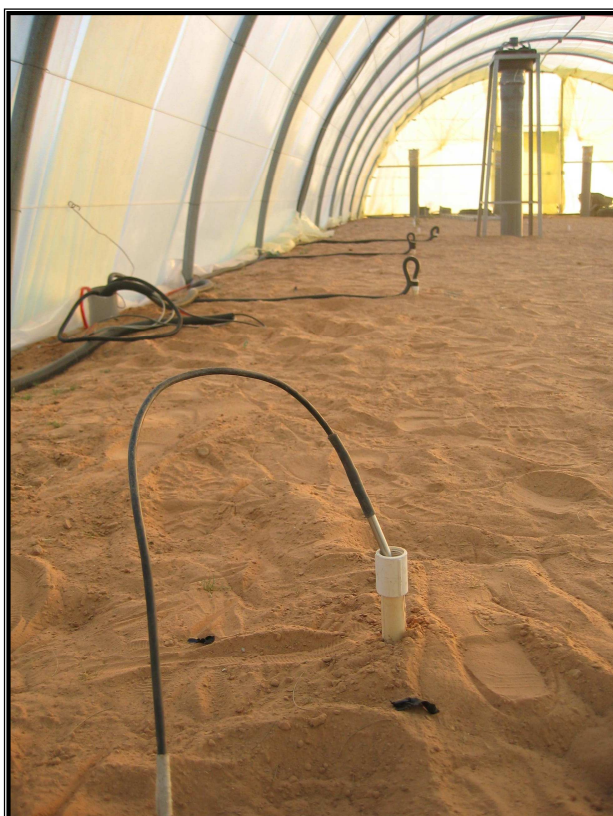


Figure 4.25 Installation des sondes dans le lit de galets  
(Suivant la direction entrée et sortie d'air)

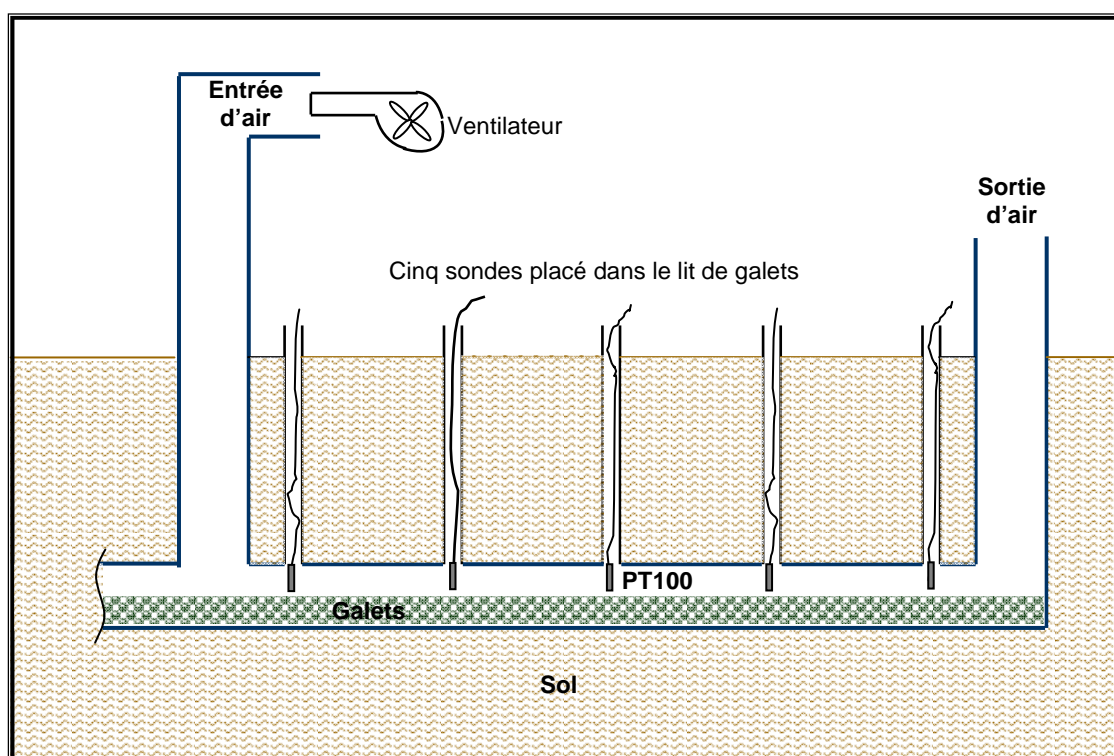
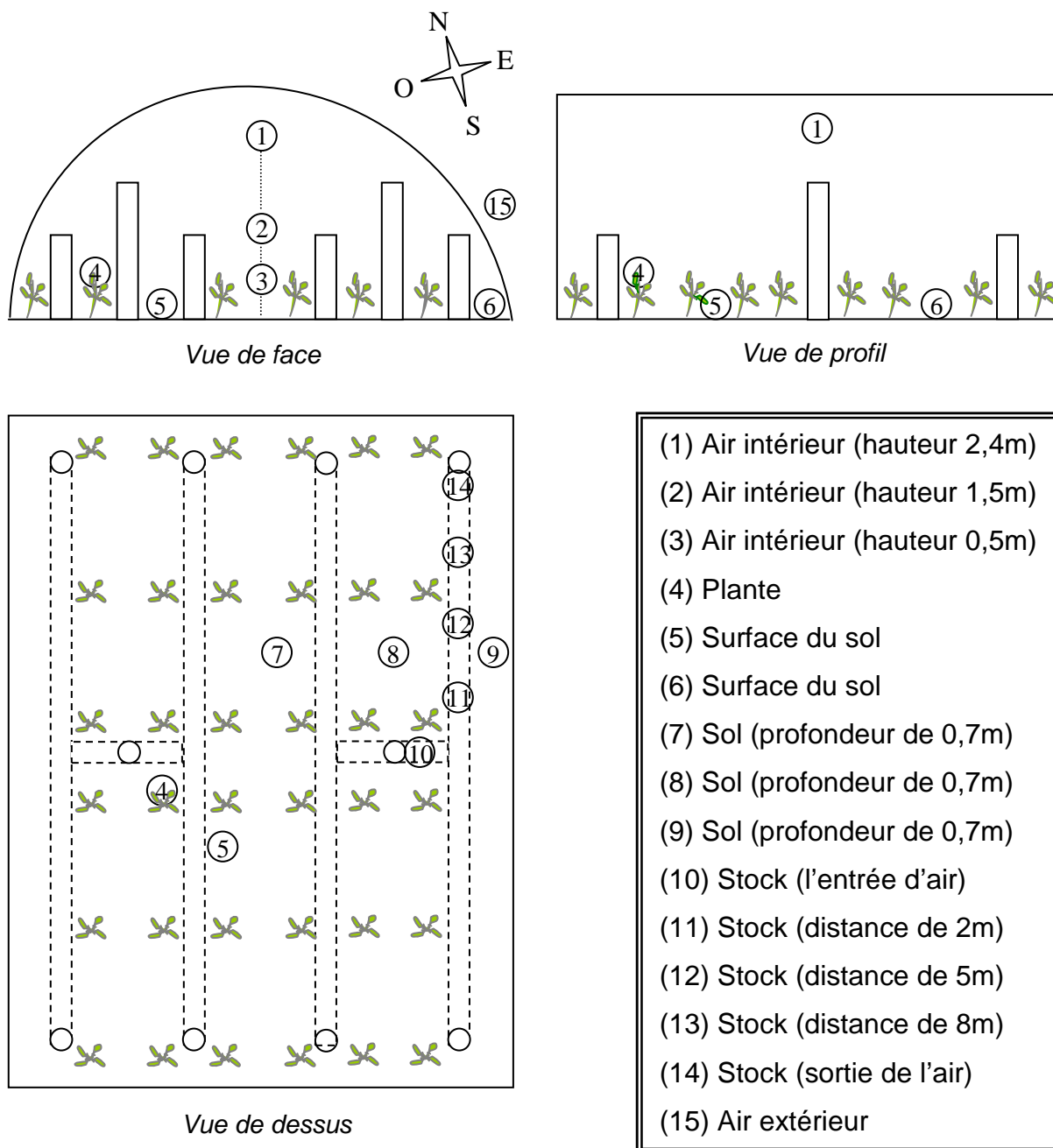


Figure 4.26 Implantation des sondes PT100 dans un lit de galets



NB : le numéro représente la voie à laquelle est raccordé le thermocouple.

Figure 4.27 Disposition des thermocouples dans la serre expérimentale

#### 4.5.1.5 Mesure de la température de l'air extérieur

La température ambiante a été mesurée par un thermocouple placé à l'extérieur de la serre à une hauteur de 1,5 m par rapport à la surface du sol dans une zone ombrée. Nous avons assuré la mesure par d'autres capteurs de la station météorologique à côté de la serre expérimentale.

#### 4.5.2 Mesure de la vitesse du vent

Les mesures de la vitesse du vent se font par un anémomètre type NG6313 (Richard-Pékly), dont la détection de rotation par électro-optique a une impulsion par tour et une sensibilité de 0,2m/s et dont la gamme de 0 à 5m/s ou 0 à 20m/s.



Figure 4.28 Anémomètre type NG6313 (Richard-Pékly)

Le module de la vitesse du vent extérieur est mesuré en deux points à 2m et 8m du sol, à proximité de la serre ( $\approx$  60m au Sud) sur un terrain dégagé homogène et horizontal.

#### 4.5.3 Mesure du flux solaire

Le rayonnement global d'origine solaire, transmis à travers la couverture de la serre est mesuré par un pyranomètre fixé à un mât positionné au dessus de la végétation et relié à une acquisition de donnée FLUKE, (Figure 4.29). Le capteur utilisé est un pyranomètre à thermocouple de type blanc et noir de marque EPPLEY (model 8-48 serial N° 27037). Il effectue la mesure des rayonnements globaux à l'intérieur de la serre sur une surface horizontale avec une précision de 1% et une sensibilité approximative de  $9,94 \times 10^{-6} \text{V}/\text{wm}^{-2}$ .



Figure 4.29 Disposition du pyranomètre dans la serre

Un pyranomètre du type KYPP et ZONEN permet de mesurer l'éclairement global à l'extérieur de la serre sur une surface horizontale à l'aide de station radiométrique à proximité de la serre à environ 60m au Sud, (Figure 4.30).

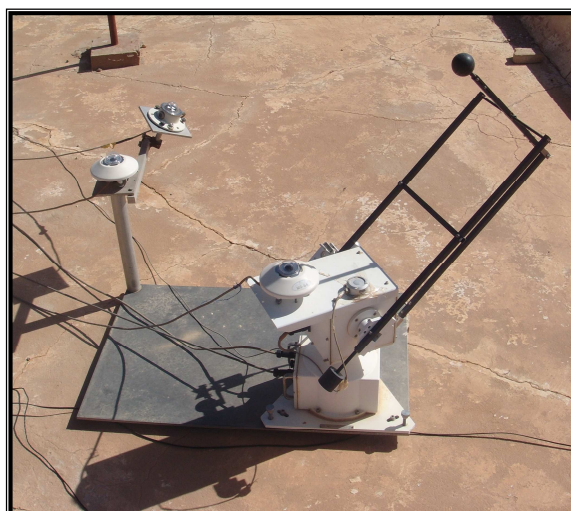


Figure 4.30 Station radiométrique (URAER)



Figure 4.31 Vue interne de la serre expérimentale ayant le dispositif de stockage



Figure 4.32 : Vue interne de la serre témoin (sans dispositif de stockage)



Figure 4.33 Vue d'ensemble des serres sur le site de l'URAER (Ghardaïa)



## CHAPITRE 5

### RESULTATS ET INTERPRETATION

#### 5.1 Introduction

Notre travail consiste tout d'abord à confronter les valeurs mesurées et calculées de l'éclairement solaire incident dans une surface horizontale afin d'estimer la puissance absorbée d'origine solaire. Il s'ensuit qu'une étude expérimentale détaillée a été effectuée pour prédire les températures de l'air ambiant intérieur et extérieur, de l'humidité relative intérieure et extérieure et le sol que se soit à l'intérieur ou à l'extérieur de la serre.

#### 5.2 Présentation des résultats

##### 5.2.1 Rayonnement solaire

Cette section est consacrée à la mise en oeuvre numérique de l'éclairement solaire incident sur une surface horizontale. Les figures 5.1 à 5.3 représentent respectivement les valeurs mesurées et obtenues par simulation numérique en utilisant le modèle de Capderou qui est valable pour un ciel totalement clair. Pour ce faire, nous avons choisi la journée du 06 Février 2010 pour les paramètres astronomiques correspondant au site de Ghardaïa.

