

THE.PH.04/84/1



UNIVERSITE DE OUARGLA

FACULTÉ DES SCIENCES
ET SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE



N° d'ordre :
N° de série :

C'est fait

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Spécialité : Physique

Option : Physique énergétique

Par : DJEGHEL Rachida

Thème

**Modélisation thermique
d'une serre agricole**

Soutenu publiquement le : 28/09/2004

Devant le jury composé de :

Mr. Mouhamed Tayab MEFTAH	Prof.	Université de Ouargla	Président
Mr. Hocine BEN MOUSSA	M.C	Université de Batna	Examinateur
Mr. Mouhamed Hassane SELLAMI	M.A.C.C.	Université de Ouargla	Examinateur
Mr. Omar BOUKRAA	prof	Université de Ouargla	Rapporteur
Mr. Nadir SEKKOUTI	M.A.C.C.	Université de Ouargla	Co-rapporteur

2003-2004

Remerciements

Tout d'abord :

Merci à dieu

Je tiens à remercier vivement mon promoteur Dr. BOUKRAA Omar professeur à l'université de Ouargla, qui a accepté de m'encadrer et de diriger ce travail.

Je tiens à remercier également mon co-promoteur Dr. SEKKOUTI Nadir maître assistant chargé de cours à l'université de Ouargla, qui m'a aidé beaucoup pour me diriger le long de ce travail.

Je voudrais aussi remercier et exprimer mes reconnaissances aux messieurs membres de jury :

- Dr. MEFTAH Mouhamed Tayab professeur à l'université de Ouargla comme président de jury.
- Mr. BEN MOUSSA Hocine maître de conférence à l'université de Batna comme examinateur.
- Mr. SELLAMI Mouhamed Hassane maître assistant chargé de cours à l'université de Ouargla comme examinateur.

Toute ma reconnaissance à M. BEN AMARA. Amara, M. KORICHI Mourad, M. GHERRAF Nourdine, M. ADAMOU Ali, M. BABI, agents de laboratoire chimie analytique, agents de bibliothèque, étudiants de laboratoire de simulation pour leur aides.

Je remercie aussi :

- ❖ Tous mes encourageants surtout S. Mustapha .
- ❖ Tous mes amis surtout B. Karima, B. Samira.
- ❖ Tous mes enseignants.

Dédicace

Je dédie ce travail à :

Mon père pour ses sacrifices, sa patience et son encouragement.

Ma mère en reconnaissance pour sa pitié et sa patience.

Mes frères et sœurs chacun par son nom surtout Tahar.

Toute ma famille.

Tous mes amis.

Rachida



Liste des tableaux

	Page
(I.1) : Caractéristiques optique de transmission solaire de matériaux de couverture en film plastique.	7
(I.2) : Les valeurs de la masse volumique, la capacité thermique ρ massique isobare C_p , et la conductivité λ du sol.	8
(II.1) : Coefficient de transfert pour polypropylène PP25.	15
(II.2) : Les propriétés thermo-physiques diverses composantes de la serre.	16
(IV.1) : Part du rayonnement diffus selon la hauteur du solaire.	42
(VI.1) : Grandeurs électriques analogues aux grandeurs thermiques.	57
(VII.1) : Résultats mesurées du 13.01.2000.	63
(VII.2) : Propriétés physiques de l'air sec à $\overline{T}_{a2} = 293K$.	67
(VII.3) : Le rayonnement solaire global du 13.01.2000.	74
(VIII.1) : L'erreur entre les valeurs de l'air intérieur mesurées et calculées par logiciel.	95

Liste des figures

	Page
(I.1) : Schématisation de l'effet de serre.	5
(II.1) : Les dimensions de la serre.	11
(II.2) : Système en aller/retour.	12
(II.3) : Schématisation de l'objet de chauffage de la serre.	17
(III.1) : Schématisation des différents échanges thermique et de masse au niveau de la serre.	19
(III.2) : Facteur de forme de l'élément ds avec le ciel.	22
(III.3) : Conduction thermique.	30
(III.4) : Echange conductif entre les deux sols.	31
(III.5) : Echange conductif entre l'agrotherm et le sol intérieur.	31
(IV.1) : Mouvement de rotation de la terre.	36
(IV.2) : Spectre visible.	39
(IV.3) : Atténuation du rayonnement solaire.	41
(VI.1) : Conduction thermique.	53
(VI.2) : Rayonnement thermique.	54
(VI.3) : Transfert de chaleur par circulation fluide.	55
(VI.4) : Schéma électrique équivalent de la serre.	58
(VI.5) : Schéma électrique simplifié de la serre.	60
(VII.1) : Humidité de l'air intérieur(chauffée)et l'air extérieur du 13.01.2000	64
(VII.2) : Température de l'air intérieur(chauffée)et l'air extérieur du 13.01.2000	64
(VII.3) : Température du sol intérieur(chauffée)et sol extérieur du 13.01.2000	64
(VII.4) : Rayonnement global du 13.01.2000	75

(VIII.1) : Schematics de logiciel Pspice.	83
(VIII.2) : Schéma électrique équivalent avec ses composants affectés de leurs valeurs numériques respectives.	85
(VIII.3) : Les commandes de logiciel Pspice	86
(VIII.4) : Paramétrage de la simulation.	86
(VIII.5) : Paramétrage de la simulation Transient.	87
(VIII.6) : Simulation de PspiceAD.	87
(VIII.7) : Fenêtre de résultats de la simulation PROBE.	88
(VIII.8) : Analysis/Examine Netlist du circuit électrique équivalent de la serre.	88
(VIII.9) : Température de la paroi plastique.	90
(VIII.10) : Température de l'air extérieur.	90
(VIII.11) : Température de l'air intérieur.	91
(VIII.12) : Température de la végétation.	91
(VIII.13) : Température du sol intérieur.	92
(VIII.14) : Température du sol extérieur.	92
(VIII.15) : Température de l'agrotherm.	93
(VIII.16) : Températures de l'air intérieur mesurées et calculées.	96

Nomenclature

- a_{pl} : Albedo des plantes.
 a_s : Albedo du sol.
 C : Capacité thermique(J/K).
 C_p : Chaleur massique de l'eau(J/kg.K).
 $C_{p_{ai}}$: Chaleur massique de l'air intérieur(J/kg.K).
 $C_{p_{ae}}$: Chaleur massique de l'air extérieur(J/kg.K).
 D_{pl} : Diamètre des plantes(m).
 D_v : Débit volumique l'eau dans la serre(m³/s).
 E.V.A : Ethyl-Venyl-Acétates.
 $F_{p,c}$: Facteur de forme entre la paroi et le ciel.
 $F_{se,p}$: Facteur de forme entre le sol extérieur et la paroi.
 $F_{si,p}$: Facteur de forme entre le sol intérieur et la paroi.
 $F_{v,p}$: Facteur de forme entre la végétation et la paroi.
 $F_{ch,p}$: Facteur de forme entre l'agrotherm et la paroi.
 G : Conductance thermique (W/K).
 G_{cd} : Conductance thermique conductive(W/K).
 G_{cv} : Conductance thermique conductive(W/K).
 G_r : Conductance thermique radiative(W/K).
 G_m : Conductance fluide(W/K).
 H : Hauteur maximal moyenne de la serre (m).
 $h_{p,ai}^c$: Coefficient d'échange par convection entre la paroi et l'air intérieur (W/m²°C).
 $h_{v,ai}^c$: Coefficient d'échange par convection entre la végétation et l'air intérieur (W/m²°C).

- $h_{si,ai}^c$: Coefficient d'échange par convection entre le sol intérieur et l'air intérieur ($W/m^2 \cdot ^\circ C$).
- $h_{ch,ai}^c$: Coefficient d'échange par convection entre l'agrotherm et l'air intérieur ($W/m^2 \cdot ^\circ C$).
- $h_{p,ai}^1$: Coefficient de transfert de masse paroi-air intérieur (W/m^2).
- $h_{si,ai}^1$: Coefficient de transfert de masse sol intérieur-air intérieur (W/m^2).
- $h_{ch,p}^r$: Coefficient de rayonnement de grande longueur d'onde entre l'agrotherm et la paroi ($W/m^2 K$).
- $h_{si,p}^r$: Coefficient de rayonnement de grande longueur d'onde entre le sol intérieur et la paroi ($W/m^2 K$).
- $h_{ch,v}^r$: Coefficient de rayonnement de grande longueur d'onde entre l'agrotherm et la végétation ($W/m^2 K$).
- $h_{ch,si}^r$: Coefficient de rayonnement de grande longueur d'onde entre l'agrotherm et le sol intérieur ($W/m^2 K$).
- i_0 : Indice de position des ouvrants.
- i_b : Indice de brassage (fonctionnement de ventilateurs).
- I_p : Puissance absorbée par la paroi (W).
- I_{p1} : Puissance absorbée par les plantes (W).
- I_s : Puissance absorbée par le sol (W).
- k_{ch} : Coefficient de transfert à travers le tuyaux de chauffant ($Kcal/hm^2 \cdot ^\circ C$).
- K : Coefficient global de déperdition thermique (conduction-convection) ($W/m^2 \cdot ^\circ C$).
- K' : Coefficient global de déperdition de chaleur ($Kcal/hm^2 \cdot ^\circ C$).
- L : Chaleur latente (J/K).
- L_{ch} : Longueur de l'agrotherm (m).
- $\dot{m}$: Débit massique de l'eau de chauffant (kg/s).
- n_{rang} : Nombre de rang des plantes.
- Nu : Nombre de Nusselt (hL/λ).
- Pr : Nombre de Prandtl ($\mu C_p/\lambda$).
- P_v : Pression de vapeur d'eau (Pa).

- P : Pression atmosphérique(Pa).
- P_S : Pression de vapeur saturante(Pa).
- $P_S(T)$: Pression de vapeur saturante à la température T(Pa).
- P.E : Polyéthylène.
- P.C.V : Poly-Chlorures de Venyl.
- $Q_{ch,p}^r$: Puissance radiative entre l'agrotherm et la paroi(W).
- $Q_{si,p}^r$: Puissance radiative entre le sol intérieur et la paroi(W).
- $Q_{ai,p}^c$: Puissance convective entre l'air intérieur et la paroi(W).
- $Q_{ch,ai}^c$: Puissance convective entre l'agrotherm et l'air intérieur(W).
- Q_{Ren} : Puissance de renouvellement de l'air sec (W).
- Q_{Ren}^l : Puissance de renouvellement de l'air humide (W).
- $Q_{si,se}^{Cond}$: Puissance conductive entre le sol intérieur le sol extérieur (W).
- $Q_{ch,si}^{Cond}$: Puissance conductive entre l'agrotherm et le sol intérieur (W).
- $Q_{ai,p}^l$: Puissance de l'évaporation/ condensation au niveau la paroi(W).
- Q_{STP} : Puissance de l'évapotranspiration des plantes (W).
- Q_{SF} : Puissance de rayonnement solaire absorbée par la paroi(W).
- Q_{SV} : Puissance de rayonnement solaire absorbée par la végétation(W).
- R_{cd} : Résistance thermique conductive(K/W).
- R_{cv} : Résistance thermique convective(K/W).
- R_d : Rayonnement solaire diffus(W/m²).
- Re : Nombre de Reynolds(VL/ν).
- R_{sg} : Rayonnement solaire globale (W/m²).
- S_p : Surface de couverture(m²).
- S_v : Surface de végétation(m²).

- T_{ee} : Température d'entrée de l'eau chaude dans la serre(°C).
 T_{es} : Température de sortie de l'eau chaude dans la serre(°C).
 T_{ML} : Moyenne logarithmique de la température(°C).
 T_{ai} : Température de l'air intérieur (K).
 T_{ae} : Température de l'air extérieur (K).
 T_{si} : Température du sol extérieur(K).
 T_v : Température de la végétation(K).
 T_{ch} : Température de corps chauffant(K).
 T_{se} : Température du sol extérieur(K).
 t : Temps(s).
 U : Vitesse de ventilation(m/s).
 V : Vitesse du vent(m/s).
 V_s : Volume de la serre(m³).
 V_p : Volume de la paroi(m³).
 V_{ai} : Volume de l'air intérieur(m³).
 V_{si} : Volume de sol intérieur(m³).
 W_{ai} : Humidité absolue de l'air intérieur(kg/kg).
 W_{ae} : Humidité absolue de l'air extérieur(kg/kg).
 $W_{ai}(T)$: Humidité absolue de l'air intérieur à la température T(kg/kg).
 ρ_{ai} : Masse volumique de l'air intérieur(kg/m³).
 ϵ_p : Émissivité de la paroi.
 ϵ_{si} : Émissivité de sol intérieur.
 δ : Déclinaison(°).
 χ_{ai} : Humidité relative de l'air intérieur(%).
 χ_{ae} : Humidité relative de l'air extérieur(%).

χ : Humidité relative(%).

ψ : Azimut($^{\circ}$).

λ : Longitude($^{\circ}$).

λ_{ai} : Conductivité thermique de l'air intérieur(W/m.K).

ν_{ai} : Viscosité cinématique de l'air intérieur(m^2/s).

μ_{ai} : Viscosité dynamique de l'air intérieur(Pa.s).

σ : Constante de Stéfan-boltzman($\sigma = 5,67.10^{-8} W/m^2K^4$).

Sommaire

	Page
Remerciements	I
Dédicace	II
Liste des tableaux	III
Liste des figures	IV
Nomenclature	VI
Sommaire	XI
Introduction générale	1
<u>Chapitre I : Généralités</u>	3
I.1/ La serre, agent de modification du climat	3
I.1.1/ Le climat sous la serre	3
I.2/ Les aspects spécifiques à la serre	5
I.2.1/ La photosynthèse	5
I.2.2/ La respiration	6
I.2.3/L'évapotranspiration	6
I.3/ Les matériaux de couverture en film plastique	6
I.3.1/ Les polyéthylènes (P.E)	7
I.3.2/ Ethyl-Vinyl-Acétates (E.V.A)	7
I.3.3/ Poly- Vinyl-Chlorures (P.V.C)	7
I.4/ Le sol	7
I.5/ Source d'énergie utilisées dans le chauffage des serres	8
I.5.1/ La géothermie	8
I.5.2/ L'énergie solaire	8

I.6/ Les différent système de chauffage	9
I.6.1/ Chauffage de la partie aérienne de la plante	9
I.6.2/ Le chauffage du sol	10
<u>Chapitre II : Présentation de la serre</u>	11
II.1/ Description la serre	11
II.1.1/ Les dimensions de la serre	11
II.1.2/ Le système de chauffage	12
II.1.3/ Caractéristique de l'agrotherm	12
II.1.4/ Dimensionnement de l'échangeur	12
II.2/ Propriétés thermo-physiques des diverses composantes de la serre	16
II.3/ Projet de chauffage de la serre	17
<u>Chapitre III : Natures des échanges de chaleur et de masse dans la serre</u>	18
III.1/ Introduction	18
III.2/ Hypothèses de la modélisation	18
III.3/ Mise en équations	20
III.3.1/ Echanges thermiques	20
III.3.1.1/ Echanges radiatifs	20
III.3.1.1.1/ Emission d'un corps	20
III.3.1.1.2/ Echange par rayonnement entre deux corps gris	20
III.3.1.1.3/ Echange radiatif entre la paroi plastique et la voûte céleste	21
III.3.1.1.4/ Echange radiatif entre le sol extérieur et la paroi	23
III.3.1.1.5/ Echange radiatif entre le sol intérieur et la paroi	24
III.3.1.1.6/ Echange radiatif entre le sol et la végétation	24
III.3.1.1.7/ Echange radiatif entre la végétation et la paroi	24
III.3.1.1.8/ Echange radiatif entre le corps chauffant et la paroi	24
III.3.1.1.9/ Echange radiatif entre le corps chauffant et la végétation	24

III.3.1.1.10/ Echange radiatif entre le corps chauffant et le sol intérieur	25
III.3.1.2/ Echanges convectifs	25
III.3.1.2.1/ Convection forcée	25
III.3.1.2.2/ Echange convectif entre la paroi et l'air extérieur	26
III.3.1.2.3/ Echange convectif entre sol extérieur et l'air extérieur	27
III.3.1.2.4/ Echange convectif entre la paroi et l'air intérieur	27
III.3.1.2.5/ Echange convectif entre la végétation et l'air intérieur	28
III.3.1.2.6/ Echange convectif entre le sol intérieur et l'air intérieur	28
III.3.1.2.7/ Echange convectif entre l'agrotherm et l'air intérieur	28
III.3.1.3/ Echange de le renouvellement de l'air	29
III.3.1.3.1/ Le taux de renouvellement d'air	29
III.3.1.3.2/ Echange de l'air sec	29
III.3.1.3.3/ Echange l'air humide	30
III.3.1.4/ Les échanges conductifs	30
III.3.1.4.1/ Echange conductif entre le sol intérieur et le sol extérieur	30
III.3.1.4.2/ Echange conductif entre l'agrotherm et le sol intérieur	31
III.3.2/ Echanges massiques	31
III.3.2.1/ Evaporation/ condensation au niveau la paroi plastique	32
III.3.2.2/ Evaporation au niveau du sol	32
III.3.2.3/ Evapotranspiration	33
Chapitre IV : Gisement solaire	35
IV.1/ Définitions	35
IV.1.1/ Le soleil	35
IV.1.2/ La terre	35
IV.1.3/ Mouvement de la terre	35
IV.2/ Le rayonnement solaire	38
IV.3/ Les formules de puissance du rayonnement solaire	39

IV.3.1/ Formules de Hottel et Liu& Jordan	39
IV.3.2/ Formule de Perrin de Brichambaut	40
IV.3.3/ Formule global de Perrin de Brichambaut	40
IV.4/ Le rayonnement solaire au niveau la serre	40
IV.4.1/ Les flux solaire reçu	41
Chapitre V : Les équations de bilan d'énergie dans la serre	45
V.1/ Bilan d'énergie de la paroi plastique	45
V.2/ Bilan thermique de l'air extérieur	47
V.3/ Bilan thermohydrique de l'air intérieur	47
V.3.1 /Bilan de chaleur sensible	47
V.3.2/ Bilan de chaleur latente	48
V.4/ Bilan d'énergie de la végétation	48
V.5/ Bilan d'énergie du sol intérieur	49
V.6/ Bilan d'énergie du sol extérieur	50
V.7/ Bilan d'énergie de l'agrotherm	50
Chapitre VI : La modélisation thermique	51
VI.1/ Définition de la modélisation	51
VI.1.1/ Les étapes de la modélisation	51
IV.2/ La modélisation thermique	52
IV.3/ Les expressions des conductances	53
VI.3.1/ Conductance conductive	53
VI.3.2/ Conductance convective	54
VI.3.3/ Conductance radiative	54
VI.3.4/Conductance fluide	55
IV.4/ L'analyse nodale	55
VI.5/ Les bases de l'analogie thermique/électrique	55

VI.5.1/ Loi d'Ohm	55
VI.5.2/ Loi de Kirchhoff	56
VI.5.3/ Les équations des bilans	56
VI.6/ Dessin du schéma électrique équivalent de la serre chauffée à l'eau géothermale	58
VI.7/ Simplification du schéma électrique	59
VI.8/ Les équations de bilan du système	61
Chapitre VII : Calcul des différents composants du circuit électrique	63
VII.1/ Calcul des résistances	63
VII.2/ Calcul des capacités	77
VII.3/ Calcul de sources des courants	79
Chapitre VIII : La simulation	82
VIII.1/ Définition de la simulation	82
VIII.2/ Le logiciel de simulation Pspice et ses périphériques	82
VIII.3/ Description du réseau électrique équivalent à la serre	83
VIII.3.1/ Mise en place des composants	84
VIII.3.2/ Interconnexion des composants	84
VIII.3.3/ Attribution des valeurs aux composants	84
VIII.3.4/ Mise en place la masse analogique	85
VIII.3.5/ Edition des commandes	86
VIII.3.6/ Mise en route de la simulation	87
VIII.3.7/ Examen de la liste des nœuds du circuit	88
VIII.3.8/ Résultats de la simulation PROBE	89
VIII.4/ Interprétation des résultats	93
VIII.4.1/ Température de la paroi plastique	93
VIII.4.2/ Température de l'air extérieur	93
VIII.4.3/ Température de l'air intérieur	94

VIII.4.4/ Température de la végétation	94
VIII.4.5/ Température du sol	94
VIII.4.6/ Température de l'agrotherm	95
VIII.5/ Validation du modèle	95
Conclusion générale	97
<u>Bibliographies</u>	98
<u>Annexe A: LES INTERPOLATIONS POLYNOMIALES</u>	100
<u>Annexe B : PROGRAMME VISUAL FORTRON</u>	103

Introduction

Introduction générale

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

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

Le principe de la serre est de protéger les plantes contre les intempéries, et de créer un microclimat favorable à leur épanouissement. Dans les limites permises par le code génétique de la plante, la croissance de celle-ci dépend de nombreux facteurs : la température, la lumière, l'humidité en tournant la plante, et le taux de gaz carbonique. Ces facteurs agissent simultanément et, de façon dépendante sur la plante. En outre la création de ce microclimat artificiel dépend essentiellement du rayonnement solaire local.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier le comportement d'une serre agricole chauffée par l'énergie géothermale, la modélisation de son climat intérieur, ainsi que la simulation électrique du comportement thermique à l'aide du logiciel Pspice et finalement la validation des résultats de la modélisation à l'aide des mesures de températures de l'air de la serre existantes sous forme de graphe figurant dans le mémoire de Babi [1] (Exploitation l'énergie géothermale pour chauffage des serres agricoles).