La comparaison des valeurs calculées et mesurées de l'éclairement solaire diffus (figure 5.1) montre que la concordance est dans l'ensemble satisfaisante. Les résultats observés prouvent d'une part que le ciel subit quelques perturbations nuageuses et d'autre part ces résultats peuvent être la conséquence de la présence d'une carrière qui se situe à environ 800m au Sud de la serre. Ces remarques ont été prouvées par le calcul d'erreur relative représentée par les figures 5.4, 5.5 et 5.6. Cependant cette erreur (figures 5.2 et 5.3) est sensiblement faible pour les éclairagements direct et global. C'est pour cette raison que nous avons admis que le modèle de Capderou suffit largement pour l'estimation de l'éclairement solaire incident sur une surface horizontale. Par ailleurs, il est tout à fait légitime de trouver que les courbes aient une forme de cloche pour un ciel clair.

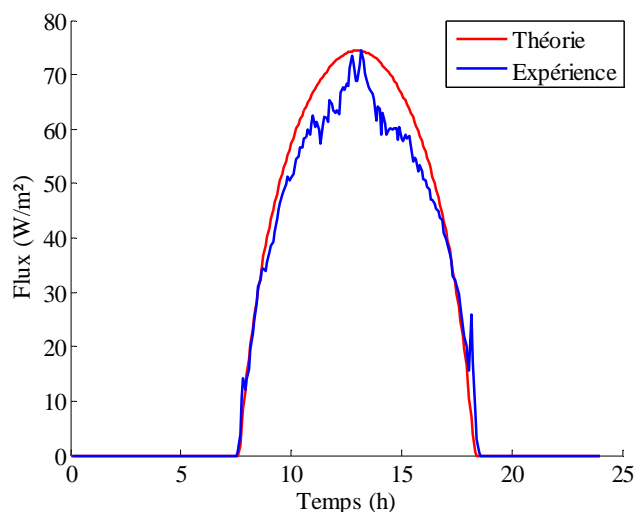


Figure 5.1 Eclairage diffus calculé et mesuré

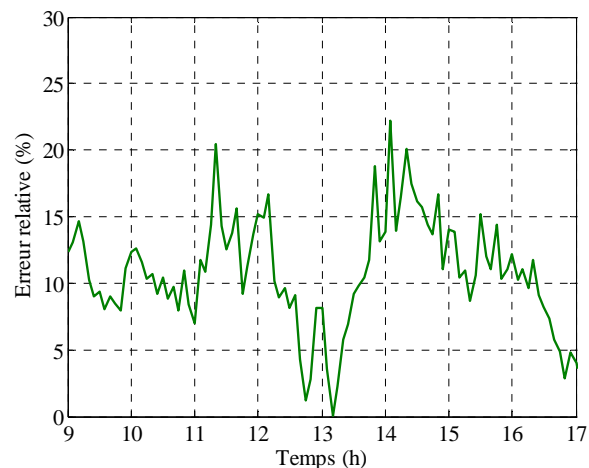


Figure 5.4 Erreur relative sur le rayonnement diffus

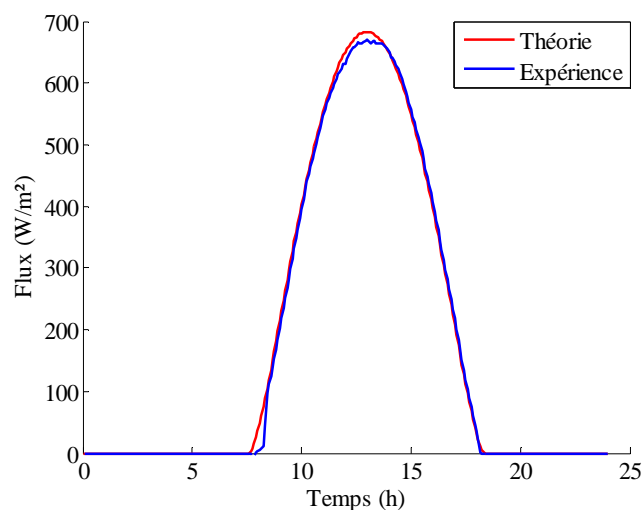


Figure 5.2 Eclairage direct calculé et mesuré

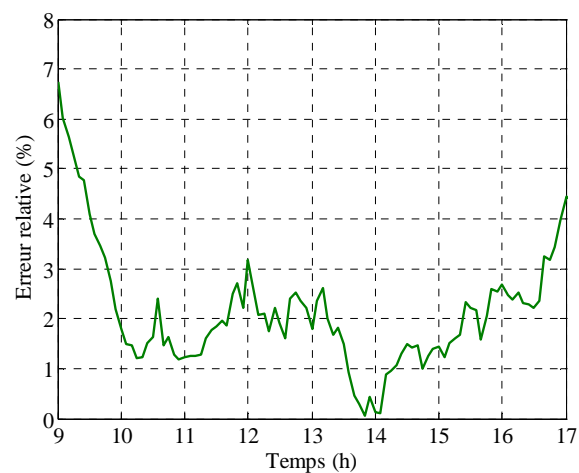


Figure 5.5 Erreur relative sur le rayonnement direct

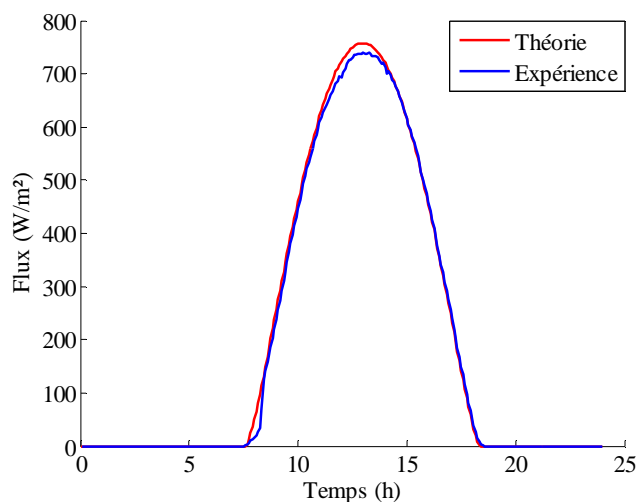


Figure 5.3 Eclairage global calculé et mesuré

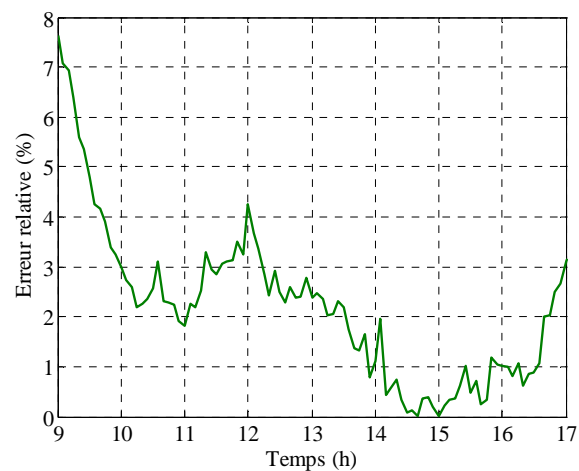


Figure 5.6 Erreur relative sur le rayonnement global

### 5.2.1.1 Rayonnement solaire à l'extérieur de la serre expérimentale

Sur la figure 5.7, nous avons tracé l'évolution au cours du temps des rayonnements solaires global, direct et diffus pour une journée à ciel clair. Nous pouvons constater que la puissance lumineuse (flux direct sur un plan normal) va en augmentant depuis le lever du soleil jusqu'à atteindre une valeur maximale de  $885 \text{ W/m}^2$  aux environs de 13h local correspondant à 12 TSV. A cette heure du jour, le soleil se trouve au zénith (le point le plus haut dans le ciel) et l'énergie qu'il émet est maximale du fait que les cosinus directeurs de l'incidence du flux lumineux avoisinent l'unité. Ce après quoi, le soleil continuant sa trajectoire en s'abaissant sur le l'horizon engendre une augmentation de l'angle d'incidence qui s'accompagne d'une diminution de l'intensité du flux lumineux reçu au niveau du sol. Le flux solaire direct diminue donc progressivement jusqu'à atteindre une valeur nulle au environ de 18h30 local.

L'évolution du rayonnement solaire diffus est uniformément répartie autour de la valeur moyenne de  $72 \text{ W/m}^2$ , soit 11% de l'éclairement énergétique global.

La superposition des composantes directe et diffuse sur une surface horizontale du flux solaire donne le rayonnement solaire global. La courbe décrivant l'évolution de ce dernier (figure 5.7) au cours d'une journée avec ciel clair est similaire à celle du rayonnement solaire direct. La valeur maximale de  $740 \text{ W/m}^2$  du rayonnement solaire global est atteinte aux alentours de 13h local.

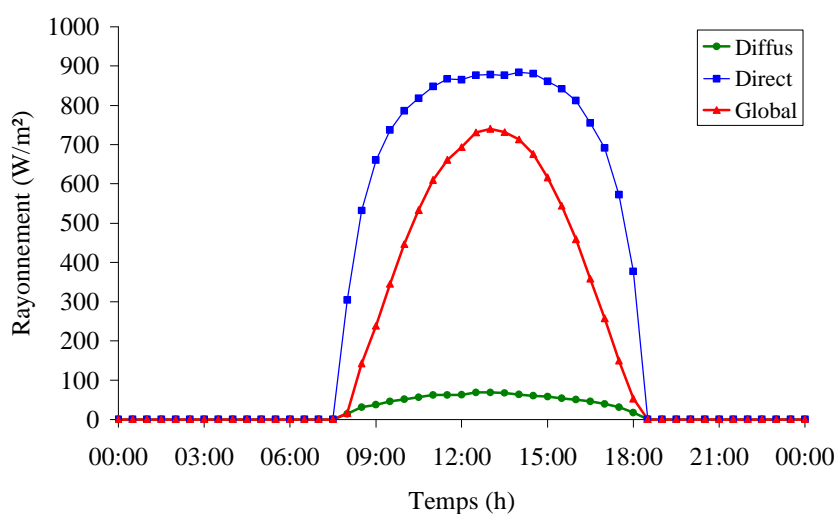


Figure 5.7 Rayonnements solaires global et diffus mesurés sur une surface horizontale et Rayonnement direct sur plan normal, à l'extérieur de la serre

### 5.2.1.2 Rayonnement solaire à l'intérieur et à l'extérieur de la serre expérimentale

Les figures 5.8 et 5.9 représentent l'éclairement global instantané pour la journée du 28 Février 2010 et global journalier du 8/04/2010 jusqu'au 17/04/2010 mesurés à l'intérieur et à l'extérieur de la serre expérimentale. Le calcul du flux d'énergie total transmis à travers la couverture de la serre fait intervenir le coefficient de transmission du matériau de la couverture (polyéthylène), celui-ci est déduit expérimentalement par le rapport de l'éclairement global mesuré à l'intérieur de la serre à celui mesuré à l'extérieur de la serre.

On observe bien que la transmissivité est faible au début de la journée puis elle augmente d'une façon progressive au fur et à mesure que la journée avance pour atteindre une valeur de 0,75. Ce qui correspond à une élévation de l'éclairement global. Le phénomène de condensation va donc diminuer peu à peu jusqu'à sa disparition.