La présentation de mémoire prend en charge la modélisation thermique d'une serre agricole chauffée à l'eau géothermale. A cet effet, nous avons adopté le plan de travail suivant :

- » La description des différents modes de chauffage des serres agricoles, ainsi que leurs différents systèmes transmetteurs d'énergie fait l'objet du chapitre I.
- » Dans le chapitre II, nous présentons les dimensions de la serre, le système de chauffage mis en place, les besoins en énergie de la serre, ainsi que le

dimensionnement de l'agrotherm et propriétés thermo-physiques de l'ensemble des composantes de la serre.

- » Dans le chapitre III, les différents modes de transfert de chaleur et de masse intervenant dans la modification du climat intérieur sont décrits.
- » Le chapitre IV est quant à lui, un rappel des différentes définitions relatives au gisement solaire.
- » Les bilans thermiques et massiques au niveau de chaque composant de la serre (paroi, air extérieur, air intérieur, végétation, sol intérieur, sol extérieur, agrotherm) sont détaillés dans le chapitre V.
- » Dans le chapitre VI, nous décrivons : la méthode nodale et son application en thermique, et nous établissons les équations aux nœuds écrites en termes électriques, ainsi que le schéma électrique équivalent de la serre.
- » Le calcul des résistances, des capacités et des sources de courant intervenant dans le circuit électrique fait l'objet du chapitre VII.
- » Vient ensuite dans le chapitre VIII, le calcul des températures en fonction du temps aux différents nœuds, grâce au logiciel de simulation Pspice . La courbe d'évolution journalière de la température de l'air intérieur dans la serre, $T_{ai}(t)$, est ensuite validée grâce aux données disponibles[1].
- » Enfin une conclusion générale ainsi qu'un certain nombre de recommandations futures viennent achever ce mémoire.

Chapitre I

Chapitre I

Généralités

I.1/ La serre, agent de modification du climat :

La serre, conçue à l'origine comme une simple enceinte limitée par une paroi transparente, est en-elle-même un agent de modification du climat. Le climat spontané qui s'établit « sous abri » ne répond qu'exceptionnellement à la totalité des exigences des cultures. Il permet, certes, de se soustraire partiellement aux interdictions culturelles du climat extérieur, en particulier à celles liées aux basses températures, et d'éliminer les contraintes imposées par les épisodes pluvieux ou la violence de vent[3].

I.1.1/ Le climat sous la serre :

I.1.1.1/ La lumière :

Les conditions d'éclairement à l'intérieur de la serre sont sous l'étroite dépendance du climat lumineux naturel, donc le choix des matériaux de couverture ainsi que les conditions de leur mise en œuvre (structure, forme et orientation des serres) ont une grande influence sur l'utilisation raisonnable de ce climat naturel [3].

I.1.1.2/ La température :

La température de l'air , prise comme caractéristique du climat de la serre, est la résultante du bilan d'énergie établi sous la serre. L'effet de serre se présente généralement de la façon suivante [3]:

- L'abaissement de la température pendant la nuit est dû à l'atténuation des déperditions d'énergie par rayonnement infra-rouge à travers la paroi limite le refroidissement nocturne; on parle alors d'inversement de température .

- D'autre côté, l'élévation de température de l'air pendant le jour qui devient rapidement excessive lorsque le rayonnement solaire est intense est dû aux effets conjugués des piégeages des apports radiatifs solaires et de la réduction d'échanges convectifs. Il est alors nécessaire d'intervenir en augmentant la vitesse de

renouvellement de l'air par aération statique ou par ventilation dynamique .

I.1.1.3/ L'humidité :

L'intensité du phénomène évaporatoire sous serre est dû essentiellement au rayonnement solaire. L'atténuation de ces rayonnements va conduire à une réduction évapotranspirative.

La vapeur d'eau résulte peut donc, soit être évacuée lorsque l'air de la serre se renouvelle, soit se condense au niveau des parois ou de la végétation, lorsque la température de ces surfaces est inférieure à la température du point de rosée de l'air dans la serre. Par conséquent :

-De nuit, l'humidité relative de l'air y est élevée généralement fermées, donc les condensations se produisent fréquemment au niveau des parois et les gouttes condensées peuvent tomber sur la végétation.

-De jour, l'abaissement de l'humidité relative est dû à l'élévation de la température de l'air ce qui provoque un véritable stress hydrique au niveau de la végétation. D'où la nécessité de prévoir un système de ventilation de la serre[3].

I.1.1.4/ L'orientation de la serre :

Le réglage de l'orientation de la serre selon la course du soleil ainsi que selon la direction des vents a causé des difficultés pour éviter l'hétérogénéité de certaines conditions climatiques à l'intérieur de la serre.

Dans les régions méditerranéennes, où le soleil s'élève sur l'horizon, les vérifications[3] ont montré que l'éclairement solaire satisfaisant pouvait s'obtenir par l'adaptation d'une orientation Nord-sud. La comparaison entre le matin et le soir a montré que cette orientation permet d'avoir une meilleure homogénéité du flux lumineux . Compte tenu la direction générale Nord-sud de vents dominant, cette orientation a l'avantage de réduire les effets néfastes des vents tant sur la structure que sur les déperditions énergétiques de la serre .

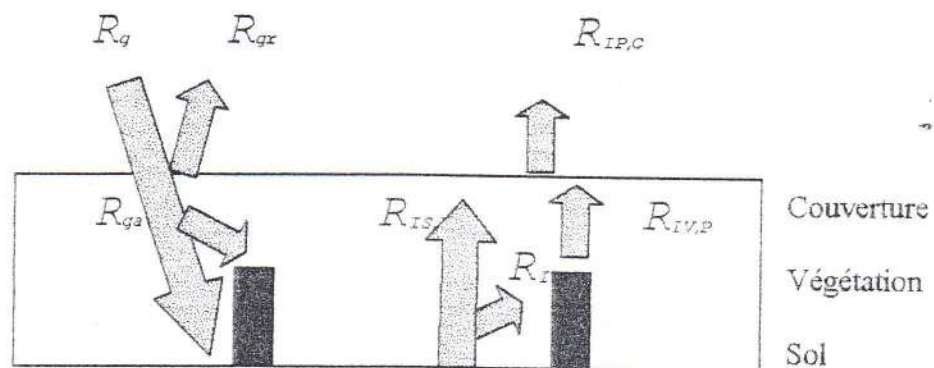
I.1.1.5/ L'effet de serre :

Dans la serre on peut distinguer deux effets principaux : Le premier permet la réduction d'échange d'air entre l'intérieur et l'extérieur de la serre.

Le deuxième organise le passage du rayonnement solaire, c'est à dire, joue le rôle d'un écran peu transparent au rayonnement infra-rouge lointain (10 à 15 μm), émis par

le sol. La végétation à l'intérieur de la serre est ainsi exposée au rayonnement solaire visible et infra-rouge proche (0,6 à 4 μ m).

Les deux effets précédents entraînent une élévation très nette de la température pendant la journée. La variation de ces effets s'effectue suivant le taux d'aération appliqué et aussi selon les propriétés de transmission et d'absorption par le matériau de couverture, des rayonnements solaire et terrestre (figure I.1)[1].



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

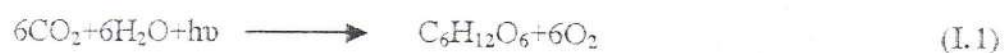
I.1.1.6/ CO₂ :

Dans le cas des serres très étanches peu aérées, il est souhaitable de pouvoir réaliser un enrichissement en CO₂ qui peut être très bénéfique, aussi bien pour le rendement que pour la précocité s'il est judicieusement utilisé. Dans les régions méridionales, où les besoins de la ventilation sont importants dès le début de la saison de culture et où les serres sont donc ouvertes pendant la majeure partie de la journée, l'enrichissement en CO₂ est plus difficilement applicable [3].

I.2/ Les aspects spécifiques à la serre :

I.2.1/ La photosynthèse :

La photosynthèse est un processus de conversion d'énergie radiative en énergie chimique, transportable et réutilisable. Elle repose sur la transformation de l'oxyde de carbone et d'hydrogène à faible énergie potentielle chimique, en hydrates de carbone, à énergie potentielle chimique élevée selon la formulation suivante[5] :



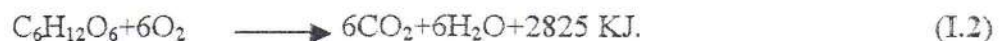
h : constante de Planck ($h=6,62.10^{-34}$ J.s).

ν : fréquence du rayonnement (s^{-1}).

I.2.2/ La respiration :

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

La récupération de l'énergie chimique emmagasinée dans les hydrates de carbone s'effectue par un processus de dégradation oxydative, dénommé respiration, qui peut être considéré dans une certaine mesure comme la réaction inverse de la photosynthèse. L'énergie libérée étant sous la forme chimique et non radiative [5] :



I.2.3/L'évapotranspiration :

Les transferts d'eau du système sol-végétation dans la serre peuvent s'effectuer selon deux canaux, soit par évaporation directe de l'eau du sol, soit par transpiration des végétaux, préalablement prélevée dans le sol par leur système racinaire. L'évaporation directe se produit essentiellement dans une zone de faible épaisseur située immédiatement sous la surface du sol.

Les deux processus se produisent simultanément et de manière telle qu'il est difficile de les distinguer, si bien qu'ils sont englobés sous le terme général d'évapotranspiration[5].

I.3/ Les matériaux de couverture en film plastique :

Les différents matériaux de couverture en film plastique, utilisés essentiellement en tant que couvertures d'abri frais ou chauffé sont :

I.3.1/ Les polyéthylènes (P.E) :

Caractérisés par :

-Une durée de vie relativement longue(2 ans).

- Une bonne transmission infrarouge .
- Une bonne résistance aux efforts mécaniques.

I.3.2/ Ethyl-Vinyl-Acétates (E.V.A) :

Caractérisés par :

- Différentes origines.
- Durée de vie (18 mois).
- Moyenne transmission infra-rouge .

I.3.3/ Poly- Vinyl -Chlorures (P.V.C) :

Caractérisés par :

- Deux types : armé et non armé.
- Durée de vie (de 8 à 15 mois).
- Antibuée.
- Moins résistant .
- Faible transmission infra-rouge.

En résumée les caractéristiques optique de transmission solaire des matériaux de couverture en film plastique dans le tableau suivant :

	P.V.C	E.V.A	P.E
Rayonnement solaire	0,80	0,80	0,80
Infrarouge thermique	0,30	0,60	0,80

Tableau (I.1) :Caractéristiques optique de transmission solaire des matériaux de couverture en film plastique[3].

I.4/ Le sol :

En première analyse, le sol apparaît comme un complexe dynamique à trois phases : liquide ,gaz et solide. Dans cette étude l'intéressant est la phase solide, constitue [5] :

- d'éléments minéraux :particules de taille et de forme diverses (éléments grossiers ($>2\text{mm}$), Terre fine($<2\text{mm}$); argiles($<2\mu\text{m}$)).
- d'éléments organiques :débris végétaux ou animaux en état de décomposition plus ou moins avancée.

Les valeur moyennes de la masse volumique réelle des sol sont ainsi généralement

comprises entre les valeurs suivant[5]:

-sols minéraux : $2600 \leq \rho_s \leq 2700$ [kg/m³].

-sols organiques: $1400 \leq \rho_s \leq 2000$ [kg/m³].

Le tableau (I.2) présente les valeurs moyenne de la masse volumique ρ , la chaleur massique isobare C_p , et la conductivité λ du sol.

	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg.K)	λ (W/m.K)
Minéraux	$2,65.10^3$	$0,80.10^3$	2,90
Matière organique	$1,30.10^3$	$1,90.10^3$	0,25

Tableau(I.2) : Les valeurs moyenne de la masse volumique ρ , la chaleur massique isobare C_p et la conductivité λ du sol [5].

I.5/ Source d' énergie utilisées dans le chauffage des serres :

Ces sources d'énergie sont qualifiés de « nouvelles », « douces » ou « renouvelables ». Elles comprennent essentiellement la géothermie, l'énergie solaire.

I.5.1/ La géothermie :

Il s'agit d'exploiter des poches d'eau situées dans les couches profondes du sous-sol, vers 1000 à 2000m de profondeur .L'eau contenue dans ces poches se distingue par de températures de l'ordre de 50 à 70 °C .

Cette l'énergie géothermique est utilisée dans plusieurs pays dans le domaine de l'agriculture pour chauffage des serres agricoles, en vue d'amélioration des cultures sous serre; en Algérie, les puits d'eau chaude qui étaient destinés depuis plusieurs décennies pour la consommation humaine et pour l'irrigation, ne furent exploités pour le chauffage des serres qu'à partir de l'année 1974 [14].

I.5.2/ L'énergie solaire :

La serre elle-même est un capteur solaire à la fois biologique (photosynthèse) et thermique(effet de serre) .Le capteur thermique est même souvent trop efficace puisqu'il faut fréquemment aérer la serre et donc rejeter la chaleur à l'extérieur par ventilation. Un système de stockage de cette chaleur doit être prévu au vu non seulement des rapports d'ensoleillement jour/nuit, mais aussi des rapports hiver/été, ce qui représente un obstacle majeur[14].

I.6/ Les différents systèmes de chauffage :

I.6.1/ Chauffage de la partie aérienne de la plante :

Les systèmes utilisés diffèrent selon les apports par rayonnement et par convection; on peut donc les classer en deux groupes [3] :

- les systèmes de chauffage de type radiatif.
- les systèmes de chauffage de type convectif.

I.6.1.1/ Les systèmes de chauffage de type radiatif :

On peut distinguer :

- Les panneaux radiants, à température très élevée ,mais encore d'un usage très limité en serre.
- Le thermosiphon constitué des tuyauteries dans lesquelles, on fait circuler un fluide à température élevée, généralement de l'eau (90°C à 100°C), de la vapeur d'eau, des gaz provenant de la récupération, des produits de combustion, des huiles à très haute température.
- Les paillage radiant; (qui est en fait un chauffage à la fois de l'air et du sol), constitué par des gaines plastique posés au sol où circule de l'eau à faible température (20°C à 30°C), et plus de son rôle radiatif, transmet au sol une partie importante de la chaleur par conduction .

Les avantages de chauffage de type radiatif :

- ❖ L'obtention de champs de température d'air et de surface homogènes dans toute la serre.
- ❖ La possibilité d'obtenir des températures de surface égale ou supérieur à celle de l'air, ce qui permet de fixer des températures de consigne d'air plus faibles que dans les système convectif.
- ❖ La possibilité de localiser le chauffage et d'apporter des calories à l'endroit voulu.

Les inconvénients :

- Une inertie relativement grande
- Une certaine réduction de la luminosité de la serre.
- Un coût d'investissement assez élevée, surtout pour le thermosiphon et le paillage radiant.

I.6.1.2/ Les systèmes de chauffage de type convectif :

On peut distinguer :

- Les aérothermes, constitue par des échangeurs eau-air ,où un courant d'air grande vitesse extrait les calories de canalisation d'eau chaude .Il existe également des aérothermes électrique, où les canalisations sont remplacées par des résistances chauffantes .
- Les générateurs d'air chaud, où la combustion est réalisée directement sur place en faisant éliminer de la serre les gaz de combustion.

Au niveau des avantages :

On peut donc citer :

- ❖ Une mise en oeuvre facile et une grande souplesse d'utilisation.
- ❖ Un coût d'investissement modéré .

Au niveau des inconvénients :

- Une grande hétérogénéité des champs de température dans la serre .
- Les températures de végétal plus faible que températures de consigne.

I.6.2/ Le chauffage du sol :

Le chauffage du sol peu utilisé en serre :on peut signaler quelques installations où le chauffage est assuré soit par des tuyaux(généralement en matière plastique) parcourus par de l'eau entre 30°Cet 60°C, soit par des câbles électriques.

Ces système se caractérisent par une grande inertie thermique du fait du stockage de la chaleur par le sol.

D'autre part, les températures d'air sont en général faibles par rapport aux températures de sol, ce qui peut entraîner un déséquilibre du régime thermique préjudiciables à la culture. Le chauffage associant tuyaux dans le sol et aérothermes et très intéressent ,puisqu'il permet d'obtenir des régimes thermiques air-sol équilibrés et d'ajuster les apports thermiques dans l'air et dans le solde manière favorisée[3].

Chapitre II

Chapitre II

Présentation de la serre

II.1/ Description de la serre :

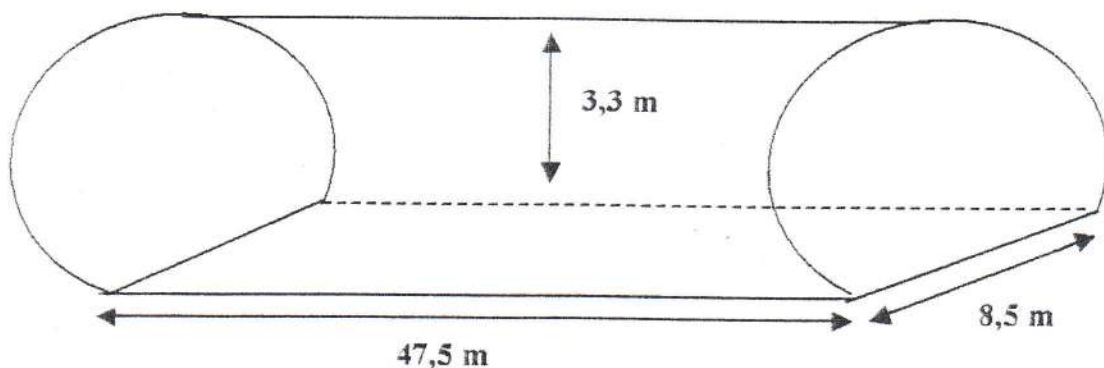
La serre expérimentale se trouve à la station expérimentale ITDAS de Hassi Ben Abedallah située 22Km de ville de Ouargla[1].

C'est une serre tunnel recouverte en polyéthylène et qui couvre une surface de 404m^2 . Elle utilise de l'eau géothermale à 65°C pour le chauffage et l'eau d'irrigation provient d'un puits albien se trouvant à une distance, de 1,5 Km de la serre expérimentale. La température et le débit en tête de puits sont respectivement environ de 67°C et 200l/s.

II.1.1/ Les dimensions de la serre :

La forme et les dimensions de la serre, représentée ci-dessous, sont les suivantes: Il s'agit d'une serre mono tunnel qui occupe une surface couverte de $(47,5.8,5)\text{m}^2$ orientée vers le Sud- Est.

- La hauteur moyenne est de 3,3m.
- La surface des portes est $2. (2,5.3)\text{m}^2 = 15\text{m}^2$.
- La surface latérale de paroi : $(47,5.10)\text{m}^2 = 475\text{m}^2$.
- La surface totale de la couverture est de 490m^2 .
- La surface de sol couvert est $47,5.8,5 = 404\text{m}^2$.
- Le rapport de la surface du sol sur la couverture est $S_{Si}/S_p = 0,82$.



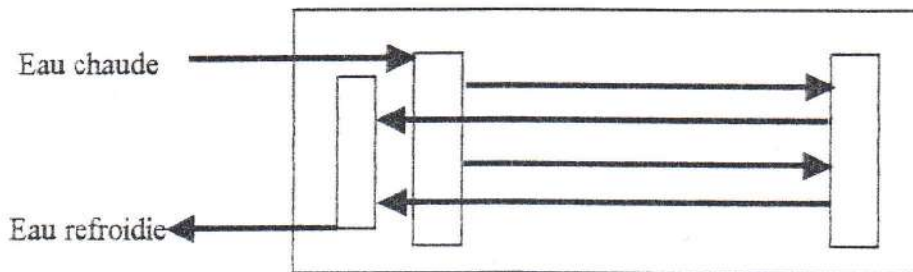
Figure(II.1) : Les dimensions de la serre.

➤ Le volume de la serre est de 1093 m^3 [1].

II.1.2/ Le système de chauffage :

Le système de chauffage est constitué par une vanne thermostatée et un tube très long en plastique façonné en anneaux de type agrotherm et qui permet de maintenir la température du sol à environ 18°C .

L'agrotherm est placé en boucle simple (aller/retour)[1].



Figure(II.2) : système en aller/retour.

II.1.3/ Caractéristiques de l'agrotherm :

L'agrotherm utilisé présente les caractéristiques suivantes[1] :

- ❖ PP25 : polypropylène de diamètre 25mm.
- ❖ Coefficient de déperdition de chaleur $K_{ch} = 13,5 \text{ Kcal/h/m}^2\text{C}$ posé sur le sol.
- ❖ Pression normale d'utilisation $P_{Util} = 0,5$ à $1,5$ bars.
- ❖ Pression d'éclatement $P_e = 6$ à 7 bars.
- ❖ Surface externe d'un mètre linéaire du tube $S_e = 0,0785 \text{ m}^2/\text{m linéaire}$.

II.1.4/ Dimensionnement de l'échangeur :

Le dimensionnement de l'échangeur se résume au calcul de la surface d'échange, ce qui revient au calcul de la longueur de l'agrotherm nécessaire pour la serre. Ceci dépend essentiellement du besoin en énergie de la température d'entrée et de sortie de l'eau dans les tuyaux de chauffage.

II.1.4.1/ Besoin en énergie de la serre :

La quantité globale d'énergie nécessaire à la serre est donnée par l'équation :

$$Q = Q_r + Q_{cc} + Q_{t.e} + Q_{ren} \quad (W) \quad (II.1)$$

Q_r : gain spécifique radiatif(W).

Q_{cc} :représente les échanges de chaleur sensibles par conduction et convection (W).

$Q_{L.E}$:représente les échanges par évapotranspiration ,l'étant la chaleur latente de vaporisation ou de condensation(W).

Q_{ren} :perte due à l'infiltration d'air frais (W).

Pour calculer les besoins en chauffage, on introduit un coefficient global de déperdition thermique K . Les apports de chauffage Q_{ch} sont alors calculés au moyen de la relation :

$$Q=Q_{ch}=K S_p(T_{ai}-T_{ae})[3] \quad (II.2)$$

S_p :surface de couverture(m^2).

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

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

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

-On trouve dans la référence [3] la formule empirique donnant K en fonction de la vitesse du vent :

$$K = \frac{5V+7,9}{V+3,2} \quad (Kcal/h m^2^{\circ}C) \quad (II.3)$$

V :Vitesse du vent (m/s).

-Le besoin en chaleur peut aussi être exprimé, en se rapportant à la surface du sol couvert [1].

$$Q=K' S_{si}(T_{ai}-T_{ae}) \quad (II.4)$$

K' :coefficient de déperdition de chaleur calculé expérimentalement (d'après Verlodt [1]) ($Kcal/hm^2^{\circ}C$).

S_{si} :surface du sol couvert (m^2).

$K' = 10,5 Kcal/hm^2^{\circ}C$ pour une couverture de polyéthylène dans une serre étanche [1]. Dans le cas présent, $T_{ai} = 20^{\circ}C$, $T_{ae} = 7,3^{\circ}C$, la surface de la serre couverte par polyéthylène $S_{si} = 404m^2$.

Nous pouvons calculer le besoin énergétique comme suit :

$$Q = 10,5.404(20-7,3)=53873,4Kcal/h=62553W. \quad (II.5)$$

II.1.4.2/ Calcul de la longueur de l'agrotherm:

Comme la quantité de chaleur perdue à travers la surface de l'agrotherm vers l'air intérieur de la serre, due aux différents modes de transfert, doit être égale à la chaleur apportée par le débit d'eau géothermale entre son entrée et sa sortie, alors on écrit l'équation suivante[1] :

$$Q_a = Q_g \quad (II.6)$$

Q_a :puissance amenée par l'eau chaude(W).

Q_g :puissance dissipée à travers le tuyau chauffant(W).

$$Q_g = k_{ch} S_{ch} \Delta T_{ML} \quad (II.7)$$

$$Q_a = \dot{m} C_p (T_{ee} - T_{es}) \quad (II.8)$$

k_{ch} :coefficient de transfert à travers l'échangeur(tuyaux de chauffant)
(Kcal/hm²°C)

ΔT_{ML} :moyenne logarithmique de la température(°C).

S_{ch} :surface de tuyaux chauffant(m²).

T_{ee} et T_{es} :sont respectivement la température d'entrée et de sortie de l'eau chaude dans serre (°C).

$\dot{m}$:débit massique de l'eau de chauffant (kg/s).

C_p :capacité thermique massique de l'eau (J/kg°C).

$$\Delta T_{ML} = \frac{T_{ee} - T_{es}}{\ln \frac{T_{ee} - T_{ai}}{T_{es} - T_{ai}}} \quad (II.9)$$

$$S_{ch} = 0,0785 \cdot L_{ch} \quad (II.10)$$

L_{ch} :longueur de l'agrotherm(m).

On peut aussi remplacer ΔT_{ML} par ΔT Où :

$$\Delta T = T_m - T_{ai} \quad (II.11)$$

$$\text{Avec : } T_m = \frac{T_{ee} + T_{es}}{2} \quad (II.12)$$

Alors l'équation(II.7) devient :

$$Q_g = k_{ch} S_{ch} \Delta T \quad (\text{II.13})$$

Le coefficient k_{ch} dépend de la nature de l'échangeur ainsi que de la température de l'eau qui y circule; Verlodt1991[1](voir le tableau(II.1)).

$$Q = k_{ch}^{0,0785} L_{ch} (T_m - T_{ai}) \quad (\text{II.14})$$

$$\text{donc : } L_{ch} = \frac{D_v \rho C_p (T_{ee} - T_{es})}{0,0785 K_{ch} (T_m - T_{ai})} \quad (\text{II.15})$$

Dans le cas de notre serre : $T_m = \frac{65+27}{2} = 46^\circ\text{C}$. Comme le tuyau chauffant est un agrotherm en polypropylène de type pp25, $k_{ch} = 13,5 \text{ Kcal/hm}^2\text{C}$ [1] pour la gamme de température de l'entrée de l'eau 65-67,5°C.

L'équation(II.15)devient :

$$L_{ch} = \frac{53873,4}{0,0785 \cdot 13,5 (46-20)} = 1955\text{m} \quad (\text{II.16})$$

II.1.4.3/ Calcul surface de l'agrotherm:

L'équation (II.10) permet de calculer surface de l'agrotherm :

$$S_{ch} = 0,0785 \cdot L_{ch}$$

$$S_{ch} = 0,0785 \cdot 1955 = 153,5 \text{ m}^2 \quad (\text{II.17})$$

Température de l'eau (°C)	Coefficient de transfert (Kcal/hm ² °C)
70	14
67,5-70	13,75
65-67,5	13,5
62,5-65	13,25
60-62,5	13
57,5-60	12,75
55-57,5	12,5
52,5-55	12,25
50-52,5	12

Tableau(II.1): Coefficient de transfert pour polypropylène PP25 d'après

Verlodt 1991[1].

II.1.4.4/ Calcul du débit d'eau de chauffage dans la serre :

Il est important de rappeler que la température de sortie de l'échangeur doit être, généralement la plus basse possible, généralement elle est comprise entre 25°C et 27°C (valeur testées expérimentalement)[1].

$$D_v = \dot{m} / \rho = K' S_{Si} (T_{ai} - T_{ae}) / \rho C_p (T_{ee} - T_{es}) \quad (\text{II.18})$$

D_v : le débit volumique d'eau dans l'agrotherm (m^3/s).

$$D_v = \frac{Q}{\rho C_p (T_{ee} - T_{es})} \quad (\text{II.19})$$

$$D_v = 62553 / 1000 \cdot 4180 (65 - 27) = 0,39 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 0,39 \text{ l/s} \quad (\text{II.20})$$

II.2/ Propriétés thermo-physiques des diverses composantes de la serre :

En résumé, ces propriétés sont regroupées dans le tableau suivant :

Les composantes de la serre	La masse volumique (kg/m^3)	La conductivité thermique ($\text{W}/\text{m.K}$)	La capacité thermique massique ($\text{J}/\text{kg.K}$)
La couverture (polyéthylène)	925	0,3	3200
Le sol	1620	1,3	1480
La végétation (feuille de tomate)	360	/	900
L'agrotherm (polypropylène)	905	0,22	1700

Tableau(II.2): Propriétés thermo-physiques des diverses composantes de la serre [27],[4],[28].

II.3/ Projet de chauffage de la serre :

L'eau en provenance du puits géothermique((1) sur le dessin ci-dessous), doit être stockée de préférence dans un réservoir d'appoint (3), qui assure un approvisionnement en eau lors d'une intervention éventuelle au niveau du puits. La vanne thermostatique (5), permette une régulation du débit d'eau de chauffage alimentant la serre(6). La sortie de cette dernière est alimentée directement vers d'autres usages (irrigation, consommation humaine,...). Dans la période chauffée, il faut utiliser au niveau d'un refroidisseur(7), la vanne thermostatique (4) qui permette de by-passer l'eau de chauffage. L'eau géothermique doit être stockée dans un bac(8), afin d'assurer une distribution à l'oasis(10) qui se trouve à proximité de la station de référence[1].

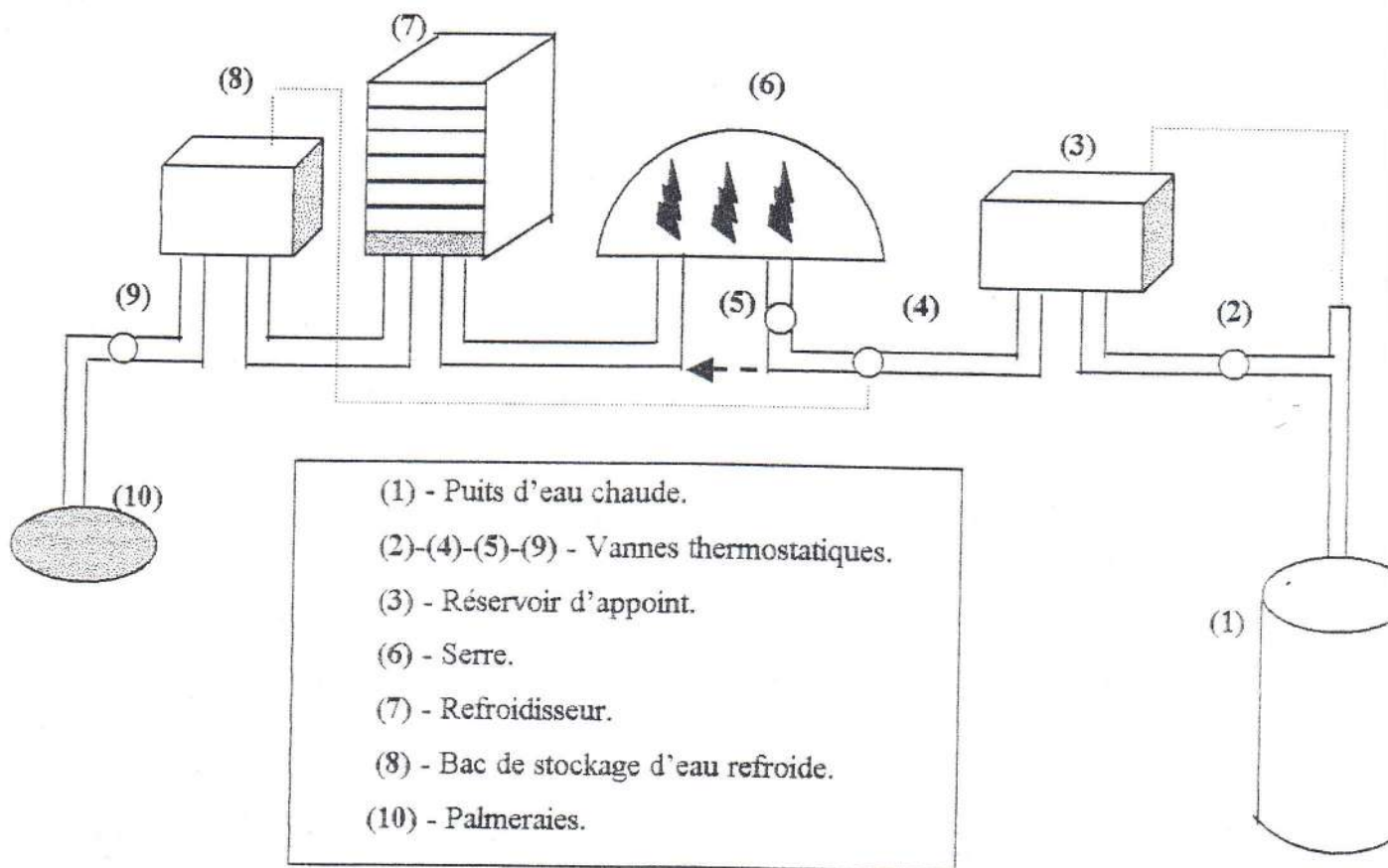


Figure (II.3) : Schématisation de l'objet de chauffage de la serre.

Chapitre III

Chapitre III

Nature des échanges de chaleur et de masse dans la serre

III.1/ Introduction :

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

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

La présence de la culture dans la serre modifie ce comportement thermohydrique en créant des ombres sur le sol et en l'évaporant le jour d'importantes quantités d'eau.

Le changement des paramètres de la serre en fonction du climat extérieur et la croissance de la plante justifient l'utilisation de la modélisation thermique en temps réel.

III.2/ Hypothèses de la modélisation:

- 1). La serre est considérée comme un système physique dont les conditions aux limites sont les données météorologiques(température extérieure, vitesse du vent, rayonnement solaire global, humidité extérieure) et la température du sol extérieur.
- 2). La serre est de dimensions horizontales infinies (système unidimensionnel).
- 3). La couverture de la serre est en polyéthylène de basse densité.
- 4). La Température de chaque composant de la serre est uniforme.
- 5). Les épaisseurs de la paroi (0,18mm[16]) et celle de végétation sont très faibles pour pouvoir y négliger les échanges conductifs.
- 6). L'air de la serre est supposé transparent du point de vue radiatif.
- 7). La température de l'agrotherm reste constante dans le temps ($T_{ch}=46^{\circ}\text{C}$).

8). Pour construire le modèle nous utiliserons la méthode des bilans thermiques pour chaque composant, en évaluant ses gains, et ses pertes et nous écrirons l'égalité suivante :

$$\text{Gains} - \text{Pertes} + \text{Variation de stock} = 0 \quad (\text{III.1})$$

Il faut donc pour cela caractériser finement les gains et les pertes (voir les échanges dans la figure(III.1)).

Note que : 1 : Paroi plastique, 2 : Air extérieur, 3 : Air intérieur, 4 : Végétation, 5 : Sol intérieur, 6 : Sol extérieur, 7 : Agrotherm.

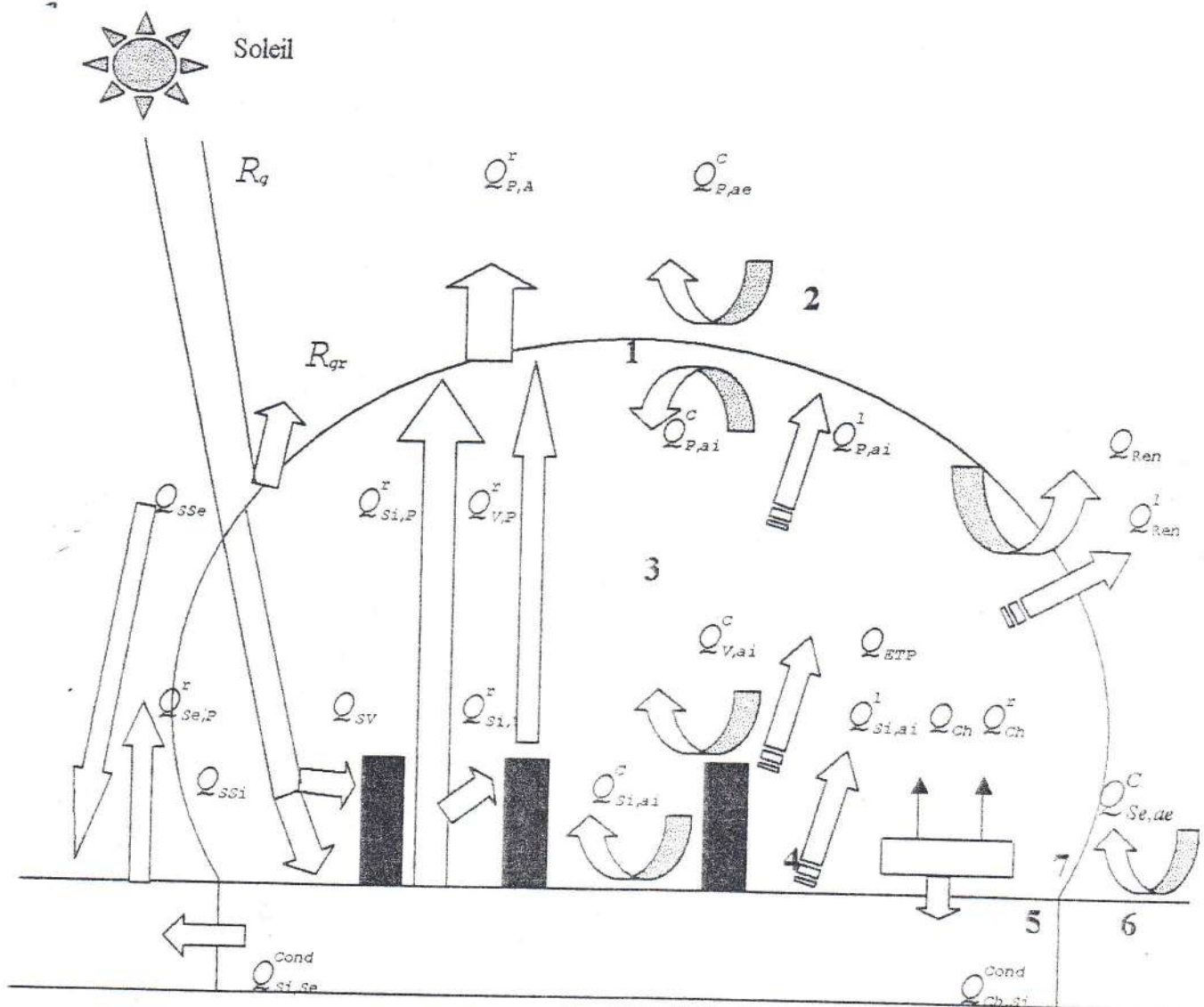


Figure (III.1) : Schématisation des différents échanges thermiques et de masse au niveau de la serre.

III.3/ Mise en équations :

A partir de ces différentes hypothèses nous allons écrire les phénomènes physiques qui interviennent dans le climat interne de la serre. Ces phénomènes sont essentiellement des transferts thermiques et hydriques, les réactions chimiques liées à l'activité photosynthétique des plantes ayant des répercussions très faibles sur le climat intérieur (seulement 2% en moyenne du rayonnement solaire sont utilisés pour fixer le carbone de l'air[14]). Par contre, l'action thermique et hydrique de la plante sur le climat interne de la serre ne peut pas être ignorée, notamment les mécanismes de l'évaporation qui dépendent des facteurs physiques (température, humidité) mais aussi des facteurs biologiques.

Nous sommes donc conduits à analyser les transferts thermiques et hydriques de la serre.

III.3.1/ Echanges thermiques :III.3.1.1/ Echanges radiatifs :III.3.1.1.1/ Emission d'un corps :

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

$$Q = \sigma T^4 \quad (III.2)$$

σ : constante de Stefan-boltzman (W/m^2K^4).

T : température en (K).

Pour les corps naturels étant gris, leur l'énergie émise doit être pondérée par un coefficient ε appelé émissivité:

$$Q = \varepsilon \sigma T^4 \quad 0 \leq \varepsilon \leq 1 \quad (III.3)$$

III.3.1.1.2/ Echanges par rayonnement entre deux corps gris :

Soient deux corps gris de surface S_1 et S_2 et émissivité ε_1 et ε_2 portés à des températures absolues T_1 et T_2 . Par unité de temps, le premier émet une énergie

$Q_1 = \varepsilon_1 \sigma T_1^4 S_1$, tandis que le second en reçoit :

$$Q_{12} = \varepsilon_1 \sigma T_1^4 S_1 F_{12} \quad (III.4)$$

et absorbe $Q_{12} \varepsilon_2$.

De même le second émet une énergie $Q_2 = \varepsilon_2 \sigma T_2^4 S_2$, et le premier en reçoit Q_{21} :

$$Q_{21} = \varepsilon_2 \sigma T_2^4 S_2 F_{21} \quad (III.5)$$

et absorbe $Q_{21} \varepsilon_1$.