On constate qu'il y a une diminution de la transmissivité, cette réduction peut être attribuée d'une part au dépôt de poussière sur le film plastique et d'autre part de la formation de gouttelettes d'eau sur la surface intérieure de la couverture de la serre (l'effet de la condensation peut être influencée par la structure chimique des matériaux de couverture). Ceci est consistant avec les résultats trouvés par Cemerk et Demir [42]

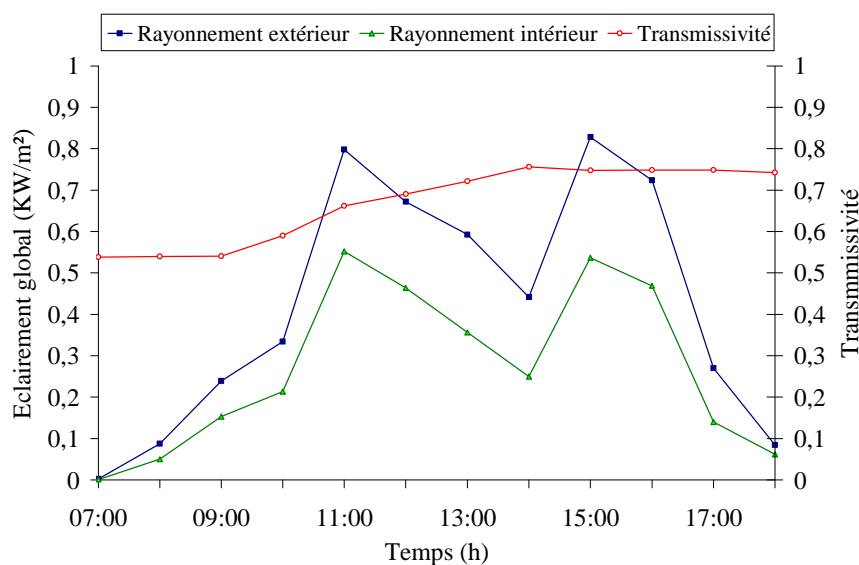


Figure 5.8 Eclairement global instantané mesuré à l'intérieur et à l'extérieur de la serre expérimentale

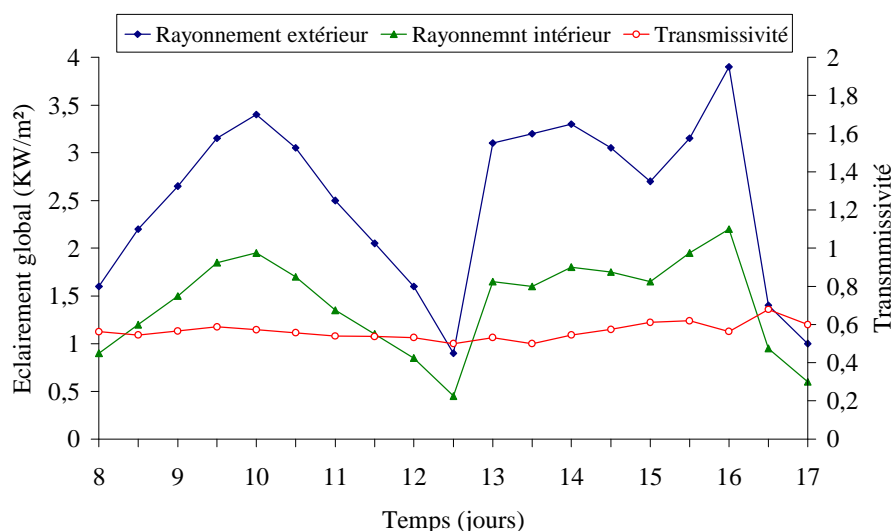


Figure 5.9 Eclairage global journalier mesuré à l'intérieur et à l'extérieur de la serre expérimentale

## 5.2.2 Température

### 5.2.2.1 Variation de la température dans le sol

La température du sol constitue une donnée essentielle et déterminante pour l'étude de ce projet. Comme la conservation de l'énergie se révèle de plus en plus nécessaire, les données sur la température du sol sont un aspect important du calcul des besoins énergétiques de la serre. A ce propos, trois sondes PT 100 ont été placées entre les conduites et sur le même axe de telle façon qu'elles aient la même profondeur (0.70 m). La figure 5.10 indique l'évolution des températures du sol dans ces conditions.

Selon les courbes tracées, nous avons constaté que les températures varient légèrement. On remarque que l'écart maximum (0,38 °C) des températures est observé dans les relevés donnés par T3. Or les variations de ces températures ne dépassent pas 0,2 °C pour les courbes de T1 et T2. Par conséquent, on peut les considérer presque constantes puisque les transferts de chaleur à travers l'axe qui passe par les sondes ne sont pas vraiment considérables.

Rappelons qu'on définit par :

- T1 : température du sol mesurée par la sonde N°07
  - T2 : température du sol mesurée par la sonde N°08
  - T3 : température du sol mesurée par la sonde N°09
- } Voir figure 4.27

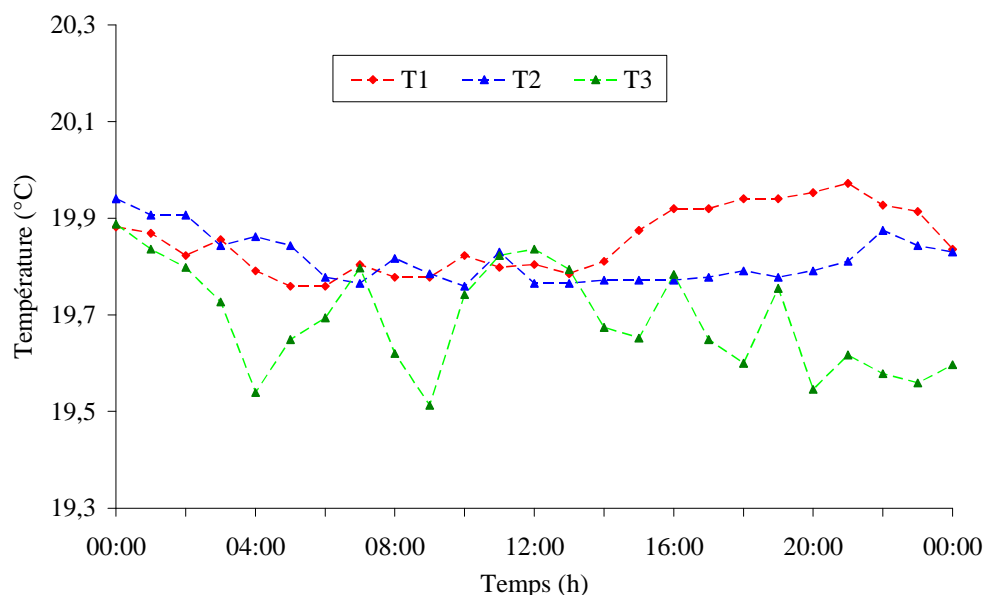


Figure 5.10 Evolution de la température du sol à l'intérieur de la serre

La deuxième étape consiste à présenter l'évolution des températures mesurées et calculées du sol pour plusieurs profondeurs : 10 cm, 50 cm et 100 cm. Les résultats théoriques et expérimentaux sont représentés respectivement par les figures 5.11 et 5.12.

En premier lieu, on remarque que la forme des courbes est périodique. En second lieu, nous avons noté que plus la profondeur augmente plus l'amplitude des températures diminue; c'est à dire que la différence entre les températures minimales et maximales diminuent en fonction de la profondeur. Un autre aspect très important se traduit par le fait que le déphasage entre les relevés des températures mesurées et calculées du sol pour chaque profondeur et les températures superficielles du sol croît rapidement en augmentation de la profondeur. De même, il est évident que les températures sont soumises à des variations moindres en profondeur qu'à la surface.

Ces appréciations et remarques peuvent être justifiées par le phénomène de l'inertie thermique du sol. Généralement, plus l'inertie thermique du sol augmente, plus la température maximale atteinte et les variations de température sont faibles. C'est-à-dire que nous avons confirmé que l'inertie thermique favorise une plus grande stabilité des températures. En plus, la texture du sol influe sensiblement sur les températures obtenues; plus il est compact (dense et solide) plus il déphase.

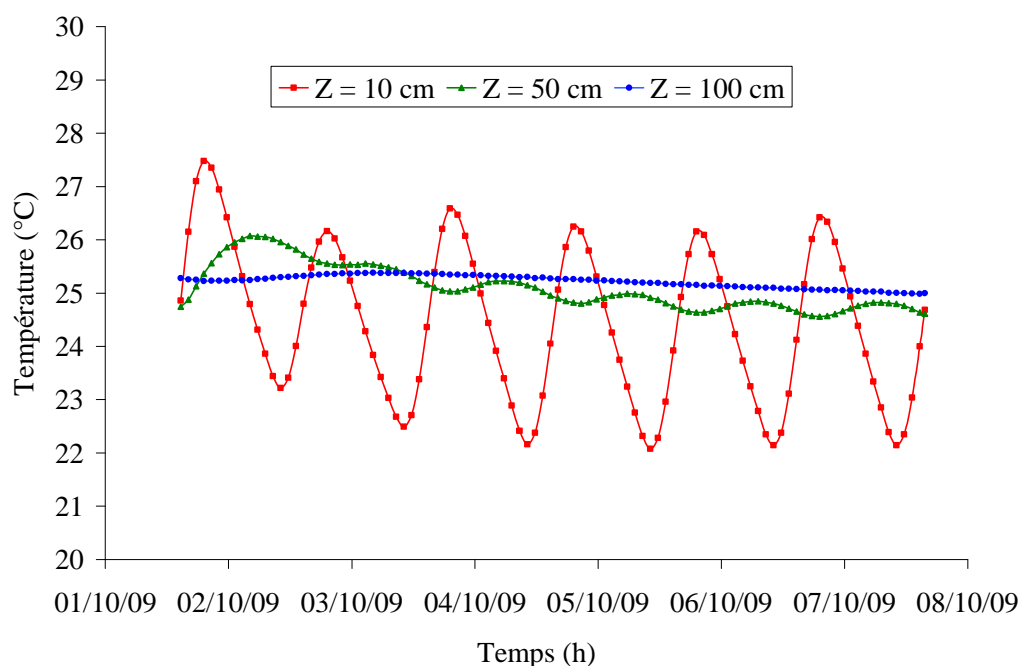


Figure 5.11 Evolution des températures mesurées du sol en dehors de la serre (Journées du 01 jusqu'à 08 octobre 2009)

En effet, les facteurs les plus influents sur la température du sol sont à titre indicatif les variables météorologiques, les variables du terrain et celles du sous-sol. Les différences de température du sol sont principalement déterminées par les variables météorologiques telles le rayonnement solaire et la température. Ces facteurs influent sur la température de la surface du sol et sur celle du sous-sol en agissant sur le taux de transmission des échanges de chaleur entre l'atmosphère et le sol. Le rayonnement solaire constitue cependant le facteur le plus important. La variation des températures du sol est fonction de la quantité d'énergie solaire absorbée à la surface du sol tout au long de l'année.

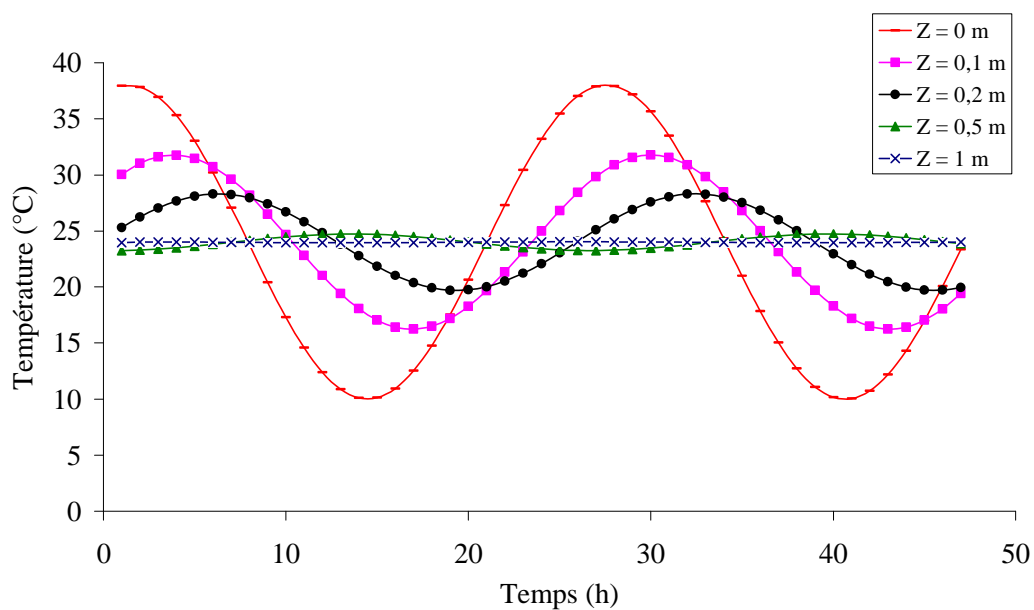


Figure 5.12 Evolution de la température calculée en fonction du temps à différentes profondeurs du sol

#### 5.2.2.2 Variation de la température des plantes

Les figures 5.13 et 5.14 montrent les comportements des températures des plantes mesurées dans la serre chauffée durant deux journées à savoir le 13 Février et le 12 Mars 2010. Ces températures seront confrontées avec les températures superficielles du sol.

On remarque que les courbes ont presque la même forme avec des écarts moins importants suivant les états de surface (absorptivité, réflectivité et émissivité). Les températures superficielles du sol sont généralement plus grandes par rapport à celles des plantes. L'écart maximum peut atteindre 5.1 °C (figure 5.13). Il est à noter que parfois la température du sol devient inférieure par rapport à la température de la plante; ceci est dû certainement à l'irrigation. Cette opération a été effectuée le 13 Février entre 7h30 et 11h30.