Les coefficients F_{12} et F_{21} (facteurs de forme) dépendent de la position relative des deux corps sont tels que :

$$S_1 F_{12} = S_2 F_{21} \quad (S_1 F_{12} = S_2 F_{21} \text{ [10]}). \quad (\text{III.6})$$

Par unité de temps l'énergie échangée entre les deux corps est donc :

$$Q = Q_{12} - Q_{21} = \sigma \varepsilon_1 \varepsilon_2 S_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \text{ [14]}. \quad (\text{III.7})$$

III.3.1.1.3/ Echange radiatif entre la paroi plastique et la voûte céleste :

$$Q_{p,c} = \sigma S_p \varepsilon_p \varepsilon_c F_{p,c} (T_p^4 - T_c^4) \text{ [18]} \quad (\text{III.8})$$

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

ε_p : émissivité de la paroi.

S_p : surface de la paroi plastique (couverture) (m^2)

ε_c : émissivité du ciel.

T_p : température de la paroi (K).

T_c : température du ciel (K).

-Il y a plusieurs formules qui donnent la température du ciel, notamment celle de Swinbank [23] :

$$T_c = 0,0552 T_{ae}^{1,5} \quad (\text{III.9})$$

T_{ae} : température de l'air extérieur.

-citons également corrélations suivantes [26] donnant T_c et ε_c :

$$T_c = T_{ae} - 12 \quad (T_c \text{ en } ^\circ\text{C}) \quad (\text{III.10})$$

$$\varepsilon_c = 1 - 0,261 \cdot \exp \left[-7,77 \cdot 10^{-4} (T_{ae} - 273)^2 \right] \quad (\text{III.11})$$

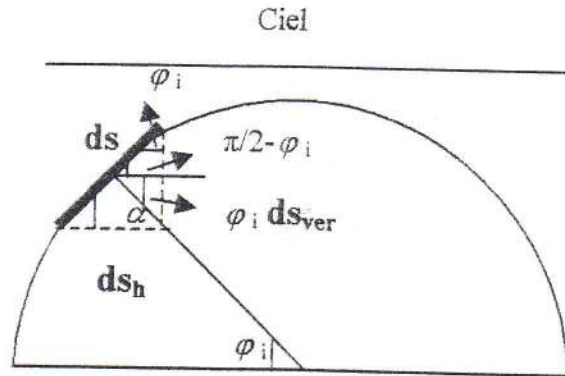
$$\varepsilon_c = 0,787 + 0,641 \ln \left(\frac{T'_{ae}}{273} \right) \quad (\text{III.12})$$

T'_{ae} : Température de rosée de l'air extérieur (en K)

Pour calculer le facteur de forme entre la paroi et le ciel, on suppose que celui-ci est un plan infini. Le facteur de forme de l'élément (i) de surface (dS) de la paroi plastique de la serre vis à vis du ciel est donné par [1] :

$$F_{i,c} = (1 + \cos \varphi_i) / 2. \quad (\text{III.13})$$

φ_i : étant l'angle que fait le rayon joignant le centre de la serre à l'élément de la paroi (i), avec le plan horizontal.



Figure(III.2) : Facteur de forme de l'élément ds avec le ciel.

L'intégration de $F_{i,c}$ sur l'ensemble de la surface donnera le facteur de forme entre la paroi et le ciel :

$$S_p F_{p,c} = \int_{S_p} F_{i,c} ds = \frac{1}{2} \int_{S_p} (1 + \cos \varphi_i) ds = \frac{1}{2} \left(\int_{S_p} ds + \int_{S_p} \cos \varphi_i ds \right) \quad (\text{III.14})$$

$$ds_h = ds \cos \alpha \quad (\text{III.15})$$

$$ds_{ver} = ds \sin \alpha \quad (\text{III.16})$$

D'après la figure(III.2) on trouve : $\alpha = \pi/2 - \varphi_i$. (III.17)

Donc : $ds_h = ds \cos(\frac{\pi}{2} - \varphi_i) = ds \sin \varphi_i$. (III.18)

$$ds_{ver} = ds \sin(\frac{\pi}{2} - \varphi_i) = ds \cos \varphi_i. \quad (\text{III.19})$$

ds_h : étant la projection de l'élément (ds) sur le plan horizontal.

ds_{ver} : étant la projection de l'élément (ds) sur le plan vertical.

La formule(III.14)devient :

$$S_p F_{p,c} = \frac{S_p}{2} + \frac{1}{2} \int_{S_p} ds_{ver} = \frac{1}{2} (S_p + S_{ver}) \quad (\text{III.20})$$

$$S_{ver} = L_s \cdot H \quad (\text{III.21})$$

L_s :longueur de la serre(m).

H : hauteur maximal moyenne de la serre (m).

$$\text{Donc : } F_{p,c} = (1+b)/2. \quad (\text{III.22})$$

$$\text{Où } b = \frac{S_{ver}}{S_p} = \frac{L_s \cdot H}{S_p} \quad (\text{III.23})$$

On en déduit :

$$F_{p,c} = (1 + \frac{L_s \cdot H}{S_p})/2 \quad (\text{III.24})$$

III.3.1.1.4/ Echange radiatif entre le sol extérieur et la paroi :

$$Q_{se,p}^r = \sigma S_{se} \epsilon_p \epsilon_{se} F_{se,p} (T_{se}^4 - T_p^4) [18] \quad (\text{III.25})$$

S_{se} : surface du sol extérieur (m²)

ϵ_{se} : émissivité du sol extérieur.

T_{se} : température de sol extérieur (K).

$F_{se,p}$: facteur de forme entre le sol extérieur et la paroi

$$\text{Or } Q_{se,p}^r = - Q_{p,se}^r \quad (\text{III.26})$$

$$S_{se} F_{se,p} = S_p F_{p,se} \Rightarrow F_{se,p} = F_{p,se} \cdot \frac{S_p}{S_{se}} \quad (\text{III.27})$$

On repose cette relation dans l'équation (III.25) :

$$Q_{se,p}^r = \sigma S_{se} \epsilon_p \epsilon_{se} F_{p,se} (T_{se}^4 - T_p^4) \quad (\text{III.28})$$

$F_{p,se}$: facteur de forme entre la paroi et le sol extérieur .

Pour calculer le facteur de forme $F_{p,se}$ on utilise la relation :

$$\sum_{j=1}^n F_{i,j} = 1 [10] \quad (\text{III.29})$$

$$\text{Donc : } F_{p,se} + F_{p,c} = 1 \quad (\text{III.30})$$

$$F_{p,se} = 1 - F_{p,c} \quad (\text{III.31})$$

Compte tenu de l'équation (III.24), on tire :

$$F_{p,se} = (1 - \frac{L_s \cdot H}{S_p})/2 \quad (\text{III.32})$$

III.3.1.1.5/ Echange radiatif entre le sol intérieur et la paroi:

$$Q_{si,p}^r = \sigma S_{si} \varepsilon_p \varepsilon_{si} F_{si,p} (T_{si}^4 - T_p^4) [18] \quad (III.33)$$

$F_{si,p}$:facteur de forme entre le sol intérieur et la paroi.

ε_{si} :émissivité de sol intérieur.

T_{si} :température de sol intérieur (K).

S_{si} :surface de sol couvert(m²).

III.3.1.1.6/ Echange radiatif entre le sol et la végétation :

$$Q_{si,v}^r = \sigma S_{si} \varepsilon_{si} \varepsilon_v F_{si,v} (T_{si}^4 - T_v^4) \quad (III.34)$$

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

S_v :surface de la végétation(m²).

III.3.1.1.7/ Echange radiatif entre la végétation et la paroi :

$$Q_{v,p}^r = \sigma S_v \varepsilon_p \varepsilon_v F_{v,p} (T_v^4 - T_p^4) [1] \quad (III.35)$$

ε_v : émissivité de la végétation.

$F_{v,p}$:facteur de forme entre la végétation et la paroi.

III.3.1.1.8/ Echange radiatif entre le corps chauffant et la paroi :

$$Q_{ch,p}^r = \sigma S_{ch} \varepsilon_{ch} \varepsilon_p F_{ch,p} (T_{ch}^4 - T_p^4) \quad (III.36)$$

ε_{ch} :émissivité de corps chauffant.

S_{ch} :surface de corps chauffant(m²)

T_{ch} :température de corps chauffant(K).

$F_{ch,p}$:facteur de forme entre le corps chauffant et la paroi.

III.3.1.1.9/ Echange radiatif entre le corps chauffant et la végétation :

$$Q_{ch,v}^r = \sigma S_{ch} \varepsilon_{ch} \varepsilon_v F_{ch,v} (T_{ch}^4 - T_v^4) \quad (III.37)$$

$F_{ch,v}$:facteur de forme entre le corps chauffant et la végétation.

III.3.1.1.10/ Echange radiatif entre le corps chauffant et le sol intérieur :

$$Q_{ch,si}^r = \sigma S_{ch} \epsilon_{ch,si} F_{ch,si} (T_{ch}^4 - T_{si}^4) \quad (III.38)$$

$F_{ch,si}$:facteur de forme entre le corps chauffant et sol intérieur.

Remarque : Les différents facteurs de forme seront calculons ultérieurement dans le chapitre VII.

III.3.1.2/ Echanges convectifs:

La convection est un transfert de chaleur par mouvement d'un fluide ,
Le flux convective échangé entre un fluide à la température T_1 et un solide à la température T_2 s'écrit par unité de temps. :

$$Q = h S (T_1 - T_2) [14]. \quad (III.39)$$

h :coefficient d'échange par convection (W/m^2K).

S :surface d'échange(m^2).

III.3.1.2.1/Convection forcée :

En l'absence de convection naturelle, le coefficient d'échange par convection est indépendant de la différence de température de la paroi et de fluide ($T_m - T$) mais il dépend des 6 grandeurs suivantes :

U_m :vitesse moyenne du fluide(m/s).

ρ :masse volumique du fluide(kg/m^3).

C_p :chaleur spécifique du fluide($J/kg.K$).

λ :conductivité thermique du fluide ($W/m.K$).

μ :viscosité cinématique du fluide ($Pa.s$).

D :dimension caractéristique de la surface d'échange (m)

A partir de ces grandeurs, on définit les nombres sans dimensions suivants :

$$Nu = \frac{hD}{\lambda} \quad \text{nombre de Nusselt.} \quad (III.40)$$

$$Re = \frac{\rho U_m D}{\mu} \quad \text{nombre de reynolds.} \quad (III.41)$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad \text{nombre de prandtl.} \quad (III.42)$$

Les travaux expérimentaux étudiant de transfert de chaleur par convection dans une situation donnée (géométrie, fluide, ...) fournissent leur résultats sous forme de corrélations mathématiques :

$Nu = F(Re, Pr)$ qui permettent de calculer h par :

$$h = \frac{Nu \lambda}{D} \quad (\text{III.43})$$

On considère dans la serre le coefficient de convection forcée entre la paroi et l'air extérieur (vitesse de vent), d'une part et entre la paroi et l'air intérieur (ventilation), d'autre part.

III.3.1.2.2/ Echange convectif entre la paroi et l'air extérieur :

$$Q_{p,ae}^c = h_{p,ae}^c S_p (T_p - T_{ae}) \quad [18]. \quad (\text{III.44})$$

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

Pour calculer $h_{p,ae}^c$, utilisons la formule donnant le nombre Nu dans un écoulement autour d'un cylindre dont l'axe lui est parallèle [24] :

$$Nu = 0,46 Re^{0,5} + 0,00128 Re, \text{ si } Re > 500. \quad (\text{III.45})$$

$$h_{p,ae}^c = \frac{Nu \cdot \lambda_{ae}}{L_s} \quad (\text{III.46})$$

$$Re = \frac{V \cdot L_s}{\nu_{ae}} \quad (\text{III.47})$$

L_s : longueur de la serre (m).

Les propriétés physiques de l'air sec à différentes températures sont données par les tableaux (voir annexe A) [20], [10].

A l'aide des interpolations polynomiales, on peut avoir les valeurs de :

$$\rho = \rho(T), \nu = \nu(T), C_p = C_p(T), \mu = \mu(T) \text{ et } \lambda = \lambda(T).$$

Ainsi, si $250\text{K} \leq T \leq 600\text{K}$:

$$\rho (\text{kg/m}^3) = 3,81756 - 0,01493T + 2,49758 \cdot 10^{-5}T^2 - 1,513131 \cdot 10^{-8}T^3 \quad (\text{III.48})$$

$$\nu (\text{m}^2/\text{s}) = -4,261231 \cdot 10^{-5} + 3,31291 \cdot 10^{-7}T - 6,289391 \cdot 10^{-10}T^2 + 5,65051 \cdot 10^{-13}T^3 \quad (\text{III.49})$$

$$C_p(\text{J/kg.K}) = 1009,18398 - 0,03268 T - 2,5974 \cdot 10^{-5} T^2 + 3,4343 \cdot 10^{-7} T^3 \quad (\text{III.50})$$

$$\mu(\text{Pa.s}) = -1,0240310^{-6} + 8,6842 \cdot 10^{-8} T - 8,7056310^{-11} T^2 + 4,84848 \cdot 10^{-14} T^3 \quad (\text{III.51})$$

$$\lambda(\text{W/m.K}) = 1,10606 \cdot 10^{-4} + 9,70123 \cdot 10^{-5} T - 3,37662 \cdot 10^{-8} T^2 + 2,0202 \cdot 10^{-12} T^3 \quad (\text{III.52})$$

III.3.1.2.3/ Echange convectif entre le sol extérieur et l'air extérieur :

$$Q_{se,ae}^c = h_{se,ae}^c S_{se} (T_{se} - T_{ae}) \quad (\text{III.53})$$

Pour calculer le coefficient d'échange par convection entre le sol extérieur et l'air extérieur $h_{se,ae}^c$, on utilise la formule de MC.Adames [23] et [16] :

$$h_{se,ae}^c = 5,7 + 3,8 V \quad (\text{III.54})$$

V : vitesse du vent (m/s).

III.3.1.2.4/ Echange convectif entre la paroi et l'air intérieur :

$$Q_{p,ai}^c = h_{p,ai}^c S_p (T_p - T_{ai}) \quad [\text{18}] \quad (\text{III.55})$$

$h_{p,ai}^c$: coefficient d'échange par convection entre la paroi et l'air intérieur ($\text{W/m}^2\text{°C}$).

On considère l'échange entre la paroi et l'air intérieur par convection forcée d'un cylindre :

$$h_{p,ai}^c = \frac{Nu \lambda_{ai}}{H} \quad (\text{III.56})$$

λ_{ai} : conductivité de l'air intérieur (W/m.K)

H : hauteur maximale de la serre (m).

Le nombre de Nusselt dans l'écoulement turbulent dans un cylindre ($Re \geq 4000$), est donné par :

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,33} \text{ analogie de Colburn [19].} \quad (\text{III.57})$$

III.3.1.2.5/ Echange convectif entre la végétation et l'air intérieur :

$$Q_{v,ai}^c = h_{v,ai}^c S_v (T_v - T_{ai}) \quad (III.58)$$

$h_{v,ai}^c$: coefficient d'échange convectif entre la végétation et l'air intérieur
(W/m² °C).

S_v : surface de la végétation (m²).

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

-régime laminaire : $Re < 3.10^5$

$$Nu = \frac{2}{3} Re^{0.5} Pr^{0.33} \quad [19] \quad (III.59)$$

-régime turbulent : $Re > 3.10^5$

$$Nu = \frac{0.036 Re^{0.6} Pr^{0.33}}{1 + 0.83 (Pr^{0.6} - 1)} \quad [19] \quad (III.60)$$

$$h_{v,ai}^c = \frac{Nu \lambda_{ai}}{D} \quad (III.61)$$

D : dimensions moyenne d'une feuille de tomate (m).

III.3.1.2.6/ Echange convectif entre sol intérieur et l'air intérieur :

$$Q_{si,ai}^c = h_{si,ai}^c S_{si} (T_{si} - T_{ai}) \quad (III.62)$$

$h_{si,ai}^c$: coefficient d'échange par convection entre le sol intérieur et l'air intérieur
(W/m² °C).

S_{si} : surface du sol couvert (m²).

On note que : $h_{si,ai}^c = h_{p,ai}^c$: d'après la référence [1]. (III.63)

III.3.1.2.7/ Echange convectif entre l'agrotherm et l'air intérieur :

$$Q_{ch,ai}^c = h_{ch,ai}^c S_{ch} (T_{ch} - T_{ai}) \quad (III.64)$$

$h_{ch,ai}^c$: coefficient d'échange par convection entre l'agrotherm et l'air intérieur
(W/m² °C).

S_{ch} : surface de l'agrotherm (corps chauffant) (m²).

$$h_{ch,ai}^c = K_{ch} = 13,5 \text{ Kcal/hm}^2 \text{ °C} = 15,67 \text{ W/m}^2 \text{ °C} \quad [1]. \quad (III.65)$$

III.3.1.3/ Echange de le renouvellement de l'air :

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

Ce renouvellement d'air permet à la serre l'échange avec l'extérieur de la vapeur d'eau, du gaz carbonique et de la chaleur[3].

III.3.1.3.1/ Le taux de renouvellement d'air :

Le taux de renouvellement d'air nous renseigne sur l'étanchéité de la serre. Pour le déterminer, on injecte dans la serre le protoxyde d'azote. Après arrêt de l'injection, la concentration en ce gaz diminue d'autant plus vite que la serre est moins étanche. L'enregistrement de la variation de la composition du mélange, permet de calculer le taux de renouvellement de l'air exprimé (h^{-1}), ce taux varie également en fonction de la vitesse du vent.

Pour le calcul des taux de renouvellement de l'air, on utilise une expression de la forme [14] :

$$R_a = R_0 + V f(i_o) + g(i_b) \quad (III.66)$$

V: vitesse du vent extérieur en (m/s).

i_o : indice de position des ouvrants.

i_b : indice de brassage (fonctionnement de ventilateurs).

R_0 : taux de renouvellement de l'air sans ouverture et sans brassage.

R_a : taux de renouvellement de l'air avec ouverture et avec brassage.

f et g sont des fonctions à déterminer expérimentalement.

On utilise les formules empiriques suivantes[14] :

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

$$R_a = 0,6 + 0,55 V \quad \text{pour une serre fermée} \quad (III.67)$$

$$R_a = 5,5 + 2,1 V \quad \text{pour une serre ouverte} \quad (III.68)$$

III.3.1.3.2/ Echange de l'air sec :

$$Q_{Ren} = \rho_{ai} R_a V_{ai} C_{Pai} (T_{ae} - T_{ai}) [18] \quad (III.69)$$

ρ_{ai} : masse volumique de l'air intérieur (kg/m^3).

R_a : taux de renouvellement de l'air (s^{-1}).

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

$C_{p_{ai}}$:chaleur massique de l'air intérieur($J/kg.K$).

III.3.1.3.3/ Echange de l'air humide :

$$\dot{Q}_{ren} = \rho_{ai} L R_a V_{ai} (W_{ae} - W_{ai}) [14] \quad (III.70)$$

L : Chaleur latente de vaporisation d'eau (J/kg).

W_{ai} : Humidité absolue de l'air intérieur(kg/kg).

W_{ae} : Humidité absolue de l'air extérieur(kg/kg).

III.3.1.4/ Echanges conductifs :

La conduction est un transfert de chaleur à travers un milieu sans mouvement interne et sans intervention du rayonnement.

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

$$\vec{Q} = -\lambda S \vec{\text{grad}} T \quad (III.71)$$

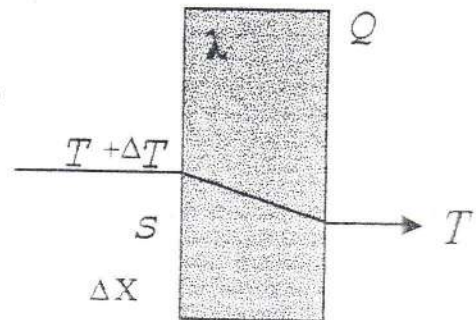
$$Q = -\lambda S \frac{\Delta T}{\Delta X} [14] \quad (III.72)$$

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

λ :conductivité thermique($W/m.K$)

ΔT :différence de température(K).

ΔX :épaisseur l'échantillon(m).



Figure(III.3) :Conduction thermique.

Dans la serre leur importance est considérable entre, d'une part, le sol intérieur et le sol extérieur et entre l'agrotherm et le sol intérieur d'autre part.

III.3.1.4.1/ Echange conductif entre le sol intérieur et le sol extérieur :

Considérons l'échange conductif entre les deux sols par conduction radiale à travers demi cylindre :

$$Q_{si,se}^{Cond} = \frac{\pi \lambda_{si} L_s}{\ln(D_2/D_1)} (T_{si} - T_{se}) \quad (III.73)$$

λ_{si} :conductivité thermique du sol
intérieur(W/m.K).

D_1 :diamètre estimé du sol intérieur(largeur de la
serre) (m)

D_2 :diamètre estimé du sol extérieur (m).

L_s :longueur de la serre(m).

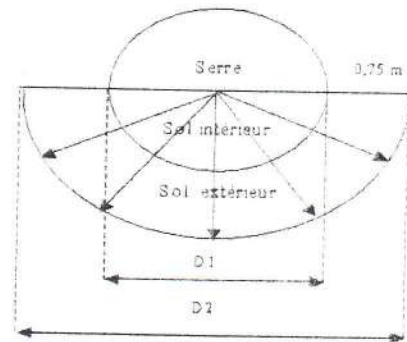


Figure (III.4) : Echange
conductif entre les deux sols.

III.3.1.4.2/ Echange conductif entre l'agrotherm et le sol intérieur :

Considérons l'échange conductif entre l'agrotherm et le sol intérieur à travers une surface plane S

$$Q_{ch,si}^{cond} = - \frac{\lambda_{si} S}{e_{si}} (T_{ch} - T_{si}) \quad (III.74)$$

S : surface d'échange conductif (m^2).

e_{si} : profondeur à partir de laquelle la température du sol intérieur uniforme devient.

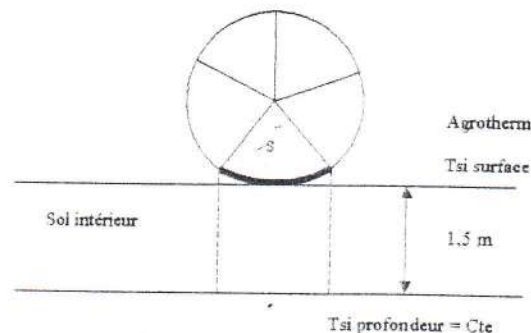


Figure (III.5) : Echange conductif entre l'agrotherm et le sol intérieure.

II.3.2/ Echanges massiques :

Les transferts de chaleur par rayonnement ,convection et conduction sont des transfert de chaleur sensibles .Dans une serre, d'importantes quantités d'énergie sont véhiculées sous forme de chaleur latente par évaporation et condensation. Pour faire évaporer une masse d'eau $\dot{m}$, il faut lui fournir une chaleur ,

$$Q = L \cdot \dot{m} \quad [14] \quad (\text{III.75})$$

$\dot{m}$: densité de flux massique en $\text{kg/m}^2 \text{ h}$

L : chaleur latente de vaporisation de l'eau et vaut $692 \text{ Wh/kg} = 2491,2 \text{ kJ/kg}$.

Lorsque de l'eau s'évapore de la surface d'un sol celui-ci fournit de la chaleur, donc se refroidit. L'air environnant se refroidit par convection avec le sol.

Inversement une masse d'eau ($\dot{m}$) se condensant sur un corps lui fournit une quantité de chaleur.

III.3.2.1/ Evaporation/condensation au niveau de la paroi plastique :

Le calcul du flux thermique échangé entre la paroi et l'air intérieur se fait avec la formule de Lewis :

$$Q_{ai,p}^1 = h_{p,ai}^1 S_p (W_{ai} - W(T_p)) \quad [14] \quad (\text{III.76})$$

$$h_{p,ai}^1 = L \frac{h_{p,ai}^c}{C_{p,ai}} \quad (\text{III.77})$$

$Q_{p,ai}$: Taux horaire de variation de l'enthalpie de l'élément due à la condensation sur la paroi (W).

$h_{p,ai}^1$: coefficient de transfert de masse paroi-air intérieur (W/m^2).

$W(T_p)$: humidité spécifique de l'air intérieur à la température de la paroi (kg/kg).

W_{ai} : humidité spécifique de l'air intérieur (kg/kg).

$L(T_{ai})$: chaleur latente de vaporisation à la température de l'air intérieur.

$$L(T) = 24946,36 - 2247 T \quad (\text{J/kg}) \quad [17] \quad (\text{III.78})$$

On conserve la valeur prise dans les conditions normale :

$$L = 590 \text{ cal/kg} = 2466,2 \text{ J/kg} \quad [17] \quad (\text{III.79})$$

III.3.2.2/ Evaporation au niveau du sol:

$$Q_{ai,si}^1 = h_{si,ai}^1 S_{si} (W_{ai} - W(T_{si})) \quad [14] \quad (\text{III.80})$$

$$h_{si,ai}^1 = L \frac{h_{si,ai}^c}{C_{p,ai}} \quad (\text{III.81})$$

$h_{si,ai}^i$: coefficient de transfert de masse sol intérieur-air intérieur (W/m^2).

$W(T_{si})$: humidité spécifique de l'air intérieur à la température du sol intérieur (kg/kg).

L'humidité absolue est définie comme étant la masse de la vapeur d'eau sur la masse de l'air sec. L'humidité absolue W d'une masse d'air est donnée par [14]:

$$W = 0,62197 \frac{P_v}{P - P_v} \quad (III.82)$$

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

P_v : Pression de vapeur d'eau (Pa).

P : Pression atmosphérique (Pa).

Si χ est l'humidité relative, $P_v = \chi P_s$ (III.83)

P_s : Pression de vapeur saturante (Pa).

-Il existe la formule empirique pour calculer P_s .

Lorsque $15^\circ C \leq T \leq 90^\circ C$:

$$P_s(pa) = 7236,2 - 431,43T + 10,76 T^2 \quad [12] \quad T \text{ en } ^\circ C \quad (III.84)$$

III.3.2.3/ Evapotranspiration :

De nombreuses formulations empiriques de l'évapotranspiration sous serre existent et sont obtenues par corrélation des valeurs moyennes journalières.

-La formule la plus simple et la plus couramment employée est la formule de De Vilele [14] :

$$ET = 0,67 \frac{R_{sg}}{L} - 0,2 \quad (mm/j) \quad (III.85)$$

R_{sg} : rayonnement solaire global reçu au niveau de la culture exprimé en ($Wh/m^2.j$).

L : chaleur latente de vaporisation de l'eau exprimée en (Wh/kg).

$L = 2502KJ$ pour 1mm d'eau évaporée par m^2 de surface évaporante.

-La formule de Turc est également basée sur l'utilisation de paramètres climatiques moyens pour une période donnée, généralement un mois. Elle exprime le taux moyen d'évapotranspiration potentielle en fonction du rayonnement global (R_{sg}),

de la température de l'air T_a , mesurée sous abri, et de l'humidité relative χ :

$$ET = 0,4 (T_a - 273) \left(\frac{R_{sg} + 50}{(T_a - 273) + 15} \right) \left[1 + \frac{50 - \chi}{70} \right] [5] \quad (\text{III.86})$$

T_a : température de l'air(K).

R_{sg} : rayonnement solaire global(cal/cm²j).

χ : l'humidité relative(%).

La puissance de l'évapotranspiration donnée par la relation suivante :

$$Q_{ETP} = ET \cdot S_v \quad (\text{III.87})$$

Chapitre IV

Chapitre IV

Gisement solaire

La création de microclimat artificiel dépend dans une large mesure du climat extérieur. Celui-ci dépend de plusieurs paramètres dont le plus important est le rayonnement solaire.

IV.1/ Définitions :

IV.1.1/ Le soleil:

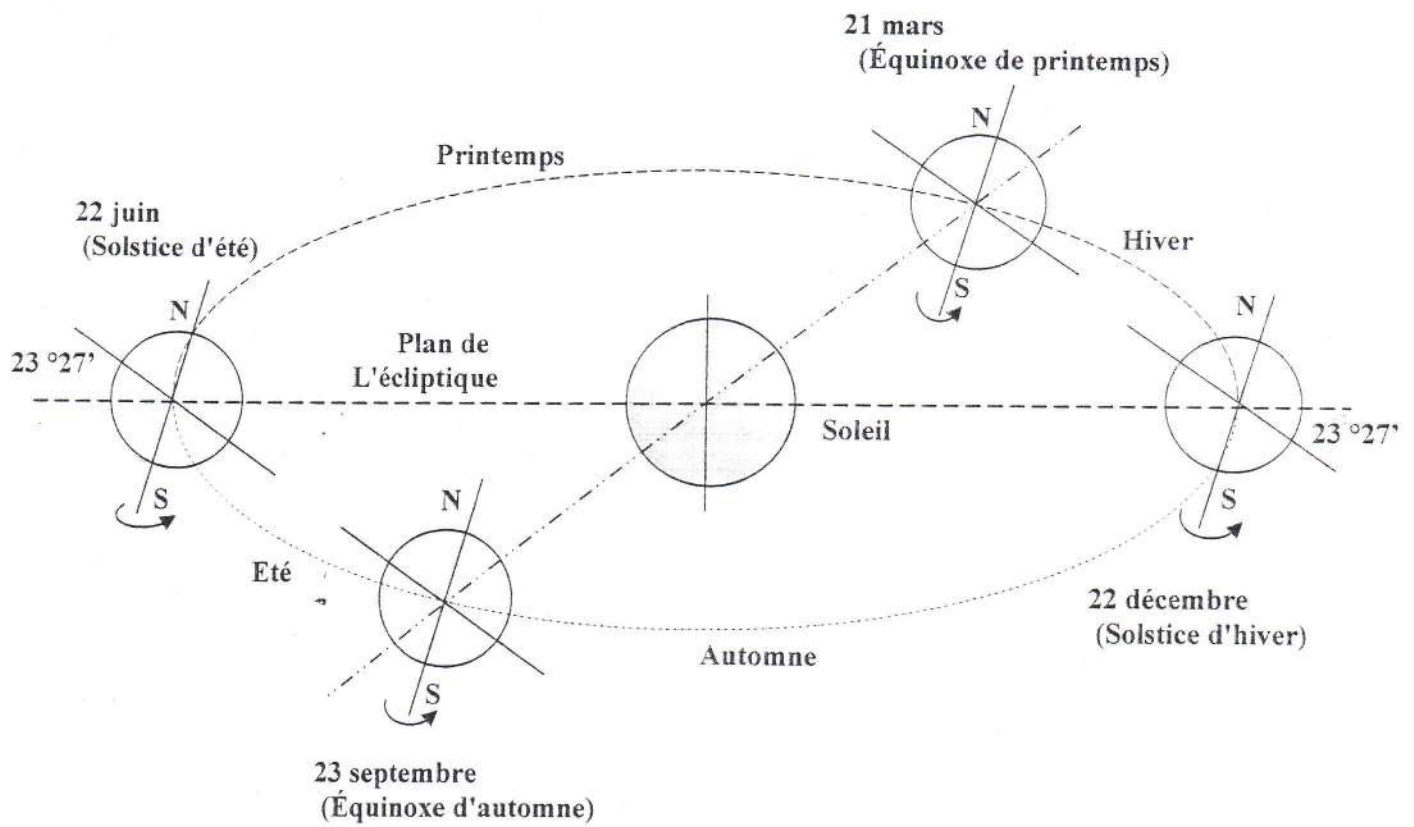
Le soleil est une sphère de plasma où la pression varie considérablement entre le centre et la surface. Cette étoile est le siège de réaction thermonucléaires transformant des noyaux d'hydrogène en noyaux d'hélium avec une émission d'énergie qui donne naissance à un rayonnement électromagnétique réparti sur un très large spectre de longueur d'ondes comprise entre 10^{-10} et 10^4 m. La puissance rayonnée est d'environ $3,8 \cdot 10^{25}$ W/m². Le soleil a un diamètre moyen égal à $1,39 \cdot 10^9$ m soumis à des variations périodiques, sa masse est de l'ordre de $2 \cdot 10^{30}$ kg.

IV.1.2/ La terre :

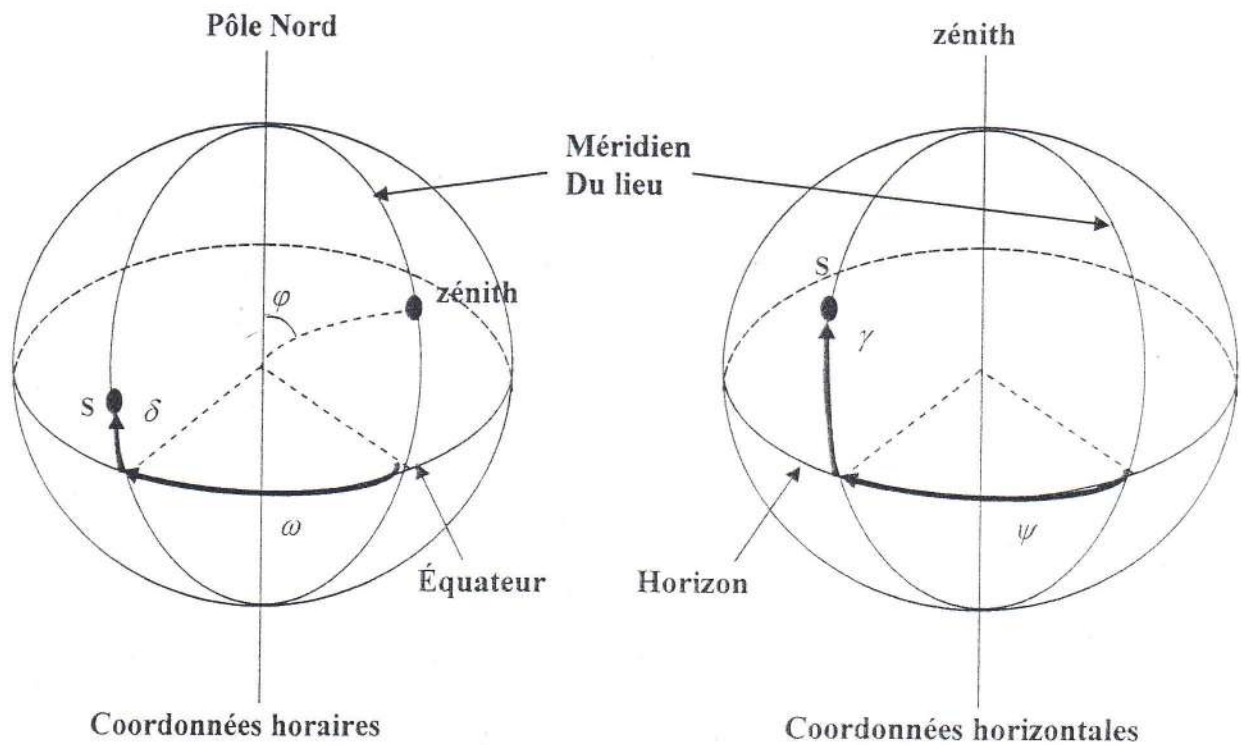
La terre est considérée comme une sphère ayant un diamètre égal à $1,27 \cdot 10^7$ m donc 100 fois plus petite que le soleil. Elle est entourée de l'atmosphère où la pression de l'air diminue quand l'altitude augmente [7].

IV.1.3/ Mouvement de la terre :

La terre tourne autour du soleil, son orbite ayant la forme d'une ellipse dont le soleil occupe un des foyers (figure IV.1(a)). Simultanément, la terre tourne sur elle-même avec une période de 24 h. Ces deux mouvements simultanés entraînent pour l'observateur terrestre un mouvement diurne apparent du soleil dans le ciel, associé à des variations saisonnières. La géométrie qui régit ces différents mouvements, où l'on convient de négliger le rayon terrestre devant la distance terre-soleil et l'on représente la voûte céleste par une sphère de rayon unité, centrée au lieu considéré : la sphère locale. On utilise habituellement deux systèmes de coordonnées (figure IV.1(b)).



(a) : mouvement de la terre autour du soleil.



(b) : deux systèmes de coordonnées sphériques.

Figure(IV.1) : Mouvement de rotation de la terre[6].

-Les coordonnées horaires dont le repère est constitué par l'axe des pôles et de plan de l'équateur. Chaque point de l'espace est repéré par sa déclinaison (δ) et son angle horaire (ω).

-Les coordonnées horizontales dont un repère est donné par la verticale du lieu (zénith) et le plan l'horizon. Chaque point de l'espace est repéré par sa hauteur (h) et son azimut (ψ). L'angle du zénith avec le plan équatorial est la latitude (ϕ) du lieu.

La déclinaison du soleil est l'angle formé par la droite terre-soleil et le plan équatorial. Elle varie entre $+23^\circ 27'$ (au solstice d'été 22 juin) et $-23^\circ 27'$ (au solstice d'hiver, 22 décembre); sa valeur est nulle aux équinoxes (21 mars et 23 septembre). La valeur de la déclinaison au jour n_j (compté du début de l'année), est donné par la formule:

$$\delta = 23,45 \sin(0,986(n_j + 284)) [7] \quad (\text{IV.1})$$

La hauteur du soleil et l'azimut sont liés à la latitude du lieu (ϕ), à la déclinaison solaire (δ) et à l'angle (ω), par la relation suivante :

$$\sin h = \cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi [7] \quad (\text{IV.2})$$

Et, lorsque $h=0$ (heures de lever et coucher du soleil), l'angle horaire ω_0 est tel que :

$$\cos \omega_0 = -\tan \delta \tan \phi. \quad (\text{IV.3})$$

L'azimut est donné par la relation :

$$\cos \psi = \frac{\sin \phi \cos \delta \cos \omega - \cos \phi \sin \delta}{\cos h} [6] \quad (\text{IV.4})$$

$$\sin \psi = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos h} [6] \quad (\text{IV.5})$$

IV.1.3.1/ Le temps solaire :

IV.1.3.1.1/ Temps solaire vrai :

Le temps solaire est défini à partir de la rotation de la terre sur elle-même. Il est donc directement lié à l'angle horaire. L'intervalle de temps entre deux passages du soleil au méridien est 24h. Il est midi (12h) lorsque le soleil est au zénith. On a donc :

$$\text{TSV} = 12 + \frac{\omega}{15} \quad (\omega \text{ en degrés, TSV en heures}) [24] \quad (\text{IV.6})$$

où ω est l'angle horaire (en degrés) défini dans la figure (IV.1).

IV.1.3.1.2/ Temps solaire moyen :

Le temps solaire moyen est lié au temps solaire vrai par la relation suivante:

$$\text{TSM} = \text{TSV} - E \quad (h) [24] \quad (\text{IV.7})$$

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

$$E = \frac{1}{60} [9,87 \sin[2x] - 7,53 \cos[x] - 1,5 \sin[x]] \quad (\text{IV. 8})$$

$$\text{avec } x = \frac{360}{365} (QJ - 81), \quad (x \text{ en degrés}) \quad (\text{IV.9})$$

QJ : étant le quantième du jour ($1 \leq QJ \leq 366$).

IV.1.3.1.3/ Temps universel :

Le temps universel est le temps solaire moyen du méridien Greenwich. Il est lié au temps solaire moyen d'un lieu de longitude λ (comptée positivement vers l'Ouest) par :

$$TU = TSM - \lambda/15 \quad (\text{TU et TSM en heures, } \lambda \text{ en degrés}) \quad (\text{IV.10})$$

IV.1.3.1.4/ Temps légal ou local :

Le temps légal est lié au temps universel par une différence fixée par un nombre (k) [13].

$$TL = TU + k \quad (h) \quad (\text{IV.11})$$

Par exemple, en Algérie, il est 13h à midi TU. Donc, $k=13-12=1$ heure.

$$\text{On dit que l'heure légale de l'Algérie: } TU+1 [13] \quad (\text{IV.12})$$

IV.2/ Le rayonnement solaire :

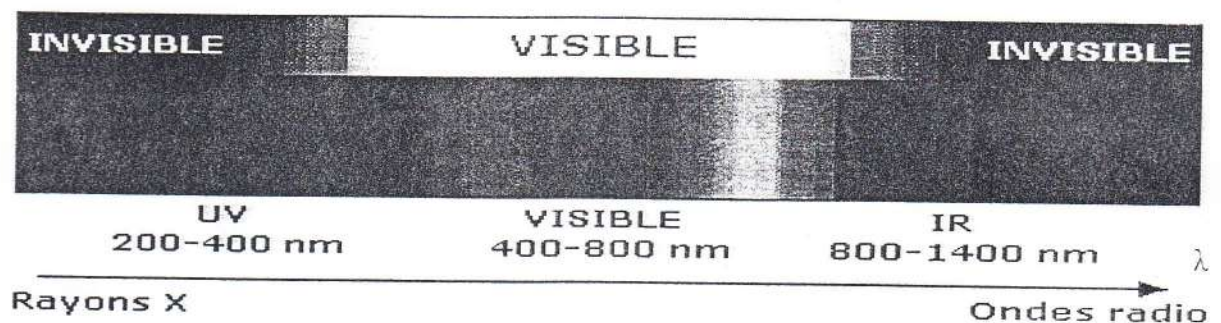
Le soleil est la principale source de l'énergie parvenant à la surface de la terre.