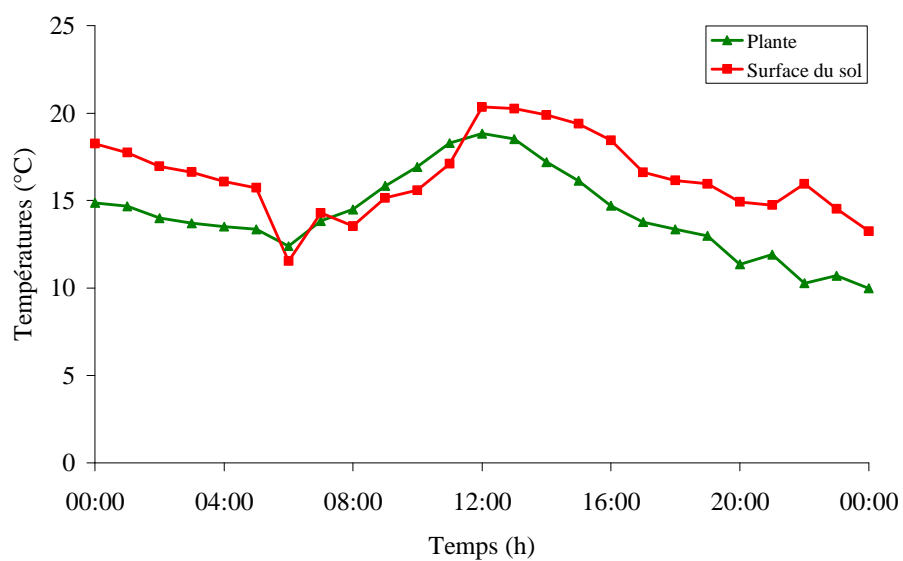


Figure 5.13 Evolution de la température mesurée dans la serre expérimentale (13 Février 2010)

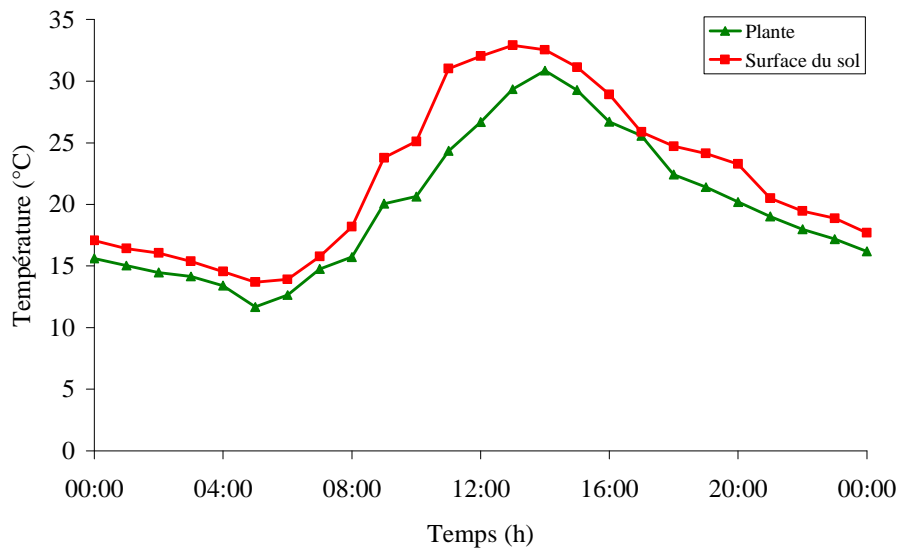


Figure 5.14 Evolution de la température mesurée dans la serre expérimentale (12 Mars 2010)

### 5.2.2.3 Variation de la température de l'air intérieur

Le principal paramètre auquel fait appel cette étude est la mesure de la température intérieure de la serre pour plusieurs sollicitations. Dans un premier temps, il s'agit de déterminer les températures de l'ambient intérieur et afin d'avoir un état représentatif, les thermocouples ont été placés sur le même axe vertical et selon les hauteurs de 2.4 m, 1.5 m et 0.5 m. Dans ce optique, nous proposons de tracer les profils des températures qui correspondent à la période allant du 04 au 11 Mars 2010 (figure 5.15).

Les résultats montrent que les courbes suivent les mêmes évolutions quelque soit la hauteur et avec un écart globalement faible et le phénomène de stratification de la température de l'air n'est pas aussi important. C'est pour cette raison qu'on peut supposer que la distribution de la température dans la serre est presque uniforme.

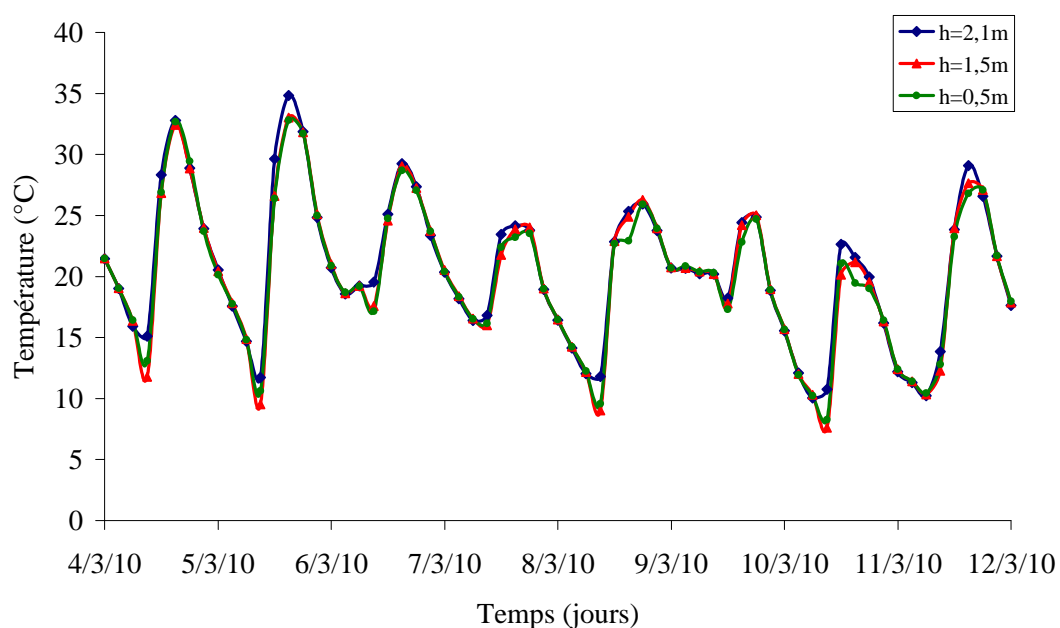


Figure 5.15 Evolution de la température de l'air intérieur pour différentes hauteurs (Journées du 04 jusqu'à 11 mars 2010)

Ce contexte nous amène par l'intermédiaire des résultats précédents à faire une étude comparative entre les températures de l'air à l'intérieur de la serre avec système de stockage, les températures de la serre témoin et les températures de

l'air extérieur. Les journées du 11 et du 23 Février 2010 ont été retenues pour établir cette tâche. Les figures 5.16 et 5.17 décrivent succinctement les profils des températures associées.

Tout d'abord, nous avons confirmé par la présente étude que la température de l'air intérieur de la serre est nettement supérieure par rapport à la température de l'air ambiant extérieur. Ces résultats sont automatiquement justifiés par l'effet de serre mis en jeu pendant la période diurne. Par ailleurs, nous avons remarqué que les températures dans la serre témoin présentent une légère augmentation par comparaison avec les températures enregistrées de l'air intérieur de la serre chauffée. Ces impressionnants résultats se traduisent par le fait que la serre chauffée est sous l'effet de plusieurs paramètres, on site à titre indicatif :

- Le système de stockage dans le lit de galets; une partie de la chaleur sera absorbée et emmagasinée dans le lit de galets.
- La serre témoin est plus protégée du vent par les arbres.
- La serre à stockage est soumise à un ombrage partiel le matin (présence de la bâtisse du poste de garde).

En ce qui concerne la période nocturne, nous avons constaté que la température dans la serre expérimentale est supérieure à celle de la serre témoin. Effectivement, on peut dire que nous sommes rapprochés de notre but primordial. En d'autres termes, nous avons réussi à chauffer partiellement l'air intérieur par le biais du système de stockage thermique. Le lit de galets cède de la chaleur par convection forcée vers l'air ambiant intérieur de la serre. A cet effet, nous estimons qu'il faudra améliorer l'inertie thermique des galets pour pouvoir gagner plus de température. Notre système installé permet de gagner environ 2.8 °C.

On peut noter, du point de vue production, que plus cette différence de températures augmente plus le taux de croissance de la plante augmente, alors il fallait gagner plus de température pour assurer une meilleure production.

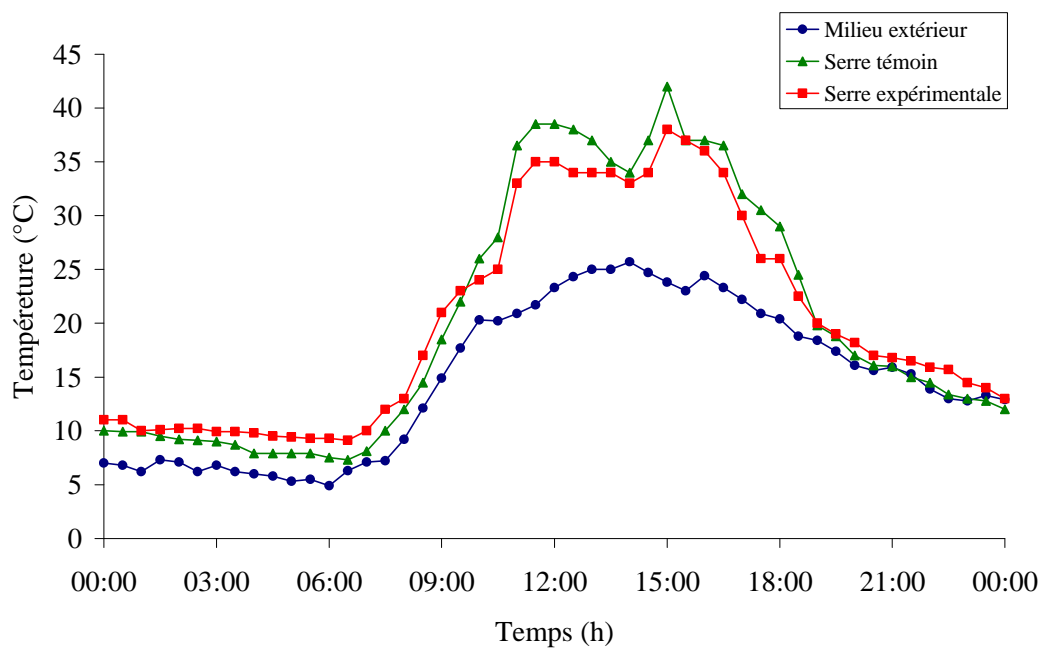


Figure 5.16 Evolution journalière de la température de l'air  
(11 Février 2010)

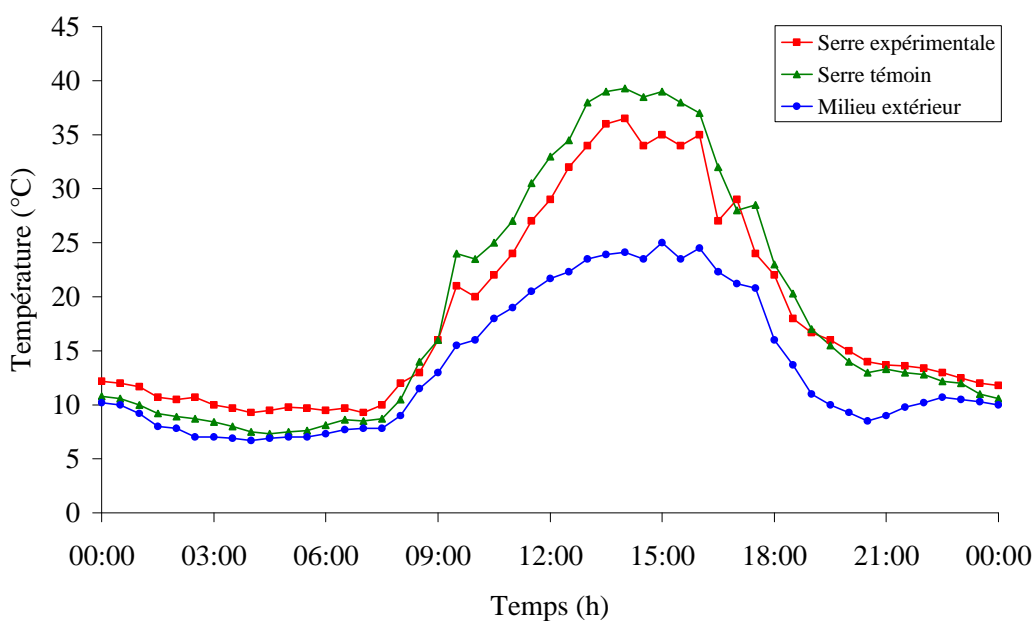


Figure 5.17 Evolution journalière de la température de l'air  
(23 Février 2010)

#### 5.2.2.4 Variation de la température du stockage

On s'est intéressé dans cette partie à la détermination de la température du système de stockage thermique à travers la mesure de la température de l'air en plusieurs points. L'emplacement des sondes PT100 a été inséré sur la même conduite, la localisation de ces dernières se fait par rapport à la position de l'orifice. Les distances entre l'orifice et les sondes sont respectivement :  $x = 0,5\text{m}$ ,  $x = 3\text{m}$ ,  $x = 5,5\text{m}$ ,  $x = 8\text{m}$  et  $x = 10\text{m}$  (voir la figure 4.27). Le stockage commence lorsque la température de l'air à l'intérieur de la serre est supérieure à  $27^\circ\text{C}$  (consigne). Les courbes qui donnent l'évolution instantanée des températures mesurées sont représentées par la figure 5.18 pour deux journées successives du mois de Février.