L'analyse du spectre solaire montre qu'il se comporte comme un corps noir ayant une température de 6000K, ce qui situe sa zone d'émission radiative maximale dans la gamme de longueur d'onde allant de 0,3 à 3 μm . La densité de puissance globale émise sur l'ensemble du spectre est de 74 MW/m², et l'irradiance d'une surface normale à la direction du rayonnement, située à l'extérieur de l'enveloppe atmosphérique terrestre représente une densité de flux, connue sous le nom de constante solaire, cette valeur est fixée à $I_{or} = 1353 \text{ W/m}^2$ [5], on peut calculer la valeur de I_r en fonction du quantième du jour dans l'année QJ par :

$$I_r = I_{or} [1 + 0,034 \cos(\frac{360}{365} (QJ - 3))] \quad (\text{IV.13})$$

-Le rayonnement ultraviolet est un rayonnement électromagnétique de longueur d'onde plus courte que le visible (<380 nanomètres).

- Le **rayonnement visible** est un rayonnement électromagnétique stimulant le nerf optique humain, de longueur d'onde comprises approximative entre 380nm et à 780nm.
- Le **rayonnement infrarouge** est un rayonnement électromagnétique de longueur d'onde comprises entre 780nm et à 1mm.
- Le **rayonnement solaire global** est le rayonnement émis par le soleil incident sur une surface donnée.
- Le **rayonnement direct** est le rayonnement solaire incident sur un plan donné, et provenant d'un petit angle solide centré sur le disque solaire.
- Le **rayonnement diffus** est le rayonnement solaire global à l'exception du rayonnement direct .Il comprend la plus grande partie du rayonnement diffusé par l'atmosphère ainsi qu'une partie du rayonnement réfléchi par le sol, suivant l'inclinaison de la surface réceptrice[11].



Figure(IV.2) : Spectre visible[11].

λ :longueur d'onde du rayonnement électromagnétique(nm).

IV.3/ Les formules de puissance du rayonnement solaire :

Il y a plusieurs formules simplifiées pour calculer la puissance du rayonnement (jour clair) sur plan horizontal:

IV.3.1/ Formules de Hottel et Liu& Jordan :

$$\dot{G} = \dot{S} + \dot{d} \quad [15] \quad (IV.14)$$

$$\dot{S} = I \sinh \cdot \tau_i \quad (IV.15)$$

$$\dot{d} = I \sinh \cdot \tau_d \quad (IV.16)$$

g^* : puissance du rayonnement solaire global (W/m^2).

S^* : puissance du rayonnement solaire direct (W/m^2).

d^* : puissance du rayonnement solaire diffus (W/m^2).

τ_1 et τ_d sont les transmission pour le direct et le diffus.

$$\tau_1 = a_0 + a_1 \exp(-K/\sinh) \quad (IV.17)$$

$$\tau_d = 0,2710 - 0,2939\tau_1 \quad (IV.18)$$

$$\text{Avec : } a_0 = 0,4237 - 0,0082(6-Z)^2 \quad (IV.19)$$

$$a_1 = 0,5055 - 0,00595(6,5-Z)^2 \quad (IV.20)$$

$$K = 0,2711 - 0,01858(2,5-Z)^2, \quad K < 2,5 \text{ Km.} \quad (IV.21)$$

Z: altitude en Km

IV.3.2/ Formule de Perrin de Brichambaut :

$$g^* = s^* + d^* \quad [15] \quad (IV.22)$$

$$S^* = A.(\sinh) \exp [-(C.\sin(h+2))]^{-1} \quad (IV.23)$$

$$d^* = B.(\sinh)^{0,4} \quad (IV.24)$$

Avec : A = 1300 B = 87 C = 6 pour un ciel très pur.

A = 1230 B = 125 C = 4 pour un ciel moyen.

A = 1200 B = 187 C = 2,5 pour un ciel pollué.

IV.3.3/ Formule global de Perrin de Brichambaut :

Le global est obtenu directement sous la forme :

$$g^* = A.(\sinh)^D \quad [15] \quad (IV.25)$$

Avec : A = 1150 D = 1,15 pour un ciel très pur.

A = 1080 D = 1,22 pour un ciel moyen.

A = 990 D = 1,25 pour un ciel pollué.

IV.4/ Le rayonnement solaire au niveau de la serre :

L'originalité de la serre réside dans sa propriété de transmettre une grande partie du rayonnement solaire et, plus précisément, celui qui est compris entre 400 et

700nm qui contribue au processus de la photosynthèse[8] .

L'absorption du rayonnement à travers un matériau est proportionnel à son intensité et à la distance de son trajet optique :

$$dI = -K I_0 dx \quad [23] \quad (\text{IV.26})$$

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

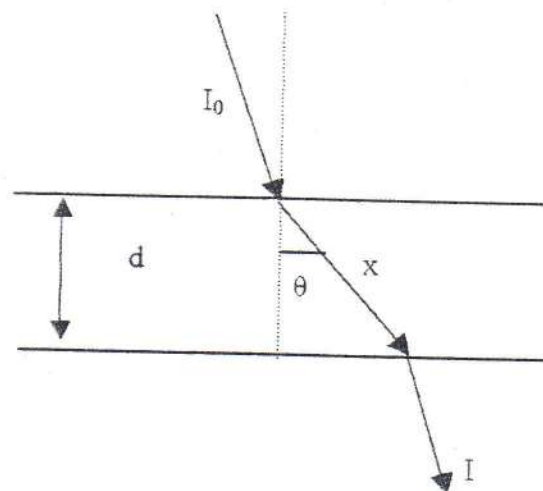
L' intégration cette équation sur une épaisseur (d) du matériau (figureIV.3)donne :

$$\tau = \frac{I}{I_0} = \exp(-K x) \quad (\text{IV.27})$$

$$\text{avec : } x = \frac{d}{\cos \theta} \quad (\text{IV.28})$$

τ :taux d'atténuation.

θ :angle d'incidence



Figure(IV.3) :Atténuation du rayonnement solaire.

A titre d'exemple le coefficient d'extinction de polyéthylène(Pebd) est

$$K = 1,65 \text{cm}^{-1} [24].$$

IV.4.1/ Les flux solaire reçu :

Pour traiter le problème du rayonnement solaire, il nous faut calculer les quantités suivantes[14] :

I_p :puissance absorbée par la paroi.

I_{pl} :puissance absorbée par les plantes.

I_s :puissance absorbée par le sol.

La donnée de base du calcul est R_g : rayonnement solaire reçu sur une surface horizontale.

IV.4.1.1/ Séparation flux diffus – flux direct :

Le rayonnement global R_g peut se séparer en deux composantes :

- la composante directe R_d qui provient directement du soleil.
- la composante diffuse R_a qui provient indirectement du soleil après diffusion par l'atmosphère (air, nuages).

Il existe deux cas où le rayonnement solaire est 100% diffus ($R_d = 0$).

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

Il y a toujours une certaine proportion de diffus dans le rayonnement global, même pour un ciel sans nuage et quand le soleil est haut.

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

h	0° à 2°	5°	10°	20°	30°	60°
a	1	0,8	0,5	0,3	0,25	0,2

Tableau(IV.1) : part du rayonnement diffus selon la hauteur du solaire[14].

Pour tenir compte de la nébulosité, et sachant que :

$$R_d = 1. R_g \quad \text{si } N = 8 \quad (IV.29)$$

$$\text{et } R_d = a. R_g \quad \text{si } N = 0 \quad (IV.30)$$

on emploiera la formule linéaire suivante :

$$R_d = R_g \left[a + (1 - a) \frac{N}{8} \right] \quad (IV.31)$$

$$\text{Donc: } R_d = R_g \left[(1 - a) \cdot \left(1 - \frac{N}{8} \right) \right] \quad (IV.32)$$

On note que R_a et R_d sont le rayonnement diffus et direct arrivant sur une surface horizontale.

IV.4.1.2/ Traitement de la composante diffuse :IV.4.1.2.1/ Au niveau la paroi :

La puissance absorbée par les éléments de la serre est proportionnelle à la surface de leur projection sur plan horizontal :

$$I_p = \alpha S_p R_d \quad [14] \quad (\text{IV.33})$$

S_p : surface de la projection horizontal de la paroi

α : coefficient d'absorption de la paroi au rayonnement solaire.

IV.4.1.2.2/ Au niveau des plantes :

$$I_{pl} = (D_{pl} + H_{pl}) L_s n_{rang} (1 - a_{pl}) R_d \quad [14] \quad (\text{IV.34})$$

D_{pl} : diamètre des plantes (= largeur d'un rang) (m).

H_{pl} : hauteur des plantes (m).

L_s : longueur de la serre (m).

n_{rang} : nombre de rang des plantes.

a_{pl} : albédo des plantes.

R_d : rayonnement solaire diffus (W/m^2).

$$\text{avec : } S_v = D_{pl} L_s n_{rang} + H_{pl} L_s n_{rang} \quad [14] \quad (\text{IV.35})$$

IV.4.1.2.3/ Au niveau du sol :

$$I_s = (1 - a_s) S_s R_d \quad [14] \quad (\text{IV.36})$$

a_s : albédo du sol.

S_s : surface du sol (m^2).

albédo du sol donné par la référence [7] :

-sol humide 0,05 à 0,30.

-sol sec 0,15 à 0,40.

IV.4.1.3/ Traitement de la composante directe : Données géométriques :

$$R_{D(i)} = R_d \cos i \quad [14] \quad (\text{IV.37})$$

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

L'angle d'incidence (i) d'un rayon lumineux provenant du soleil avec la paroi est

l'angle entre la direction du soleil et la normale à la paroi. Cet angle est donné par la formule :

$$\cos i = \cos \beta \sin h + \sin \beta \cos h \cos (\psi - a) \quad [14] \quad (\text{IV.38})$$

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

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

ψ : azimut solaire du plan verticale orienté vers le Sud ($^{\circ}$).

a : orientation du plan considéré par rapport au plan Sud ($^{\circ}$).

Chapitre V

Chapitre V

Les équations de bilan d'énergie dans la serre

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

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

Le bilan thermohydrique sur chaque composant de la serre (paroi, air extérieur, air intérieur, végétation, sol intérieur, sol extérieur, agrotherm) est établi.

Pour chaque composant de la serre on évalue ses gains, ses pertes et on écrit l'égalité suivante :

$$\text{Gain} - \text{Pertes} + \text{Variation de stock} = 0 \quad [18] \quad (\text{V.1})$$

V.1/ Bilan d'énergie de la paroi plastique :

$$\rho_p V_p C_{p,p} \frac{dT_p}{dt} = Q_{sp} + Q_{ai,p}^c + Q_{ae,p}^c + Q_{ai,p}^i + Q_{ch,p}^r + Q_{si,p}^r + Q_{se,p}^r + Q_{s,p}^r + Q_{v,p}^r \quad (\text{V.2})$$

Q_{sp} : puissance de rayonnement solaire absorbée par la paroi(W).

$Q_{ai,p}^c$:puissance convective entre l'air intérieur et la paroi(W).

$Q_{ae,p}^c$:puissance convective entre l'air extérieur et la paroi(W).

$Q_{ai,p}^i$:évaporation / condensation au niveau de la paroi(W).

$Q_{ch,p}^r$:puissance radiative de grande longueur d'onde entre l'agrotherm et la paroi(W).

$Q_{si,p}^r$: puissance radiative de grande longueur d'onde entre le sol intérieur et la paroi(W).

$Q_{se,p}^r$: puissance radiative de grande longueur d'onde entre le sol extérieur et la paroi(W).

$Q_{c,p}^r$: puissance radiative de grande longueur d'onde entre le ciel et la paroi(W).

$Q_{v,p}^r$: puissance radiative de grande longueur d'onde entre la végétation et la paroi(W).

$$\begin{aligned} \rho_p V_p C_p \frac{dT_p}{dt} = & Q_{sp} + h_{ai,p}^c S_p (T_{ai} - T_p) + h_{ae,p}^c S_p (T_{ae} - T_p) \\ & + h_{ai,p}^1 S_p (W_{ai} - W(T_p)) + h_{ch,p}^r S_p (T_{ch} - T_p) + h_{si,p}^r S_p (T_{si} - T_p) \\ & + h_{se,p}^r S_p (T_{se} - T_p) + h_{c,p}^r S_p (T_c - T_p) + h_{v,p}^r S_p (T_v - T_p) \end{aligned} \quad (V.3)$$

Expressions des coefficients d'échange radiatif :

$$h_{ch,p}^r = \sigma \varepsilon_p \varepsilon_{ch} F_{ch,p} (T_{ch}^2 + T_p^2) (T_{ch} + T_p) \approx 4 \sigma \varepsilon_p \varepsilon_{ch} F_{ch,p} T_{m_{ch,p}}^3 \quad (V.4)$$

$$h_{si,p}^r = \sigma \varepsilon_p \varepsilon_{si} F_{si,p} (T_{si}^2 + T_p^2) (T_{si} + T_p) \approx 4 \sigma \varepsilon_p \varepsilon_{si} F_{si,p} T_{m_{si,p}}^3 \quad (V.5)$$

$$h_{se,p}^r = \sigma \varepsilon_p \varepsilon_{se} F_{se,p} (T_{se}^2 + T_p^2) (T_{se} + T_p) \approx 4 \sigma \varepsilon_p \varepsilon_{se} F_{se,p} T_{m_{se,p}}^3 \quad (V.6)$$

$$h_{v,p}^r = \sigma \varepsilon_p \varepsilon_v F_{v,p} (T_v^2 + T_p^2) (T_v + T_p) \approx 4 \sigma \varepsilon_p \varepsilon_v F_{v,p} T_{m_{v,p}}^3 \quad (V.7)$$

$$h_{c,p}^r = \sigma \varepsilon_p \varepsilon_c F_{c,p} (T_c^2 + T_p^2) (T_c + T_p) \approx 4 \sigma \varepsilon_p \varepsilon_c F_{c,p} T_{m_{c,p}}^3 \quad (V.8)$$

$h_{ch,p}^r$: coefficient de rayonnement de grande longueur d'onde entre l'agrotherm et la paroi(W/m²K) .

$h_{si,p}^r$: coefficient de rayonnement de grande longueur d'onde entre le sol intérieur et la paroi(W/m²K).

$h_{se,p}^r$: coefficient de rayonnement de grande longueur d'onde entre le sol extérieur et la paroi(W/m²K).

$h_{v,p}^r$: coefficient de rayonnement de grande longueur d'onde entre la végétation et la paroi (W/m^2K).

$h_{c,p}^r$: coefficient de rayonnement de grande longueur d'onde entre le ciel et la paroi (W/m^2K).

V.2/Bilan thermique de l'air extérieur :

$$\rho_{ae} V_{ae} C_{p,ae} \frac{dT_{ae}}{dt} = Q_{ae,p}^c + Q_{ae,p}^r + Q_{se,ae}^c \quad (V.9)$$

$Q_{ae,p}^c$: puissance convective entre l'air extérieur et la paroi (W).

$Q_{ae,p}^r$: puissance radiative entre l'air extérieur (le ciel) et la paroi (W).

$Q_{se,ae}^c$: puissance convective entre sol extérieur et l'air extérieur (W).

$$\rho_{ae} V_{ae} C_{p,ae} \frac{dT_{ae}}{dt} = h_{ae,p}^c S_p (T_p - T_{ae}) + h_{c,p}^r S_p (T_p - T_{ae}) + h_{se,ae}^c S_{se} (T_{se} - T_{ae}) \quad (V.10)$$

V.3/Bilan thermohydrigue de l'air intérieur :

V.3-1 /Bilan de chaleur sensible :

$$\rho_{ai} V_{ai} C_{p,ai} \frac{dT_{ai}}{dt} = Q_{ai,p}^c + Q_{ai,si}^c + Q_{ai,v}^c + Q_{ren} + Q_{ch,ai} \quad (V.11)$$

Le terme $\rho_{ai} V_{ai} C_{p,ai} \frac{dT_{ai}}{dt}$ représente de stockage de l'énergie par l'air intérieur dans l'intervalle de temps dt.

$Q_{ai,p}^c$: puissance convective entre l'air intérieur et la paroi (W).

$Q_{ai,si}^c$: puissance convective entre l'air intérieur et sol intérieur (W).

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

Q_{ren} : puissance de renouvellement de l'air sec (W).

$Q_{Ch,ai}^c$: puissance convective entre l'agrotherm et l'air intérieur (W).

$$\begin{aligned} \rho_{ai} V_{ai} C_{P,ai} \frac{dT_{ai}}{dt} = & h_{ai,p}^c S_p (T_p - T_{ai}) + h_{ai,si}^c S_{si} (T_{si} - T_{ai}) + h_{ai,v}^c S_v (T_v - T_{ai}) \\ & + \rho_{ai} R_a V_{ai} C_{P,ai} (T_{ae} - T_{ai}) + h_{Ch,ai}^c S_{Ch} (T_{Ch} - T_{ai}) \end{aligned} \quad (V.12)$$

V.3-2/ Bilan de chaleur latente :

$$\rho_{ai} V_{ai} L \frac{dW_{ai}}{dt} = Q_{ai,p}^i + Q_{ai,si}^i + Q_{Ren}^i + Q_{ETP} \quad (V.13)$$

L : chaleur latente de vaporisation (J/kg).

$Q_{ai,p}^i$: puissance de l'évaporation au niveau la paroi (W).

$Q_{ai,si}^i$: évaporation au niveau du sol intérieur (W).

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

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

$$\begin{aligned} \rho_{ai} V_{ai} L \frac{dW_{ai}}{dt} = & h_{ai,p}^i S_p (W(T_p) - W_{ai}) + h_{ai,si}^i S_{si} (W(T_{si}) - W_{ai}) \\ & + L \rho_{ai} R_a V_{ai} (W_{ai} - W_{ae}) + Q_{ETP} \end{aligned} \quad (V.14)$$

V.4/ Bilan d'énergie de la végétation :

$$\rho_v V_v C_{P,v} \frac{dT_v}{dt} = Q_{ai,v}^c + Q_{v,p}^r + Q_{si,v}^r + Q_{Ch,v}^c + Q_{ETP} + Q_{sv} \quad (V.15)$$

$Q_{v,p}^r$: puissance radiative entre la végétation et la paroi (W).

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

$Q_{Ch,v}^c$: puissance radiative entre l'agrotherm et la végétation (W).

Q_{SV} : puissance de rayonnement solaire absorbée par végétation(W).

$$\rho_v V_v C_{P_v} \frac{dT_v}{dt} = h_{ai,v}^r S_v (T_{ai} - T_v) + h_{si,v}^r S_v (T_{si} - T_v) + h_{v,p}^r S_v (T_p - T_v) + h_{ch,v}^r S_v (T_{ch} - T_v) + Q_{STP} + Q_{SV} \quad (V.16)$$

Expressions des coefficients d'échange radiatif :

$$h_{ch,v}^r = \sigma \epsilon_v \epsilon_{ch} F_{ch,v} (T_{ch}^2 + T_v^2) (T_{ch} + T_v) \approx 4 \sigma \epsilon_v \epsilon_{ch} F_{ch,v} T_{m_{ch,v}}^3 \quad (V.17)$$

$$h_{si,v}^r = \sigma \epsilon_v \epsilon_{si} F_{si,v} (T_{si}^2 + T_v^2) (T_{si} + T_v) \approx 4 \sigma \epsilon_v \epsilon_{si} F_{si,v} T_{m_{si,v}}^3 \quad (V.18)$$

$h_{ch,v}^r$: coefficient de rayonnement de grande longueur d'onde entre l'agrotherm et la végétation(W/m²K) .

$h_{si,v}^r$: coefficient de rayonnement de grande longueur d'onde entre le sol intérieur et la végétation(W/m²K) .

V.5/ Bilan d'énergie du sol intérieur :

$$\rho_{si} V_{si} C_{P_{si}} \frac{dT_{si}}{dt} = Q_{ai,si}^c + Q_{si,p}^r + Q_{si,v}^r + Q_{ch,si}^r + Q_{ai,si}^I + Q_{ssi} + Q_{si,se}^{Cond} + Q_{ch,si}^{Cond} \quad (V.19)$$

$Q_{si,p}^r$: puissance radiative entre le sol intérieur et la paroi(W).

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

$Q_{ch,si}^r$: puissance radiative de grande longueur d'onde entre l'agrotherm et le sol intérieur(W).

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

$Q_{ch,si}^{Cond}$:puissance conductive entre l'agrotherm et le sol intérieur(W).

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

$$\begin{aligned} \rho_{si} V_{si} C_{P_{si}} \frac{dT_{si}}{dt} = & h_{ai,si}^c S_{si} (T_{ai} - T_{si}) + h_{si,p}^r S_{si} (T_p - T_{si}) + h_{v,si}^r S_{si} (T_v - T_{si}) \\ & + h_{ch,si}^r S_{si} (T_{ch} - T_{si}) + h_{ai,si}^i S_{si} (W_{ai} - W(T_{si})) + Q_{ssi} \\ & - \frac{\pi \lambda_{si} L_s}{\ln(D_2/D_1)} (T_{se} - T_{si}) - \frac{\lambda_{si} S}{e_{si}} (T_{ch} - T_{si}) \end{aligned} \quad (V.20)$$

Expression du coefficient de rayonnement :

$$h_{ch,si}^r = \sigma \varepsilon_{si} \varepsilon_{ch} F_{ch,si} (T_{ch}^2 + T_{si}^2) (T_{ch} + T_{si}) \approx 4 \sigma \varepsilon_{si} \varepsilon_{ch} F_{ch,si} T_{m_{ch,si}}^3 \quad (V.21)$$

$h_{ch,si}^r$: coefficient de rayonnement de grande longueur d'onde entre l'agrotherm et le sol intérieur (W/m²K).

V.6/ Bilan d'énergie du sol extérieur :

$$\rho_{se} V_{se} C_{P_{se}} \frac{dT_{se}}{dt} = Q_{se,ae}^c + Q_{si,se}^{cond} + Q_{se,p}^r + Q_{sse} \quad (V.22)$$

$Q_{se,ae}^c$: puissance convective entre sol extérieur et l'air extérieur (W).

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

$$\begin{aligned} \rho_{se} V_{se} C_{P_{se}} \frac{dT_{se}}{dt} = & h_{se,ae}^c S_{se} (T_{ae} - T_{se}) + \frac{\pi \lambda_{si} L_s}{\ln(D_2/D_1)} (T_{si} - T_{se}) \\ & + h_{se,p}^r S_{se} (T_p - T_{se}) - Q_{sse} \end{aligned} \quad (V.23)$$

V.7/ Bilan d'énergie de l'agrotherm :

$$T_{ch} = \text{cte} \text{ donc } : \frac{dT_{ch}}{dt} = 0 \quad (V.24)$$

$$0 = Q_{ch,ai}^c + Q_{ch,si}^r + Q_{ch,si}^{cond} + Q_{ch,v}^r + Q_{ch,p}^r \quad (V.25)$$

$$\begin{aligned} 0 = & h_{ch,ai}^c S_{ch} (T_{ai} - T_{ch}) + h_{ch,si}^r S_{ch} (T_{si} - T_{ch}) + \frac{\lambda_{si} S}{e_{si}} (T_{si} - T_{ch}) \\ & + h_{ch,v}^r S_{ch} (T_v - T_{ch}) + h_{ch,p}^r S_{ch} (T_p - T_{ch}) \end{aligned} \quad (V.26)$$

Chapitre VI

Chapitre VI

La modélisation thermique

VI.1/ Définition de la modélisation :

La modélisation est une méthode d'analyse générale ; il s'agit de construire un modèle d'un système « S », c'est à dire construire un système « S_1 » qui du point de vue conception puisse être considéré comme équivalent du système « S ».

Ce modèle peut être physique ou abstrait.

- a) Un modèle physique peut être un modèle réduit (hydraulique, aéronautique), un modèle électrique (analogie : thermique, électricité).
- b) Un modèle abstrait, peut être un énoncé de lois qui régissent le fonctionnement (en mathématiques), un système d'équations (en mécanique).

VI.1.1/ Les étapes de la modélisation :

VI.1.1.1/ Définir l'objectif :

Il est essentiel de bien définir au départ le but à atteindre car il est peu facile de remanier un modèle par la suite, aussi faut-il cerner rapidement le type de résultat dont on aura besoin .

VI.1.1.2/ Formulation mathématique :

Le problème étant bien délimité, on décrit le système par série d'équations faisant appel à des lois physiques, chimiques. Pour limiter le nombre d'équations, on est amené à faire des hypothèses qui en contrepartie limiteront les possibilités d'exploitation des modèles.

VI.1.1.3/ Résolution :

Les équations obtenues sont souvent nombreuses , quelquefois non linéaires ,leur résolution nécessite alors le recours à l'ordinateur pour traiter rapidement l'ensemble des données .

VI.1.1.4/ Calage :

En confrontant les résultats obtenus par le modèle à ceux obtenus par des mesures on observe fréquemment des divergences. On procède alors à un ajustement des paramètres que l'on sait discutables jusqu'à obtenir une bonne concordance entre les valeurs mesurées et celles calculées.

La nécessité du calage provient :

- soit d'une mauvaise description mathématique des phénomènes .
- soit d'une mauvaise évaluation de certains paramètres parce que nos connaissances physique ne répondent pas toujours aux problèmes rencontrés où certains coefficients sont difficiles à évaluer par la mesure.

VI.1.1.5/ Validation :

Pour « certifier » le modèle ,il est nécessaire de confronter ces résultats avec des mesures effectuées dans les conditions différentes de celles du calage. si la concordance est bonne, le modèle est utilisable, si non il faut :

- soit effectuer un nouveau calage parce que l'arrangement des variables calées ne correspond pas à des valeurs physiques.
- soit modifier les équations parce qu'elles décrivent mal le processus physique .

VI.1.1.6/ Exploitation :

C'est l'opération « rentable » de toute cette démarche parfois longue et compliquée mais qui permet une bonne connaissance des phénomènes.

On peut alors étudier –sans avoir fait l'essai- l'influence des divers composants du système (étude paramétrique) ou la réaction du système à des sollicitations extérieures (étude de la dynamique du système) .etc.....les possibilités d'utilisation sont nombreuses et seulement limitées par les hypothèses énoncées lors de la construction du modèle [14].

VI.2/ La modélisation thermique :

Un modèle et en particulier un modèle thermique constitue une représentation d'un système physique, où sont impliqués des échanges calorifiques .

Cette représentation peut se conduire soit par un modèle mathématique, traduit par un groupe d'équations qui structure les relations entre les variables du système, soit par

un modèle analogique, résultant précisément d'une analogie formelle entre différents systèmes : il est ainsi classique d'établir un modèle par analogie électrique de certains systèmes thermiques[25].

Dans la serre, le principe de base de la modélisation est l'étude physique qui couvre l'ensemble des processus physiques mis en jeu dans son fonctionnement, elle est donc préalable à l'élaboration du modèle mathématique.

A partir de ces études, on établit les bilans énergétiques et bilans de masse, ils s'écrivent, sous la forme plus générale :

$$\text{Energie(ou masse)reçue-énergie(ou masse)perdue+ variation d'énergie (ou masse)interne}=0$$

VI.3/ Les expressions des conductances :

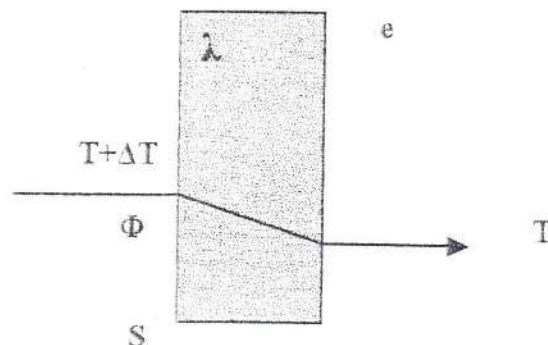
VI.3.1/ Conductance conductive :

Pour une plaque matérielle homogène d'une épaisseur (e), de surface (S), et de conductivité thermique (λ), soumise à un écart de température (ΔT) entre ses deux plans limites (figure (IV.1)), le flux (Φ), (ou puissance thermique en watts) traversant le matériau est déterminé par la loi de Fourier :

$$\phi = \lambda \frac{S}{e} \Delta T = \frac{\Delta T}{R_{cd}} = G_{cd} \Delta T \quad (\text{VI.1})$$

$$R_{cd} = \frac{e}{\lambda S} \text{ est la résistance thermique conductive (K/W).} \quad (\text{VI.2})$$

$$G_{cd} = \frac{\lambda S}{e} = \frac{1}{R_{cd}} \text{ est la conductance thermique conductive (W/K).} \quad (\text{VI.3})$$



Figure(VI.1) : Conduction thermique.

VI.3.2/ Conductance convective :

L'échange thermique par convection forcée Φ (en watts) qui traverse une surface S entre deux points de températures T_1 et T_2 est donné par la relation :

$$\Phi = h S (T_1 - T_2) = G_{cv} \Delta T = \frac{\Delta T}{R_{cv}} \quad (\text{VI.4})$$

$$R_{cv} = \frac{1}{hS} \text{ résistance thermique convective (K/W)} \quad (\text{VI.5})$$

$$G_{cv} = hS \text{ conductance thermique convective (W/K).} \quad (\text{VI.6})$$

VI.3.3/ Conductance radiative :

Dans l'échange thermique par rayonnement le flux Φ (en watts) échangé par deux corps (figure VI.2) est :

$$\phi = \sigma S \varepsilon_1 (T_2^4 - T_1^4) = G_r \Delta T \quad (\text{VI.7})$$

$$(T_2^4 - T_1^4) = (T_2^2 - T_1^2)(T_2^2 + T_1^2) = (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)(T_2 - T_1) \quad (\text{VI.8})$$

$$G_r = \varepsilon_1 \sigma S (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2) \quad (\text{VI.9})$$

G_r : conductance thermique radiative (W/K).

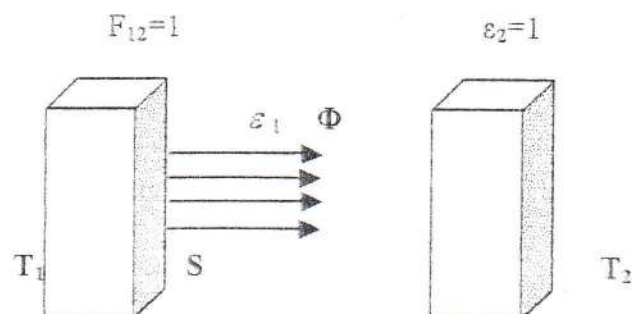
Remarque :

Si $(T_1 - T_2) \ll T_1$ et T_2

$$T_m = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

$$T_1 \approx T_2 \approx T_m$$

$$G_r = 4\varepsilon_1 \sigma S T_m^3 \quad (\text{VI.10})$$



Figure(VI.2) : Rayonnement thermique.

VI.3.4/Conductance fluide:

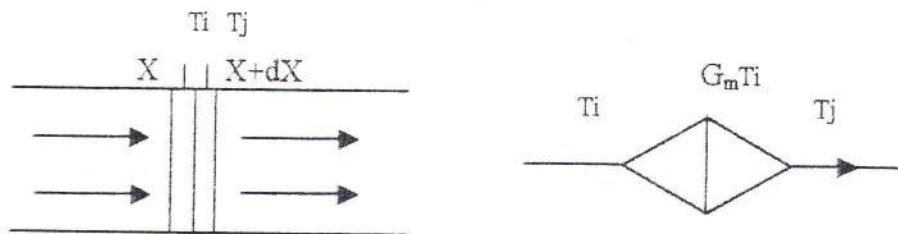
Considérons un fluide en circulation dans un guide supposé sans pertes latérales, lorsqu'une masse (dm) de fluide à la température T_i se déplace de la position (x) à la ($x+dx$) pendant un intervalle de temps (dt) elle y communique une variation d'enthalpie:

$$dH_i = dm C_p T_i \quad (VI.11)$$

La puissance transportée à la région d'abscisse $x+dx$ s'écrit donc:

$$\phi = \frac{dH_i}{dt} = \frac{dm}{dt} C_p T_i = m C_p T_i = G_m T_i \quad (VI.12)$$

La quantité $G_m = m C_p$ (en W/K) qui est égale au produit du débit massique de fluide par sa chaleur massique à pression constante définit la conductance fluide [2].



Figure(VI.3): Transfert de chaleur par circulation fluide.

IV.4/ L'analyse nodale:

L'analyse nodale d'un système thermique s'effectue en représentant tout sous-ensemble isotherme au moyen de nœuds pondérés par la température.

Les échanges de flux entre les nœuds des systèmes discrets s'effectuent à travers des composants représentés par des symboles qualifiés de thermique résistances, capacité, sources indépendantes ou liées, linéaires ou non linéaires [2].

VI.5/ Les bases de l'analogie thermique/électrique :**VI.5.1/ Loi d'Ohm :**

La loi d'Ohm est définie par la relation suivante :

$$I = \frac{\Delta V}{R} = G \Delta V \quad (VI.13)$$

I: intensité du courant électrique entre deux points (ampères).

ΔV : différence de potentiel entre ses deux points (volts).

G : conductance électrique (A/V) [25].

VI.5.2/ Loi de Kirchhoff :

En un nœud il n'y a pas d'accumulation, c'est ce que traduit la première loi de Kirchhoff : « La somme algébrique des flux traversant un nœud est nulle ».

$$\sum Q_i = 0 \quad [2] \quad (VI.14)$$

VI.5.3/ Les équations de bilans :

Elles traduisent en fait la conservation de l'énergie au sein de l'élément de volume attaché à un nœud donné, égalant pour cela l'apport énergétique par les différents modes d'échanges et la variation d'énergie interne du volume considéré.

A titre d'exemple l'équation nodale traduisant la conservation de l'énergie du nœud i, supposé impliquée dans des échanges conductifs et convectifs, et soumise de plus à une source $Q_i(t)$ s'écrit :

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_j G_{cd\,ij} (T_j - T_i) + \sum_k G_{cv\,ik} (T_k - T_i) + Q_i(t) \quad (VI.15)$$

Dans le cadre de l'analogie résumée par le tableau (VI.1) entre grandeurs électriques et thermiques.

L'équation de bilan thermique (VI.15) laquelle se transforme en (VI.17), donnera l'équation de conservation du courant électrique au nœud i correspondant, la source thermique Q_i étant remplacée ici par le générateur de courant J_i .

$$C_i \dot{T}_i = \sum_j G_{cd\,ij} (T_j - T_i) + \sum_k G_{cv\,ik} (T_k - T_i) + Q_i \quad [25] \quad (VI.16)$$

$$C_i \dot{U}_i = \sum_j G_{cd\,ij} (U_j - U_i) + \sum_k G_{cv\,ik} (U_k - U_i) + J_i \quad [25] \quad (VI.17)$$

Grandeurs thermiques		Grandeurs électriques	
Flux	$\dot{Q}$ (W)	Courant électrique	I (A)
Température	T (K)	Potentiel	V (V)
Résistance	R (K/W)	Résistance	R (V/A)
Capacité	C (J/K)	Capacité	C (F)
Flux imposé		Génération de courant	
Température imposée		Génération de tension	

Tableau(VI.1) : Grandeurs électriques analogues aux grandeurs thermiques[25].

➤ Ce parallélisme conduit à envisager l'utilisation d'un circuit électrique comme modèle d'un système thermique :

➤ Lorsque le transfert de chaleur s'effectue par convection, par conduction et par rayonnement simultanément, le circuit électrique comportera des résistances électriques en parallèles, donc des conductances électriques en série.

➤ Lorsque le transfert de chaleur s'effectue suivant plusieurs mode de transfert de chaleur successifs, le circuit électrique comportera des résistances électriques en séries, donc des conductances électriques en parallèle.

➤ Le stockage de l'énergie ou inertie thermique sera représenté par une capacité électrique.

D'après la loi de Kirchhoff :

-Les résistances en parallèle :

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots \quad (VI.18)$$

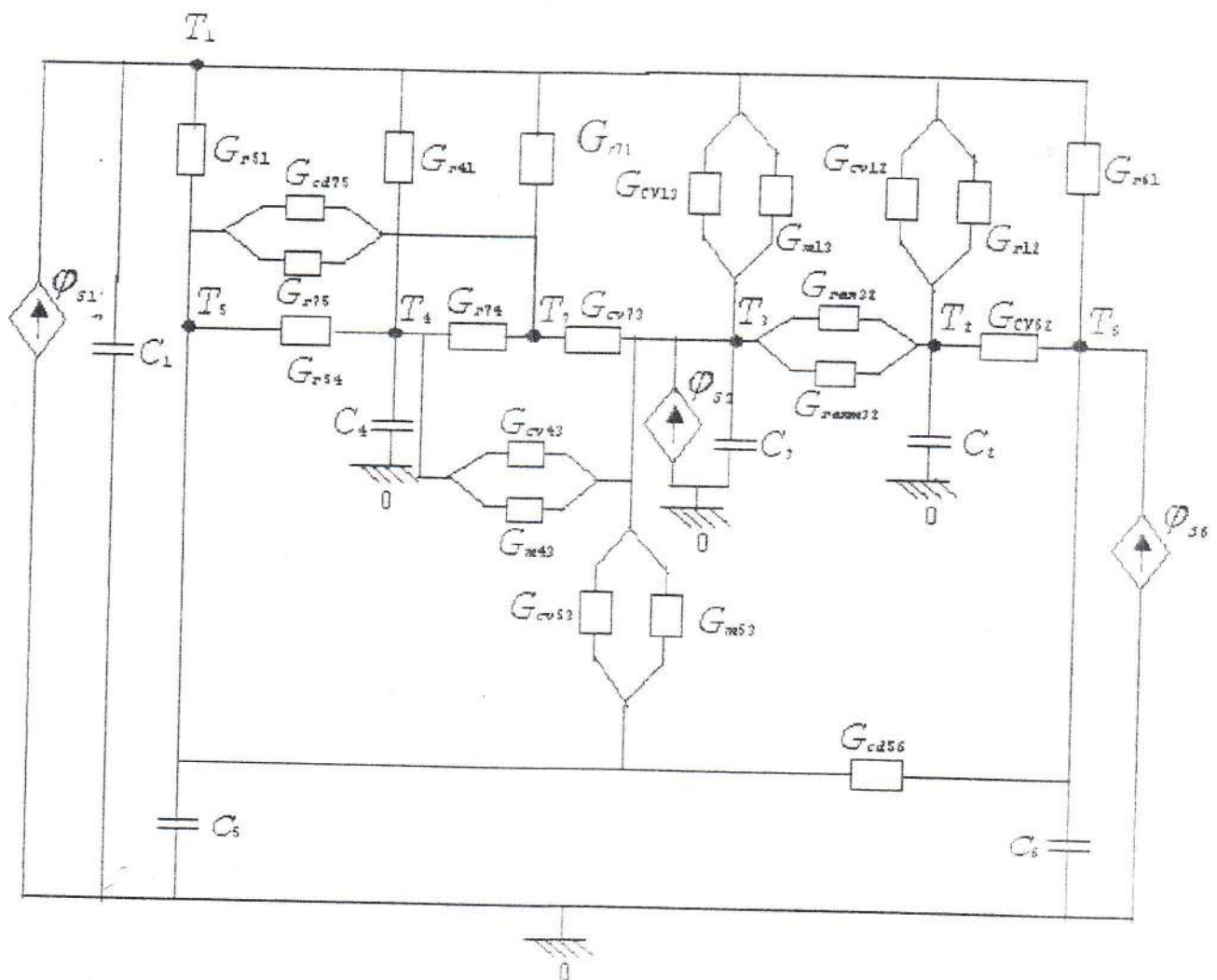
$$G_{eq} = G_1 + G_2 + \dots \quad (VI.19)$$

-Les résistances en série :

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots \quad (VI.20)$$

$$\frac{1}{G_{eq}} = \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} + \dots \quad (VI.21)$$

VI.6/ Dessin du schéma électrique équivalent de la serre chauffée
à l'eau géothermale :



Figure(VI.4) : Schéma électrique équivalent de la serre.

légende:

- 1 : Paroi plastique.
- 2 : Air extérieur.
- 3 : Air intérieur.
- 4 : Végétation.
- 5 : Sol intérieur.
- 6 : Sol extérieur.
- 7 : Agrotherm.

T : Température (K).

C : Capacité thermique à pression constante (J/K).

G_r : Conductance radiative (W/K).

G_{cv} : Conductance convective (W/K).

G_{cd} : Conductance conductive (W/K).

G_{ren} : Conductance de l'échange renouvellement de l'air sec (W/K).

G_{renm} : Conductance de l'échange renouvellement de l'air humide (W/K).

G_m : conductance massique (W/K).

ϕ_s : source du courant (W).

VI.7/ Simplification du schéma électrique :

Pour simplifier le schéma électrique, on pose :

$$1/ G_{rs1} = G_{r71} = 0 \quad (\text{VI.22})$$

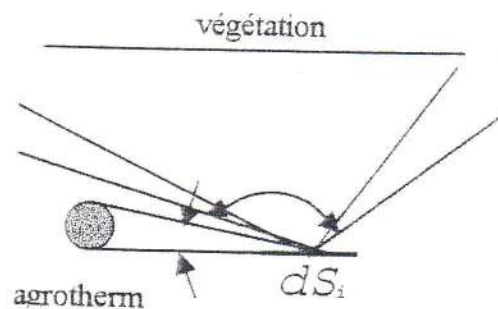
parce que : $F_{p,si} = F_{p,ch} = 0$, si l'on considère que la végétation constitue un écran entre le sol et la paroi ; donc tout le rayonnement émis par la paroi atterrit sur la végétation ($F_{p,v} = 1$).

$$2/ G_{r75} = 0 \quad (\text{VI.23})$$

parce que : $F_{si,ch} \approx 0$

$F_{si,ch} + F_{si,v} = 1$; donc : $F_{si,v} \approx 1$ car :

$\left\{ \begin{array}{l} S_v \gg S_{ch} \\ \text{L'angle sous lequel la surface de la} \\ \text{végétation est vue à partir d'un élément} \\ dS_i \text{ est beaucoup plus large que celui} \\ \text{sous lequel est vue la surface de l'agrotherm.} \end{array} \right.$



3/ Température de l'air extérieur (T_2) est constante parce que c'est une température d'entrée du système.