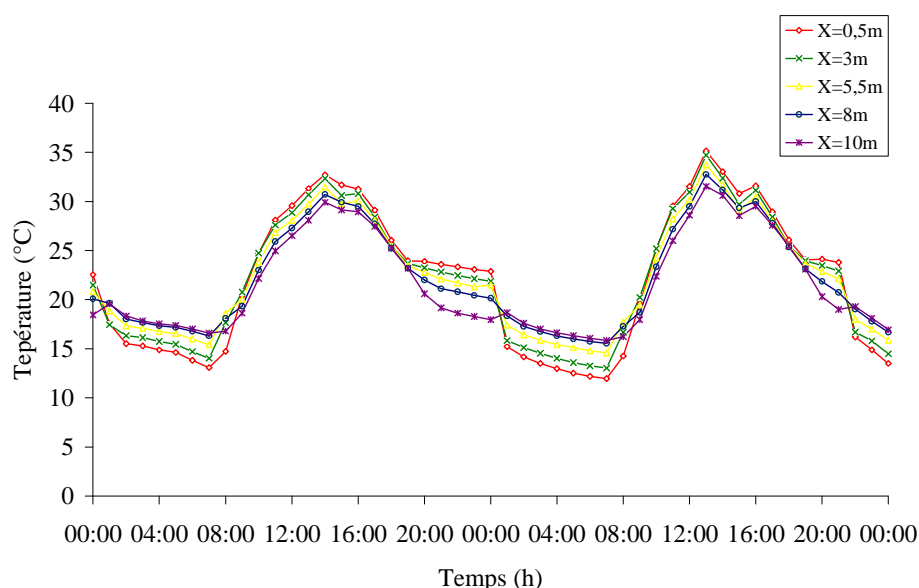


Figure 5.18 Evolution de la température mesurée de l'air du stock en fonction du temps pendant deux journées (stockage et déstockage)

Les résultats expérimentaux prouvent que, pendant une période diurne, les relevés des températures montrent une diminution de celles-ci avec la distance d'emplacement des thermocouples. Ce qui signifie que le transfert de chaleur convectif se propage le long de la conduite de l'entrée à la sortie de l'orifice. Les valeurs expérimentales de la distribution de la température font apparaître une certaine inertie au démarrage, néanmoins elles confirment le stockage de l'énergie. D'autre part, les relevés des températures montrent une augmentation de celles-ci avec la distance. Le phénomène physique dans ce cas conjugue la persistance du déstockage thermique des galets.

En effet, les figures 5.19 et 5.20 représentent la variation de la température de l'air à l'intérieur du stockage en fonction de la distance durant les deux périodes (diurne et nocturne).

Les résultats illustrés sur la figure 5.19 à 11h, 12h, 13h et 14h montrent que la température subit une diminution avec la distance.

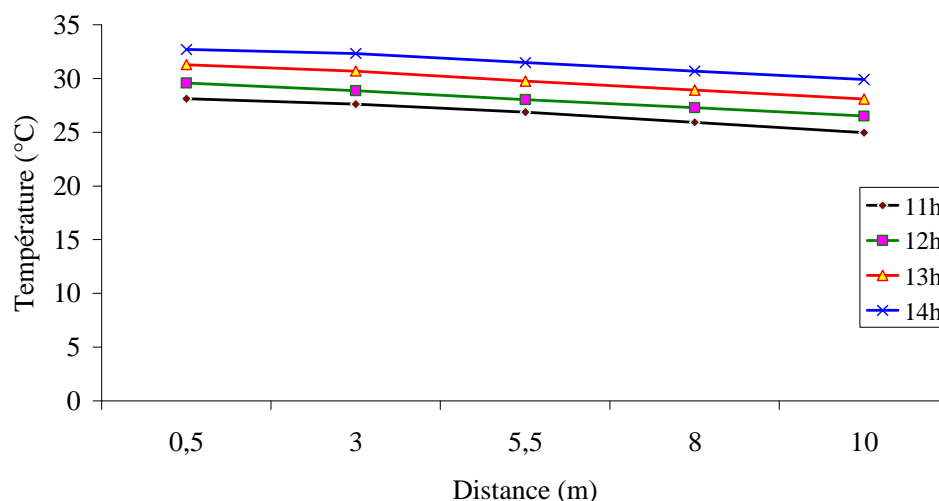


Figure 5.19 Evolution de la température mesurée de l'air dans le stock en fonction de la distance (stockage)

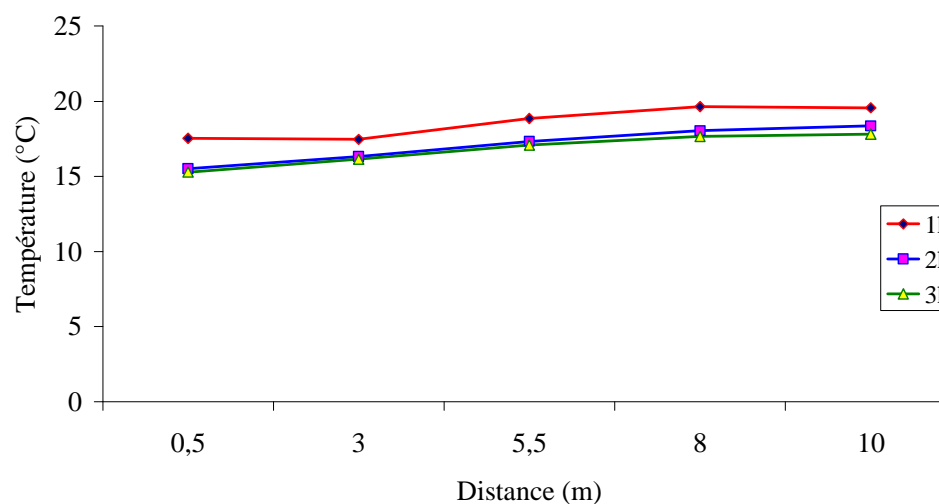


Figure 5.20 : Evolution de la température mesurée de l'air dans le stock en fonction de la distance (déstockage)

En respectant le sens de transfert de chaleur, on peut déduire que le seuil de stockage atteint son niveau maximum à l'entrée de l'orifice. En cas de déstockage

(figure 5.20), la variation de la température est rapport avec la distance. ce signifie que le système est sous l'effet du déstockage

### 5.2.3 Humidité relative

La figure 5.21 représente les évolutions des humidités relatives dans la serre expérimentale (serre avec système de stockage) et de l'air extérieur. Nous constatons que l'humidité relative à l'intérieur de la serre est supérieure à celle de l'air extérieur et que sa valeur maximale ne dépasse pas 95%. Nous enregistrons une humidité relative à l'intérieur de la serre variant entre 40 à 95%, le sol de la serre étant maintenu humide. Nous avons donc considéré que l'atmosphère intérieure de la serre est presque saturée en vapeur d'eau (évaporation du sol, évapotranspiration de la végétation).

Le degré d'humidité qu'il convient d'avoir dans la serre est directement fonction de sa température. En effet, l'augmentation brusque de la température de l'air par effet de serre engendre une chute rapide de son humidité relative; celle-ci atteint son minimum de 40% à 13h local où la température est à son maximum correspondant à un flux solaire maximum.

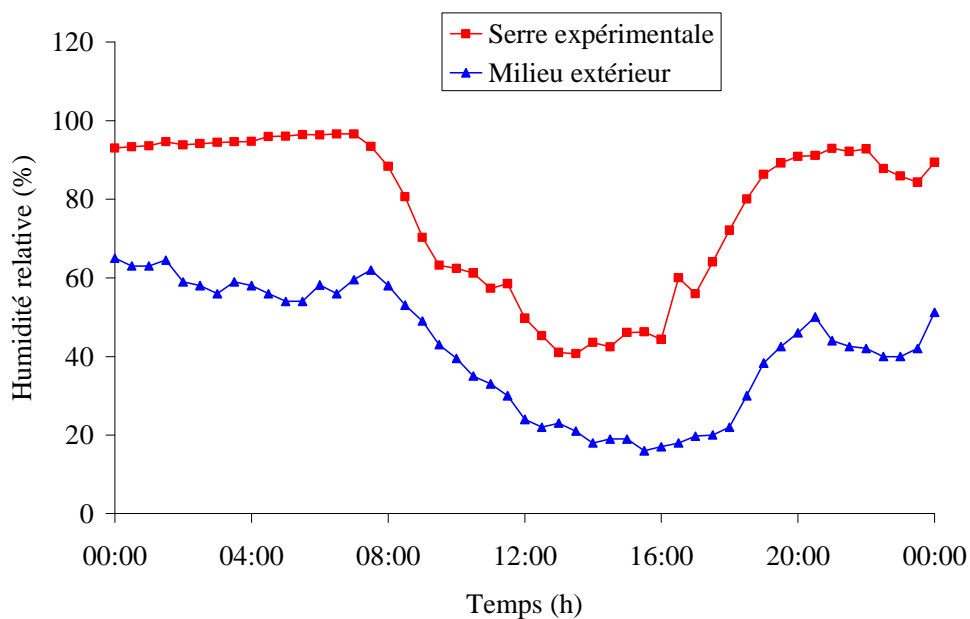


Figure 5.21 Evolution journalière de l'humidité relative de l'air  
(23 Février 2010)

Durant la nuit, l'humidité relative continue d'augmenter en suivant une évolution similaire à celle de l'ambiance jusqu'à 21h00, heure où nous enregistrons des valeurs de l'humidité relative à l'intérieur de la serre supérieures à celles de l'air extérieur.

Les figures 5.22 et 5.23 représentent les évolutions des humidités relatives de la serre expérimentale, de l'air extérieur et de la serre témoin.

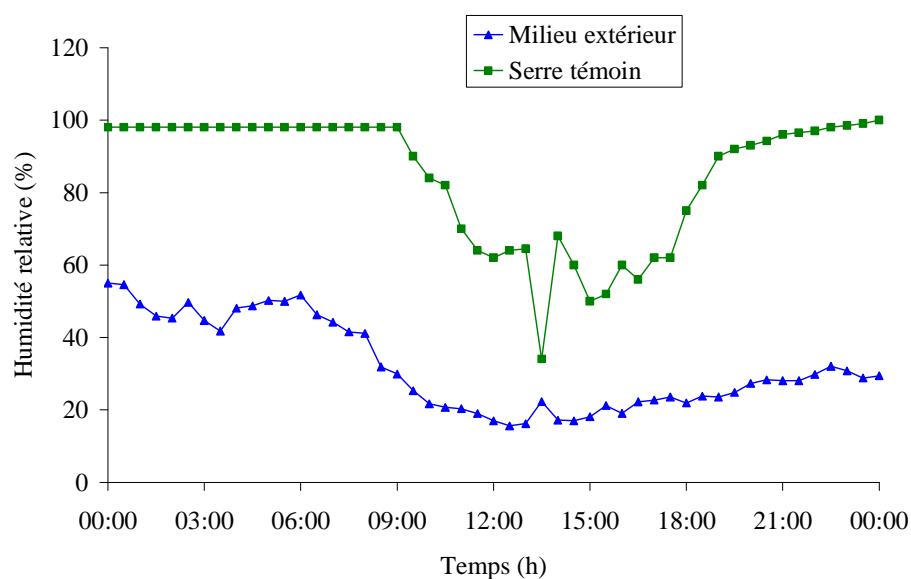


Figure 5.22 Evolution journalière de l'humidité relative de l'air (11 Mars 2010)

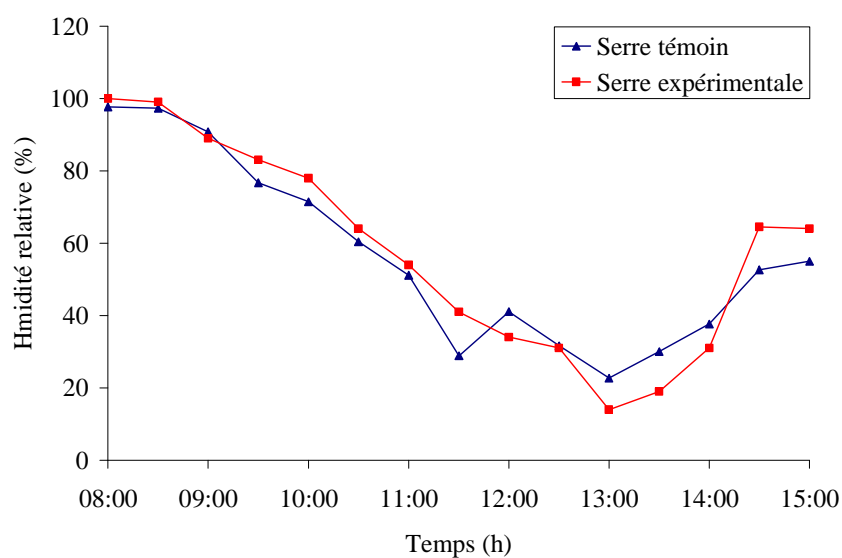


Figure 5.23 Evolution de l'humidité relative de l'air (02 Mars 2010)



Nous constatons que l'humidité relative de l'air extérieur est inférieure par rapport à l'humidité relative de l'air intérieur dans les deux serres (chauffée et témoin). Il est important de signaler aussi que les valeurs de l'humidité relative augmentent lorsque les températures diminuent.

Sur les figures (5.24) et (5.25), on a présenté les besoins de chauffage de la serre témoin et de la serre expérimentale pour la nuit du 16 au 17 Mars 2010, avec une température de consigne de 17°C (température nocturne nécessaire à la courgette durant ce stade de développement). Les courbes montrent que les besoins de la serre expérimentale sont inférieurs à ceux de la serre témoin. Ces résultats prouvent que le système de stockage thermique avec lit de galets est partiellement efficace et il n'est pas vraiment satisfaisant.

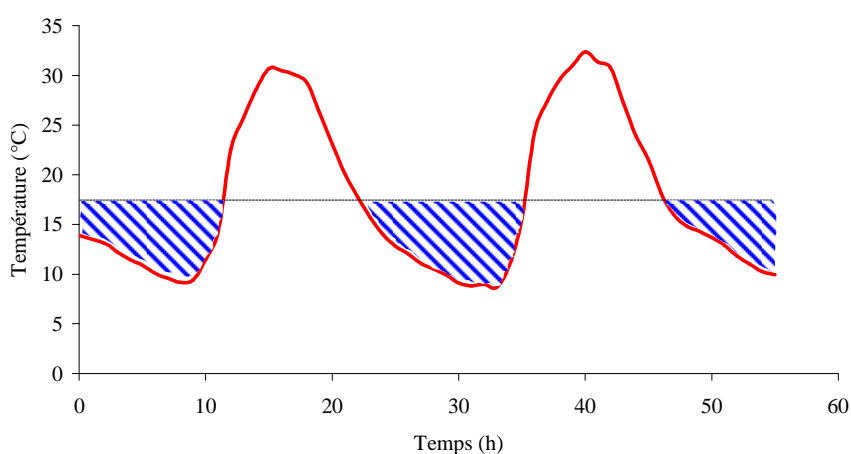


Figure 5.24 Besoin de chauffage de la serre témoin

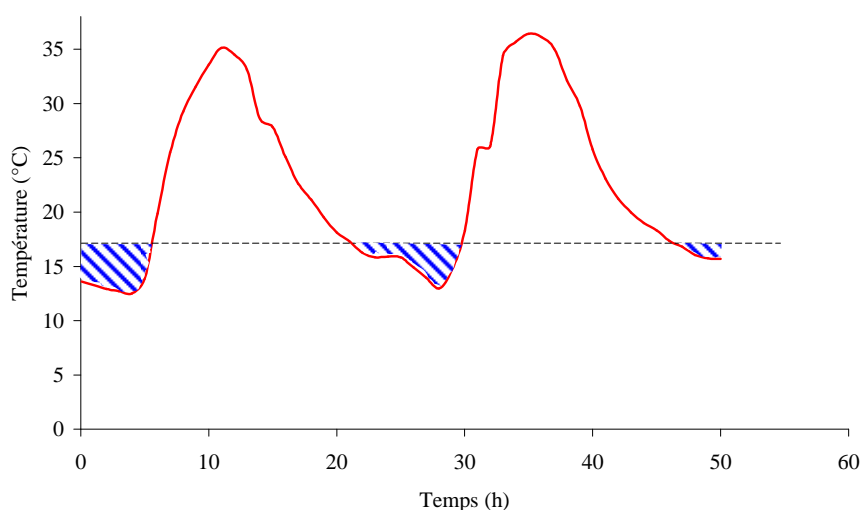


Figure 5.25 Besoin de chauffage de la serre expérimentale

### 5.3 Résultat agronomique à titre indicatif

Pour la culture, notre choix s'est porté sur la « courgette ».

#### ▪ la conduite de la culture

- Le semis a été effectué sur place le 09 Janvier 2010 pour les deux serres (serre expérimentale et témoin).

- L'apparition des cotylédons a été observée le 14 Janvier 2010 dans la serre chauffée (avec un système de stockage thermique), c'est-à-dire 05 jours après le semis et le 20 Janvier 2010 pour la serre non chauffée (serre témoin), c'est-à-dire 11 jours après le semis.

- L'apparition des premières feuilles était comme suit :

- \* le 22 janvier 2010 pour la serre chauffée ;
- \* le 27 janvier 2010 pour la serre non chauffée ;

- La végétation est meilleure dans la serre chauffée et cela se confirme dans la taille des feuilles des courgettes.

- La récolte a commencé le 02 mars 2010, et s'est achevé le 10/06/2010.

- Pour la serre témoin, la récolte a débuté le 21 mars 2010, pour s'achever le 23/05/2010.

#### ▪ la maturité

- L'expérience a été faite sur une période de cinq mois (Janvier-Juin) 2010 à Ghardaïa et a montré que, par rapport à la serre non chauffée, le rythme de développement de la courgette sous serre chauffée est beaucoup plus accéléré, d'une valeur de :

- \* 2,5 cm/jour pour la serre chauffée
- \* 1,4 cm/jour pour la serre non chauffé

- La production des courgettes dans la serre chauffée commence trois semaines avant celle de la serre témoin; ce qui représente une bonne précocité, engendrant ainsi un gain matériel appréciable.

- Les productions obtenues sont respectivement :

- \* pour la serre chauffée plus de 0,48 tonne
- \* pour la serre non chauffée plus de 0,3 tonne

## CONCLUSION

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre d'un projet de recherche qui porte sur « Etude, Conception, Réalisation et Amélioration des Serres Agricoles dans les Régions Arides et Semi Arides ». Ils ont été effectués au sein de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies renouvelables de Ghardaïa. On s'est intéressé dans ce mémoire à modélisation, la réalisation et l'étude expérimentale de deux serres agricoles, une serre témoin et l'autre chauffée, en introduisant un lit de galets comme système de stockage.

Après avoir rappelé des généralités sur l'environnement y compris les plantes, les serres et le stockage, nous avons défini un bilan d'énergie de la serre avec stockage en lit de galets qui décrit le comportement thermique de la serre et du stockage.

Les résultats obtenus à l'issue de ces études montrent que les températures (air intérieur, sol et plante), l'humidité, l'inertie thermique des galets et les irradiances solaires sont des paramètres déterminants qui influent sensiblement sur la production agricole en général. En effet les besoins extérieurs de la serre expérimentale sont inférieurs à ceux de la serre témoin. Ces résultats prouvent que le système de stockage thermique dans le lit de galets est partiellement efficace.

En ce qui concerne l'impact du stockage thermique sur le microclimat de la serre, l'étude a montré que ce système de stockage permet d'emmagasiner l'excès de la chaleur captée par effet de serre durant la journée puis, le restituer pour besoin du chauffage nocturne. Par cet effet, il se trouve que la température de la serre expérimentale est supérieure à celle de la serre témoin.

En conséquence, on peut dire qu'il faut améliorer les paramètres les plus influant qui favorisent un développement régulier des plantes à l'aide de notre système de stockage. Néanmoins, l'efficacité du stockage peut être améliorée par l'augmentation de la chaleur intérieure de la serre. Pour répondre le mieux possible aux besoins de chaleur de la plante, nous recommandons de :

- Déterminer le diamètre équivalent et la longueur du lit de telle façon à avoir un bon échange thermique entre l'air et les galets et limiter les pertes de charge.
- Faire accroître la capacité de stockage d'énergie en augmentant le volume du lit de galets (le volume de stockage nécessaire répond à tous les besoins de la végétation).
- Utiliser pour le stockage d'énergie un autre matériau ayant une capacité calorifique beaucoup plus importante que les galets.

## APPENDICE A

### ASPECT GEOMETRIQUE DU RAYONNEMENT SOLAIRE

Il s'agit dans cette partie de rappeler les différentes notions de base concernant le phénomène de transfert de chaleur par rayonnement, en se basant sur les références [43/14/44].

#### 1. Paramètre astronomique

- *Latitude et longitude* : Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre. La longitude est l'angle formé entre le méridien qui passe par « Greenwich » et le méridien qui passe par le point considéré.

La latitude est l'angle formé entre le plan équatorial et le plan passant par le site considéré, elle permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque par rapport à l'équateur. Elle varie de (0° à 90°) dans l'hémisphère nord et de (0° à -90°) dans l'hémisphère sud.

- *La déclinaison du soleil* : La déclinaison du soleil  $\delta$  varie de -23,45° à +23,45° avec une période d'un an. Il existe plusieurs façons de déterminer  $\delta$  dans la pratique, pour une journée bien donnée. La première méthode consiste à consulter les éphémérides astronomiques telles que les tables publiées annuellement dans l'Annuaire de bureau de longitudes. On y trouve la valeur de  $\delta$  jour par jour. Cette méthode est évidemment la plus précise. On peut aussi essayer de relier  $\delta$  au numéro du jour de l'année considérée par une formule unique, valable quelle que soit l'année en cours ; diverses formules existent et nous citons la suivante :

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left((j + 284) \cdot \frac{360}{365}\right)$$

avec :

j : le numéro de jours dans l'année, il varie entre 1 et 365

Les valeurs critiques :

$\delta = 23^{\circ}27'$	au 21 juin solstice d'été
$\delta = 0$	au 21 septembre équinoxe d'automne
$\delta = -23^{\circ}27'$	au 21 décembre solstice d'hiver
$\delta = 0$	au 21 mars équinoxe de printemps

- *Angle horaire* : C'est l'angle compris entre le plan méridien du lieu d'observation et la projection du rayon solaire sur le plan équatorial. Il est déterminé par la rotation régulière de la terre autour de son axe. Il est donc lié directement au temps solaire vrai (TSV).

L'angle horaire s'écrit alors:

$$w = 15(\text{TSV} - 12)$$

Les angles horaire sont comptés positivement à partir du midi solaire vrai jusqu'au coucher du soleil et négativement du lever du soleil au midi solaire vrai.

- *Correction de la distance terre-soleil* : La distance terre-soleil varie de  $\pm 1,7\%$  entre périhélie et aphélie. Il en résulte pour le flux solaire qui atteint la terre une variation corrélative de  $\pm 3,4\%$ .

On effectuera donc la valeur moyenne du flux solaire qui atteint la terre d'un coefficient C traduisant cette variation. Là encore, on a plusieurs méthodes de calcul comme pour la déclinaison, on peut donc avoir pour C des formules d'une précision extrême provenant en droite ligne des calculs astronomiques mais de précision totalement inutile pour l'application qui nous intéresse.

On approximera encore C par la formule suivante :

$$C = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{360j}{365}\right)$$

- *Temps solaire vrai* : Le temps solaire vrai est défini comme l'intervalle de temps séparant deux passages consécutifs du soleil au méridien du lieu. Il est divisé en 24 heures solaires vraies.

D'où l'expression de temps solaire vrai :

$$TSV = TL - 1 + \frac{ET}{60} + \frac{L_{ref} - L_{lieu}}{15}$$

Où :

TL : le temps local;

$L_{lieu}$  : latitude de lieu;

ET : équation du temps;

$L_{ref}$  : latitude de référence;

Le (-1) vient du décalage horaire du fait que l'Algérie est en TGMT (+1).

- *Equation du temps* : L'équation du temps tenant compte des perturbations du mouvement de la terre, est donnée en minutes par SPENCER ( 1971) :

$$ET = 229,2.[0,000075 + 0,001868 \cos(\beta) - 0,032077 \sin(\beta) - 0,014615 \cos(2\beta) - 0,04089 \sin(2\beta)]$$

avec :  $\beta = (j - 1) \cdot \frac{360}{365}$

## 2. Repérage du soleil dans le ciel

On peut à partir des lois régissant les mouvements apparents du soleil, par rapport à l'observateur terrestre, calculer les coordonnées du soleil en tout point de la terre et à tout instant. On trouve les formules classiques suivantes :

- *Hauteur du soleil*

$$\sin(h) = \sin(\delta) \sin(\varphi) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(w)$$

avec :

$\varphi$  : latitude du lieu;

$\delta$  : déclinaison du soleil;

w : angle horaire du soleil;

- Angle d'azimut

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(w)}{\cos(h)}$$

- Angle zenithal

$$\cos(\theta_z) = \cos(\delta) \cos(h) \cos(\varphi) + \sin(\delta) \sin(\varphi)$$

### 3. Calcul de l'angle d'incidence

Vu l'importance des angles d'incidence dans le calcul des puissances solaires absorbées, nous avons besoin de décrire avec précision le choix de leurs expressions qui dépendent du type du rayonnement incident, le lieu de sa propagation ainsi que l'inclinaison de la surface réceptrice.

L'angle d'incidence  $\theta_i$  de la radiation solaire frappant directement la face extérieure de la paroi  $i$  de l'enceinte est donné par la relation suivante :

$$\begin{aligned} \cos(\theta_i) = & \sin(\delta) \sin(\varphi) \cos(\phi) - \sin(\delta) \cos(\varphi) \sin(\phi) \cos(a) \\ & + \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\phi) \cos(w) \\ & + \cos(\delta) \sin(\varphi) \sin(\phi) \cos(w) \cos(a) \\ & + \cos(\delta) \sin(a) \sin(\phi) \sin(w) \end{aligned}$$

$\varphi$  : latitude du site

$w$  : l'angle horaire

$a$  : azimut du soleil

$\phi$  : déclinaison du plan

$\delta$  : déclinaison du soleil

### 4. Facteur de trouble atmosphérique

La connaissance de facteur de trouble atmosphérique est nécessaire pour déterminer les irradiances par ciel clair. Ce facteur est le rapport entre l'extinction du rayonnement directe traversant une atmosphère de référence constituée uniquement d'air pur et sec sous la même incidence. Dans le modèle de



Capderou, le facteur de trouble atmosphérique de Linke par ciel clair est donné par :

$$X_L = X_0 + X_1 + X_2$$

$X_0$  : est le trouble dû à l'absorption gazeuse tant par les constituants fixes de l'atmosphère que par l'ozone et surtout par la vapeur d'eau. Une modélisation de ce facteur en fonction des seules paramètres géo-astronomiques a permis à Capderou de proposer l'expression suivante :

$$X_0 = 2.4 - 0.9 \sin(\varphi) + 0.1(2 + \sin(\varphi))Y - 0.2.Z - (1.22 + 0.14Y)(1 - \sin(h))$$

$$Y = \sin\left[\left(\frac{360}{365}\right)(j - 121)\right]$$

Z : l'altitude de lieu ;

$X_1$  : est le trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> et O<sub>3</sub> et à la diffusion moléculaire de Rayleigh donné par l'approche :

$$X_1 = 0.89^Z$$

$X_2$  : est le trouble relatif à la diffusion par les aérosols couplées à une légère absorption (dépendent la fois de la nature et de la quantité des aérosols). En fonction du coefficient de trouble d'Angstrom,  $X_2$  est donnée par :

$$X_1 = (0.9 + 0.4Y)0.63^Z$$

### 5. Le diffus de ciel « $I_{d_{ciel}}$ »

Il est composé de trois parties :

$$I_{d_{ciel}} = \delta_d \cos(\theta_i) + \delta_h \cos(\varphi) + \delta_i \frac{1 + \sin(\varphi)}{2}$$

avec :

$$\delta_d = I_0 \cdot C \cdot \exp \left[ -2.48 + \sin(h) + a - \sqrt{a^2 + 4b^2} \right]$$

$$a = 3.1 - 0.4b$$

$$b = \log(X_L - X_0) - 2.8 - 0.5 \log(\sin(h))$$

$$\delta_h = I_0 \frac{-0.02}{a^2 + ab + 1.8} \exp[\sin(h)]$$

$$a = \log(X_L - X_0) - 3.1 - \log[\sin(h)]$$

$$b = \exp[0.2 - 1.75 \log(\sin(h))]$$

$$\delta_i = I_0 \cdot C \cdot \exp \left[ -1 + 1.06 \cdot \log(\sin(h)) + a - \sqrt{a^2 + b^2} \right] - \delta_d \cdot \sin(h)$$

### 6. Le diffus du sol « $I_{d_{sol}}$ »

$$I_{d_{sol}} = \delta_a \frac{1 - \sin(\varphi)}{2}$$

$$\delta_a = alb \cdot [ID \cdot \sin(h) + Idh]$$

$$IDh = I_0 \cdot C \cdot \sin(h) \cdot \exp \left( -X_L \left( 0.9 + \frac{9.4}{0.89^2} \sin(h) \right)^{-1} \right)$$

$$Idh = I_0 \cdot C \cdot \exp \left[ -1 + 1.06 \cdot \log(\sin(h)) + a - \sqrt{a^2 + b^2} \right]$$

$$a = 1.1$$

$$b = \log(X_L - X_0) - 2.8 + 1.02[1 - \sin(h)]^2$$

$$alb = 0.16$$

## APPENDICE B

### PROPRIETES THERMOPHYSIQUES DES ELEMENTS DE LA SERRE

#### 1. Grandeur thermophysiques de la couverture de la serre

Dans le cas de notre étude, la couverture est considérée comme simple paroi de type polyéthylène a basse densité et possède les propriétés optiques et physiques suivantes :

❖ Coefficient de transmission

Le coefficient de transmission de la couverture de la serre dépend de l'angle d'incidence du rayonnement solaire et son expression s'écrit comme suit [43] :

$$\tau_i(\theta_i) = \frac{\tau_{ai}}{2} \left[ \frac{(1-r_{\perp i}^2)}{1-(r_{\perp i} \cdot \tau_{ai})^2} + \frac{(1-r_{//i})^2}{1-(r_{//i} \cdot \tau_{ai})^2} \right]$$

Dans laquelle :

- $\theta_i$  : Angle d'incidence du rayonnement solaire sur la paroi i [rd] ;
- $r_{\perp i}$  : Coefficient de réflexion de la paroi i correspondant à la direction perpendiculaire de polarisation du rayonnement incident, il est calculé à l'aide de la loi de FRESNEL suivante [43] :

$$r_{\perp i} = \frac{\sin^2(\theta_r - \theta_i)}{\sin^2(\theta_r + \theta_i)}$$

Avec :  $\theta_i$  représentant l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur la paroi i [rd] ;

$\theta_r$  : Angle de réfraction du rayonnement solaire (voir figure A2.1) ;  
donné par la loi de SELL [43] :

$$\theta_r = \arcsin\left(\frac{1}{n_i} \cdot \sin(\theta_i)\right)$$

avec :  $n_i$  : Indice de réfraction de la paroi i (voir tableau ci-dessous)

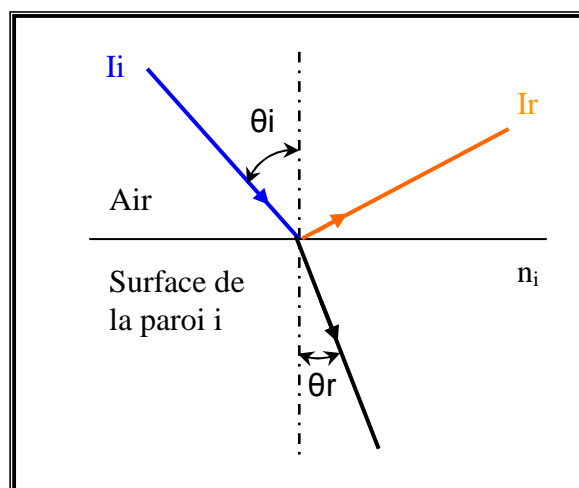


Figure A2.1 Angle d'incidence et de réfraction d'un rayon solaire sur la paroi

Matériau de la couverture	Valeur moyenne de N
Verre	1,526
Polyéthylène	1,51
Polyvinylfluoride	1,45
Polytetrafluoroethylene	1,37
Polymethyl méthacrylte	1,49

Tableau A2.1 Valeur moyenne de l'indice de réfraction n pour quelques matériaux

▪  $r_{//i}$  : coefficient de réflexion de la paroi i correspondant à la direction parallèle de polarisation du rayonnement incident. Son expression est donné par la loi de FRESNEL [43]:

$$r_{//i} = \frac{\tan^2(\theta_r - \theta_i)}{\tan^2(\theta_r + \theta_i)}$$

Où :  $\theta_i$  : Angle d'incidence du rayonnement solaire sur la paroi i [rd] ;

$\theta_r$  : Angle de réfraction du rayonnement solaire [rd] ;

▪  $\tau_{ai}$  : coefficient de transmission pour un milieu absorbant, donnée par la loi de BOUGUER et s'écrit [43] :

$$\tau_{ai} = \exp\left(\frac{-K_v \cdot E_i}{\cos(\theta_r)}\right)$$

avec:  $K_v$  : Coefficient d'extinction du polyéthylène égal  $155\text{m}^{-1}$ ;

$E_i$  : Épaisseur de paroi i de la couverture

❖ Coefficient d'absorption

Les parois translucides de la couverture présentent des pertes par absorption et par réflexion vis à vis du rayonnement solaire incident [43/28]

Lorsque le rayon incident n'a pas une direction de polarisation privilégiée, ce coefficient d'absorption de la paroi i est donné en fonction de l'angle d'incidence  $\theta_i$  par l'expression suivante [43] :

$$\alpha(\theta_i) = \left(\frac{1 - \tau_{ai}}{2}\right) \left(\frac{1 - r_{\perp i}}{1 - r_{\perp i} \tau_{ai}} + \frac{1 - r_{//i}}{1 - r_{//i} \tau_{ai}}\right)$$

Dans laquelle :

- $\theta_i$  : Angle d'incidence du rayonnement solaire sur la paroi i [rd] ;
- $r_{\perp i}$  : Coefficient de réflexion de la paroi i correspondant à la direction perpendiculaire de polarisation du rayonnement incident ;
- $r_{//i}$  : Coefficient de réflexion de la paroi i correspondant à la direction parallèle de polarisation du rayonnement incident ;
- $\tau_{ai}$  : Coefficient de transmission pour un milieu absorbant.
- ❖ Emissivité du polyéthylène

L'émissivité de chaque nœud i de la couverture est estimée à :  $\varepsilon = 0,2$

❖ La capacité calorifique du polyéthylène :  $C_p = 2,1 \cdot 10^6 (\text{J}/\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ .

## APPENDICE C

### TRANSFERT CONDUCTIF (CAS MONODIRECTIONNEL) DANS UN MILIEU SEMI-INFINI EN REGIME PERIODIQUE

#### EQUATION DE LA TEMPERATURE

Le sol est un milieu semi-infini limité sur sa face supérieure par un plan sur lequel est appliqué un signal de température périodique  $T = f(t)$ . Les caractéristiques thermiques sont connues.

En négligeant les effets de bord, à l'intérieur de la serre par exemple. L'équation traduisant l'évolution thermique du sol est :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (\text{A3-1})$$

$$a = \frac{k_s}{\rho \cdot C_p} : \text{diffusivité thermique du sol} \quad (\text{A3-2})$$

$k_s$  : conductivité

$\rho$  : densité

$C_p$  : chaleur massique

$z$  : profondeur

Les conditions aux limites sont :

$$\text{CL : 1-1} \quad T = T_0 + \Delta T \cos \omega t \quad \text{pour } z = 0 \quad (\text{A3-3})$$

$$\text{CL : 2-1} \quad T = T_0 \quad \text{pour } z = \infty \quad (\text{A3-4})$$

Avec :  $\Delta T = T_1 - T_0$  : amplitude de variation de la température ;

$\omega$  : fréquence de cette variation ;

$$\text{En introduisant} \quad \theta = \frac{T - T_0}{T_1 - T_0} \quad (\text{A3-5})$$

$\theta$  : température adimensionnelle

L'équation (A3-1) s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (\text{A3-6})$$

Les conditions aux limites sont :

$$\text{CL : 1-1} \quad T = T_0 + \Delta T \cos \omega t \quad \text{pour } z = 0 \quad (\text{A3-7})$$

$$\text{CL : 2-1} \quad T = T_0 \quad \text{pour } z = \infty \quad (\text{A3-8})$$

Hypothèse de base :

$[\theta]$  est une fonction de  $[z]$  et de  $[t]$  : cela suppose que  $\theta$  est périodique dans le temps avec une amplitude dépendant de  $x$ .

Compte tenu de cette hypothèse. L'équation (A3-5) peut s'écrire :

$$\theta(x, t) = f(x)[\cos \omega t - \theta(z)] \quad (\text{A3-9})$$

Où  $f(x)$  : amplitude adimensionnelle

$$\begin{aligned} \text{égale à :} \quad f(x) &= 1 && \text{pour } z = 0 \\ f(x) &\rightarrow 0 && \text{pour } z \rightarrow \infty \end{aligned}$$

et  $\theta(x)$  déphasage

$$\begin{aligned} \text{égale à :} \quad \theta(x) &= 0 && \text{pour } z = 0 \\ \theta(x) &\rightarrow \infty && \text{pour } z \rightarrow \infty \end{aligned}$$

L'utilisation de variables complexes rend la résolution de l'équation (A3-5) possible

$$\text{Soit} \quad \theta(x, t) = f(x).e^{i[\omega t - \theta(x)]} \quad (\text{A3-10})$$

La partie réelle de  $\bar{\theta}$ , donnée par l'équation (A3-9) est la solution recherchée de notre problème.

En substituant  $\bar{\theta}$  par  $\theta$  dans l'équation (A3-6), nous pouvons écrire :

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial x^2} \quad (\text{A3-11})$$

avec les conditions aux limites :

$$\text{CL : 1-3} \quad \bar{\theta} = e^{i\omega t} \quad \text{pour } z = 0 \quad (\text{A3-12})$$

$$\text{CL : 2-3} \quad \bar{\theta} = 0 \quad \text{pour } x = \infty \quad (\text{A3-13})$$

Nous pouvons remarquer que la partie réelle de  $\bar{\theta}$  satisfait l'équation (A3-6) assujettie des conditions aux limites CL : 1-2 et CL : 2-2 (relation (A3-7) et (A3-8)), l'équation (A3-10) peut être écrite sous la forme :

$$\bar{\theta} = g(x) e^{i\omega t} \quad (\text{A3-14})$$

$$\text{Avec : } g(x) = f(x) e^{-i\theta(z)}$$

La substitution de l'équation (A3-14) dans les équation (A3-11) à (A3-13) nous donne l'équation différentielle de  $g(x)$  avec ses conditions aux limites à savoir :

$$i\omega g = a \frac{d^2 g}{dz^2} \quad (\text{A3-15})$$

$$\text{CL : 1-4} \quad g = 1 \quad \text{pour } x = 0 \quad (\text{A3-16})$$

$$\text{CL : 2-4} \quad g = 0 \quad \text{pour } x = \infty \quad (\text{A3-17})$$

Remarque Dans l'équation (A3-15) nous avons simplifié par terme commun  $e^{i\omega t}$ , la solution de  $g(x)$ , de la forme  $g(z) = e^{mx}$  est :

$$g(z) = C_1 e^{-z(1+i)\sqrt{\omega/2a}} + C_2 e^{z(1+i)\sqrt{\omega/2a}} \quad (\text{A3-18})$$

L'application des conditions aux limites CL :1-4 et CL : 2-4 (relation (A3-16) et (A3-17)) nous donne :

$$C_2 = 0 \quad \text{et} \quad C_1 = 0$$

L'expression de  $\bar{\theta}$  devient :

$$\bar{\theta} = e^{-x(1+i)\sqrt{\omega/2a}} \cdot e^{i\omega t} \quad (\text{A3-19})$$



Exprimée en termes de partie réelle et imaginaire l'équation (A3-19) devient :

$$\bar{\theta} = e^{-x\sqrt{\omega/2a}} \left\{ \cos(z\sqrt{\omega/2a}) \cdot \cos \omega t + \sin(z\sqrt{\omega/2a}) \cdot \sin \omega t \right\} + i \left\{ \cos(z\sqrt{\omega/2a}) \cdot \sin \omega t - \sin(z\sqrt{\omega/2a}) \cdot \cos \omega t \right\} \quad (\text{A3-20})$$

Nous nous intéressons uniquement à la partie réelle de l'équation (A3-20) qui peut être écrite sous forme :

$$\theta = \frac{T - T_0}{T_1 - T_0} = e^{-z\sqrt{\omega/2a}} \left[ \cos \omega t - (z\sqrt{\omega/2a}) \right] \quad (\text{A3-21})$$

Et en définitif :

$$T(z,t) = T_0 + \Delta T \cdot e^{-z\sqrt{\omega/2a}} \left[ \cos \omega t - (z\sqrt{\omega/2a}) \right] \quad (\text{A3-22})$$

Où :  $z\sqrt{\omega/2a}$  déphasage en profondeur ;

$e^{-z\sqrt{\omega/2a}}$  amortissement du signal ;

Remarque :

$G = \sqrt{\frac{\omega}{2a}}$  intervient à la fois dans le terme de déphasage et dans celui de l'amortissement.

L'hypothèse de base considérant  $\theta = f(z,t)$  s'avère correcte, dans la pratique, la température n'évolue sensiblement au cours d'une journée que dans une épaisseur inférieure à 100 cm.

En effet, dans l'hypothèse où la loi  $f(t)$  est de la forme  $T = T_0 + \Delta T \sin \omega t$ , le signal à la profondeur  $z$  s'écrit :

$$T(z,t) = T_0 + \Delta T \sin(\omega t - Gx) \cdot e^{-Gx}$$

## REFERENCES

1. Kittas, C., "Contribution théorique et expérimentale à l'étude du bilan d'énergie des serres", Thèse docteur-ingenieur; Université de Perpignan; (1980).
2. Iqbal, M. and Stoffers., "Natural convection heat transfer in covered plant canopies", Journal of Agricultural Meteorology V.15; (May 1975), 97-111
3. Bavel, V., and Damangez "Simulation théorique et expérimentale de chauffage solaire. Bilan énergétique des serres", Colloque CNRS Pirdes, Marseille, (Février 1978).
4. Boulard, B., "Caractérisation et modélisation du climat des serres. Application à la climatisation estival", Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure d'agronomie de Montpellier, (1996)
5. Nisen, A., "l'Eclairage naturel des serres ", Press agronomique. Gembloux. (1969)
6. Nise, A., Dogniaux, R., "Traité de l'éclairage naturel des serres", Institut Royall Hétérologique, Bruxelles, (1975)
7. Sinoquet, H., "Modelling radiative transfer in heterogeneous canopies and intercropping systems, In crop structure and light microclimate, characterisation and applications", INRA Editions, Science Update, (1993), 229 - 252.
8. Stanhill, G., Fuchs, M., Bakker, J. and Moreshet, S., "The radiation balance of glasshouse rose crop", Agricultural Meteorology, vol.11, (1973), 385 - 404.
9. Monteil, C, "Contribution informatique à l'analyse énergétique des serres agricoles", Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Toulouse, (1985)
10. Mesmoudi, K., Soudani, A., Serrir, L., "Modèle de bilan énergétique d'une serre agricole sans couvert végétal ", Revue des Energies Renouvelables vol. 11 n°1, (2008), 51 - 64.
11. Monteil, C., Issanchou, G., Amounroux, M., "Modèle énergétique de la serre agricole", J Physique III, (1991), 429 - 454.
12. Hamid, A., "Contribution à l'étude du bilan thermique de la serre avec stockage en lit de galets", Thèse de magistère; CDER Alger, (1989).
13. Simonson, J.R., "Computing methods in solar heating design", Printed in Hong Kong; (1975).

14. Sacadura J.F., "Initiation aux transferts thermiques ", Edition :Technique et Documentation (Lavoisier); Paris, (1982).
15. Miri, R., "Contribution théorique et expérimentale à l'étude du bilan d'énergie d'une serre solaire ", Thèse de magistère; USTHB Alger; (1983).
16. Marie, P.J., "Possibilités et limites de l'aspersion dans la climatisation des serres agricoles", Thèse docteur-ingénieur; Université de Perpignan; (1983).
17. Arizov, A et Niyazov, S.K., "Rock-bed as a heat storage material for greenhouse applications", Applied Solar Energy, vol.16. (1980), 430 - 437.
18. Bouhdjar, A. Boulbina, A., "Rockbed as a heat storage material for greenhouse heating". Proceedings of Congress Energy and the Environment, UK, London, (1990), 2325 - 2327.
19. Bouhdjar, A. Belhamel, M, Belkhiri, F. Boulbina. A., "Performance of sensible heat storage in a rock bed used in a tunnel greenhouse". Renewable Energy, vol.9 n°(1-4), (1996), 724-728.
20. Kürklü, A. Bilgin, S., "A study on the solar energy storing rock-bed to heat a polyethylene tunnel type greenhouse", Renewable Energy vol.28, (2003), 683 - 697.
21. Huang, B.K., Ozisik, M.N. and Toksoy, M., "Development of greenhouse solar drying for farm crops and processed products", AMA vol.12 ,Japan, (1981), 47 - 52.
22. Jain, D., "Modeling the performance of greenhouse with packed bed thermal storage on crop drying application", Journal of Food Engineering 71 (2), (2005), 170 - 178.
23. Brendenbeck, H., "Greenhouse heating using rockbed heat storage system", Greenhouse Heating with Solar Energy, REU Technical Series 1, FAO, ENEA, Roma, (1987), 89 - 95.
24. Ozturk,H.H. et Bascetincelik, A., "Effect of thermal screens on the microclimate and overall heat loss coefficient in plastic tunnel greenhouse". Turkish Journal of Agriculture and Forestry vol 27 n°3, (2003),123–134
25. Fotiades,I., "Use of solar energy for heating of greenhouses", Energy Conservation and Renewable Energies for Greenhouse Heating, REU Technical Series 3, FAO, ENEA, Roma, (1987), 28 - 35.

26. Jelinkova, H., "Utilization of solar energy in greenhouse", Greenhouse Heating with Solar Energy, REU Technical Series 1, FAO, ENEA, Roma, (1987), 86 - 93.
27. Kavin, J., Kurtan, S., "Utilization of solar energy in greenhouse". Greenhouse Heating with Solar Energy, REU Technical Series 1, FAO, ENEA, Roma, (1987), 178 - 185.
28. Bricault, M., "Use of heat surplus from a greenhouse for soil heating", Proceedings of the International Conference on Energex 82, Regina, (1982), 564 - 568.
29. Santamouris, M., Balaras, C.A., Dascalaki, E. and Vallindras, M., "Passive solar agricultural greenhouses: a worldwide classification and evaluation of technologies and systems used for heating purposes". Solar Energy vol.53 n°5, (1994), 411 - 426.
30. Bibitriki, N., "Caractérisation et analyse du comportement thermo-énergétique de la serre agricole", Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, (2004).
31. Krarti, M., Lopez, C. and Alonzo., "Analytical model to predict annual soil surface temperature variation ", Journal of Solar Energy Engineering vol. 117; (May 1995).
32. Robert, S.B., Marry, C.H., "Transport phenomena. Aunified approach", MC Graw-mill International Editions; (1988).
33. Capderou, M., "Atlas solaire de l'Algérie - Modèles théoriques et expérimentaux ". Office des Publications Universitaires, EPAU, V.1, T1. Alger 1987
34. Eckert, ER., Robert, M. and Drake, J.R., "Analysis of heat and mass transfer", International Student Edition.
35. Adams, H.W. MC., "Heat transmission", Third Edition, Internatoinal student edition
36. Grozdanov, M. and Daguant, M., "Distribution spatiales et temporelles des températures de l'enceinte d'une serre et dans le sous sol", Journée International de thermique; (1987), 391 - 396.
37. Lau, A.K & Staley, L.M., "A design procedure for air type solar heating system for greenhouse ", Energy in Agriculture (1987), 95 -119.
38. Cormary, Y., Nicolas, C., "La thermique des serre", Eddition Eyrolles. Paris; (1985).

39. Torab, H., "Optimization of a packed-bed thermal energy storage unit", *Journal of Solar Energy Engineering*, V.109 n<sup>o</sup>3, (1987), 140 - 145.
40. Bouhdjar, A. Boulbina, A., "Etude expérimentale d'un stockage Thermique dans des galets utilisés dans une serre tunnel", *Journée International de Thermique*, Alger, (1989), 500 - 508.
41. Alanis, E., Saravia, L., "Measurement of rock pile heat transfer coefficients", *Solar Energy*, vol. 19, (1977), 571 - 572
42. Bilal, C., Yusuf, D., "Testing of the condensation characteristics and light transmissions of different plastic film covering materials". *Polymer Testing*, vol. 24, (2005), 284 - 289.
43. Duffie, J., and Beckman, W.A., "Solar engineering of thermal processes ", Wiley Interscience Publication, (second edition), New York; (1991).
44. El Mokretar, S., "Contribution théorique et expérimentale à l'étude du bilan d'énergie et de masse d'un séchoir solaire de type serre. Application à la détermination de la cinétique de séchage des prunes", Thèse de magistère USTHB Alger, (2009).
45. Draoui, B., "Caractérisation et analyse du comportement thermohydrrique d'une serre horticole. Identification in-situ des paramètres d'un modèle dynamique", Thèse de doctorat sciences; Université de Nice; (1994).
46. Din, M., Tiwari, G.N., Ghosal, M.K., "Effect of thermal storage on the performance of greenhouse", *International Journal of Energy Research*, vol 27, (2003), 29 - 92.
47. Frank, I.P, David, D.P., "Fundamental of Heat and Mass Transfer", John Wiley Sons, (1990).