4/ conformément aux lois d'association des conductances :

$$G_{r12} + G_{cv12} = G_{12} \quad (\text{VI.24})$$

$$G_{cv13} + G_{m13} = G_{13} \quad (\text{VI.25})$$

$$G_{Ren32} + G_{Rem32} = G_{32} \quad (\text{VI.26})$$

$$G_{cv53} + G_{m53} = G_{53} \quad (\text{VI.27})$$

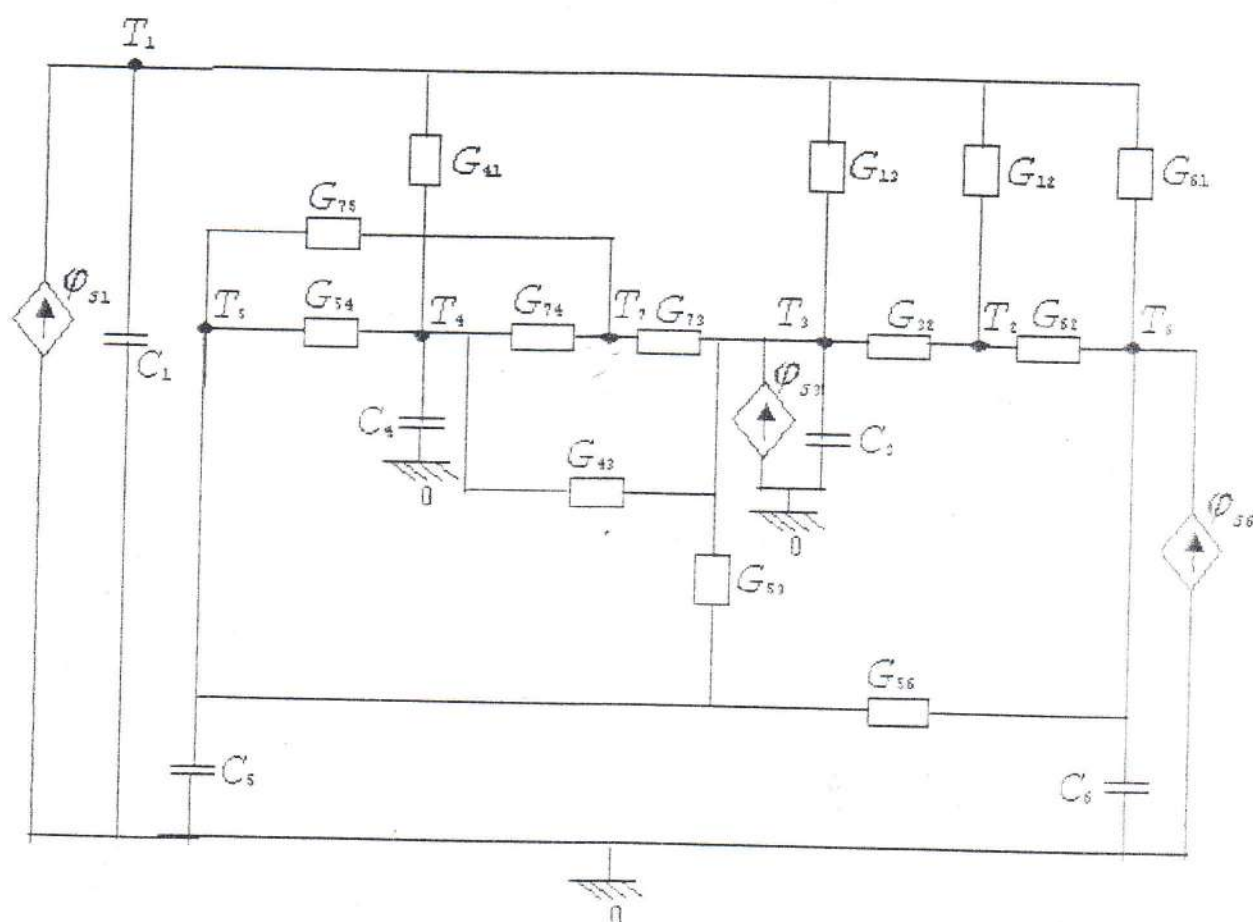
$$G_{cv43} + G_{m43} = G_{43} \quad (\text{VI.28})$$

On pose : $G_{41} = G_{r41}$, $G_{61} = G_{r61}$.

$$G_{73} = G_{cv73}, G_{75} = G_{cd75}$$

$$G_{62} = G_{cv62}, G_{74} = G_{r74}$$

$$G_{54} = G_{r54}, G_{56} = G_{cd56}$$



Figure(VI.5) : Schéma électrique simplifié de la serre.

VI.8/ Les équations de bilan du système:

L'écriture de la conservation des courants (comptés positivement entrants au nœud i) aux différents nœuds conduit à la mise en place du système d'équations suivantes :

$$C_1^s T_1 - G_{12}(T_2 - T_1) - G_{13}(T_3 - T_1) - G_{41}(T_4 - T_1) - G_{61}(T_6 - T_1) = \varphi_{s1} \quad (\text{VI.29})$$

$$0 - G_{12}(T_1 - T_2) - G_{32}(T_3 - T_2) - G_{62}(T_6 - T_2) = 0 \quad (\text{VI.30})$$

$$C_3^s T_3 - G_{13}(T_1 - T_3) - G_{32}(T_2 - T_3) - G_{43}(T_4 - T_3) - G_{53}(T_5 - T_3) - G_{73}(T_7 - T_3) = \varphi_{s3} \quad (\text{VI.31})$$

$$C_4^s T_4 - G_{41}(T_1 - T_4) - G_{43}(T_3 - T_4) - G_{54}(T_5 - T_4) - G_{74}(T_7 - T_4) = 0 \quad (\text{VI.32})$$

$$C_5^s T_5 - G_{53}(T_3 - T_5) - G_{54}(T_4 - T_5) - G_{56}(T_6 - T_5) - G_{75}(T_7 - T_5) = 0 \quad (\text{VI.33})$$

$$C_6^s T_6 - G_{61}(T_1 - T_6) - G_{62}(T_2 - T_6) - G_{56}(T_5 - T_6) = \varphi_{s6} \quad (\text{VI.34})$$

$$0 - G_{73}(T_3 - T_7) - G_{74}(T_4 - T_7) - G_{75}(T_5 - T_7) = 0 \quad (\text{VI.35})$$

Système où la notation s figure la dérivée temporelle.

Système d'équations différentielles linéaires du 1^{er} ordre à coefficients constants.

Le système précédent peut en fait s'écrire sous la forme matricielle :

$$G \cdot T = \varphi_s \quad (\text{VI.36})$$

expression où l'on note :

$$T = \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ T_7 \end{pmatrix} \quad \text{le vecteur des températures, } \varphi_s = \begin{pmatrix} \varphi_{s1} \\ 0 \\ \varphi_{s3} \\ 0 \\ 0 \\ \varphi_{s6} \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{celui des flux appliqués.}$$

Quant à la matrice :

$$\begin{pmatrix} G_1 & G_2 & G_3 & G_4 & 0 & G_5 & 0 \\ G_2 & G_6 & G_7 & 0 & 0 & G_8 & 0 \\ G_3 & G_7 & G_9 & G_{10} & G_{11} & 0 & G_{14} \\ G_4 & 0 & G_{10} & G_{15} & G_{16} & 0 & G_{17} \\ 0 & 0 & G_{11} & G_{16} & G_{18} & G_{19} & G_{20} \\ G_5 & G_8 & 0 & 0 & G_{19} & G_{21} & 0 \\ 0 & 0 & G_{14} & G_{17} & G_{20} & 0 & G_{22} \end{pmatrix}$$

On pose : $G_1 = C_1 s + G_{12} + G_{13} + G_{41} + G_{61}$, $G_2 = -G_{12}$, $G_3 = -G_{13}$

$$G_4 = -G_{41}, G_5 = -G_{61}, G_6 = G_{12} + G_{32} + G_{62}, G_7 = -G_{32}$$

$$G_8 = -G_{62}, G_9 = C_3 s + G_{13} + G_{43} + G_{53} + G_{73} + G_{22}, G_{10} = -G_{43}$$

$$G_{11} = -G_{53}, G_{14} = -G_{73}, G_{15} = C_4 s + G_{41} + G_{43} + G_{54} + G_{74}, G_{16} = -G_{54}$$

$$G_{17} = -G_{74}, G_{18} = C_5 s + G_{53} + G_{54} + G_{56} + G_{75}, G_{19} = -G_{56}$$

$$G_{20} = -G_{75}, G_{21} = C_6 s + G_{61} + G_{56} + G_{62} \text{ et } G_{22} = G_{73} + G_{74} + G_{75}$$

Chapitre VII

Chapitre VII

Calcul des différents composants du circuit électrique

Avant de lancer la simulation à l'aide du logiciel, il est indispensable de calculer les différents composants du circuit électrique.

Pour cela, on doit connaître les paramètres nécessaires pour chaque composant de la serre.

VII.1/ Calcul des résistances :

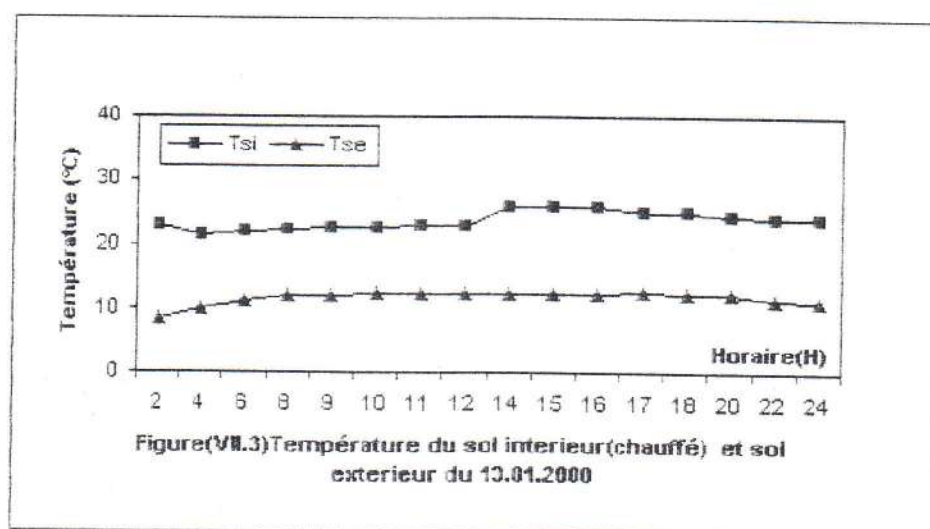
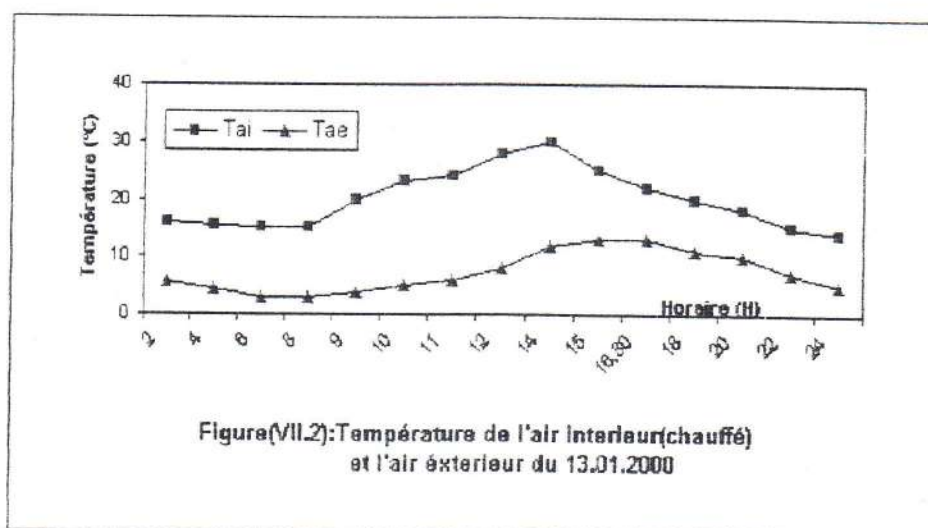
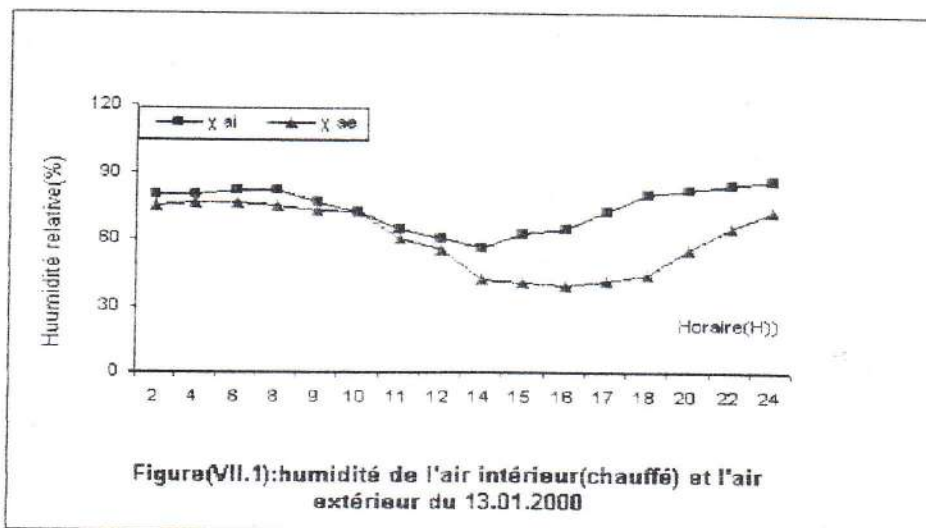
Pour calculer les résistances il est indispensable de connaître les températures moyennes, l'humidité moyenne de l'air et le rayonnement solaire.

VII.1.1/ Grandeurs moyennes :

Dans la référence[1] on trouve les résultats mesurés durant la journée du 13.01.2000 :

13.01.2000																
Temps(h)	2	4	6	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	20	22	24
χ_{ai} (%)	80	80	82	82	76	72	64	60	56	62	64	72	80	82	84	86
χ_{ae} (%)	75	76	76,5	75	73	72	60	55	42	40	39	41	44	55	65	72
13.01.2000																
Temps(h)	2	4	6	8	9	10	11	12	14	15	16,30	18	20	22	24	
T_{ai} (°C)	16	16	15	15	20	23	24	28	30	25	22	20	18	15	14	
T_{ae} (°C)	5,5	4,5	3	3	4	5	6	8	12	13	13	11	10	7	5	
13.01.2000																
Temps(h)	2	4	6	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	20	22	24
T_{si} (°C)	23	22	22	22	23	23	23	23	26	26	26	25	25	25	24	24
T_{se} (°C)	8,5	10	11	12	12	12	12	12	12	12	12	13	12	12	12	11

Tableau(VII.1): Résultats mesurés du 13.01.2000 [1] .



Données recueillies du mémoire de Magister de M.Y.Babi[1].

Nous donnés, ci-dessous, la valeur moyenne temporelle correspondant à chaque graphe :

- » Humidité relative moyenne de l'air intérieur (chauffé) du 13.01.2000 :

$$\overline{\chi}_{i2} = 73,8\% = 0,73 \quad (\text{VII.1})$$

- » Humidité relative moyenne de l'air extérieur du 13.01.2000 :

$$\overline{\chi}_{ae} = 60\% = 0,6 \quad (\text{VII.2})$$

- » Température moyenne de l'air intérieur (chauffé) du 13.01.2000 :

$$\overline{T}_{ai} = 20^\circ\text{C} = 293\text{K} \quad (\text{VII.3})$$

- » Température moyenne de l'air extérieur du 13.01.2000 :

$$\overline{T}_{ae} = 7,3^\circ\text{C} = 280,3\text{K} \quad (\text{VII.4})$$

- » Température moyenne du sol intérieur (chauffé) du 13.01.2000 :

$$\overline{T}_{si} = 23,8^\circ\text{C} = 296,8\text{K} \quad (\text{VII.5})$$

- » Température moyenne du sol extérieur du 13.01.2000 :

$$\overline{T}_{se} = 11,6^\circ\text{C} = 284,6\text{K} \quad (\text{VII.6})$$

- » Température moyenne de l'agrotherm :

$$T_{ch} = \frac{T_{se} + T_{es}}{2} = 319\text{K} \quad (\text{VII.7})$$

- » Température moyenne de la paroi :

$$\overline{T}_p = 25^\circ\text{C} = 298\text{K} \quad (\text{VII.8})$$

Cette valeur a été tirée du mémoire de Magister de M.Hadjaj[16].

- » Température moyenne de la végétation :

$$\overline{T}_v = \overline{T}_{ai} + 2 \text{ d'après [14]} \quad (\text{VII.9})$$

$$\overline{T}_v = 22^\circ\text{C} = 295\text{K} \quad (\text{VII.10})$$

VII.1.1.1/ R₁₂:

Couplage paroi – air extérieur :

$$R_{12} = \frac{1}{G_{12}} \quad (\text{VII.11})$$

$$G_{12} = G_{r12} + G_{cv12} \quad (\text{VII.12})$$

$$\triangleright G_{r12} = h_{p,c}^r S_p \quad (\text{VII.13})$$

$$G_{r12} = \sigma \varepsilon_c \varepsilon_p F_{p,c}^4 \cdot \left(\frac{\overline{T}_p + T_c}{2} \right)^3 \cdot S_p \quad (\text{VII.14})$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$$

$$T_c = \overline{T}_{ae} = 280,3 \text{ K}$$

L'émissivité du ciel est donné par l'équation (III.11), (page 21):

$$\varepsilon_c = 0,75.$$

$$\varepsilon_p = 0,9 [29].$$

Nous rappelons la formule de facteur de forme entre la paroi et le ciel $F_{p,c}$ qui est donné par l'équation (III.24), (page 23) :

$$L_s = 47,5 \text{ m} ; H = 3,3 \text{ m} ; S_p = 490 \text{ m}^2$$

$$F_{p,c} = 0,66 \quad (\text{VII.15})$$

$$G_{r12} = 1196,8 \text{ W/K} \quad (\text{VII.16})$$

$$\triangleright G_{cv12} = h_{p,ae}^c S_p \quad (\text{VII.17})$$

Nous rappelons que les expressions nécessaires pour calculer le coefficient d'échange convectif entre la paroi et l'air extérieur $h_{p,ae}^c$ sont donnés par les équations (III.45), (III.46) et (III.47), (page 26) :

- Les propriétés physiques de l'air sec à $\overline{T}_{ae} = 280,3 \text{ K}$ sont calculées à partir des équations (III.49), (III.52), (page 26, 27) : $\nu_{ae} = 1,32 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $\lambda_{ae} = 0,024 \text{ W/m.K}$

$$V = 7,2 \text{ Km/h} = 2 \text{ m/s}$$

$$\text{donc: } Re = 71,97 \cdot 10^5$$

$$Nu = 10446,21$$

$$h_{p,ae}^c = 5,27 \text{ W/m}^2 \text{K}. \quad (\text{VII.18})$$

$$G_{cv12} = 2582,3 \text{ W/K} \quad (\text{VII.19})$$

$$G_{12} = 3779,1 \text{ W/K} \quad (\text{VII.20})$$

$$R_{12} = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ K/W} \quad (\text{VII.21})$$

VII.1.1.2/ R_{13} :

Couplage paroi – air intérieur :

$$R_{13} = \frac{1}{G_{13}} \quad (\text{VII.22})$$

$$G_{13} = G_{cv13} + G_{ml3} \quad (\text{VII.23})$$

$$\triangleright G_{cv13} = h_{p,ai}^c S_c \quad (\text{VII.24})$$

Nous rappelons les expressions nécessaire pour calculer le coefficient d'échange convectif entre la paroi et l'air intérieur $h_{p,ai}^c$ sont donnés par les équations (III.56),(III.57),(page27) :

$$Re = \frac{UH}{U_{ai}} \quad (\text{VII.25})$$

U : vitesse de circulation de l'air intérieur (ventilation)(m/s).

$$Pr = \frac{\mu_{ai} C_{p,ai}}{\lambda_{ai}} \quad (\text{VII.26})$$

-Les propriétés physiques de l'air sec à $\overline{T}_{ai}$ 293K sont calculées à partir les équations(III.48),(III.49),(III.50),(III.51),(III.52),(page26,27)dans le tableau suivant :

ρ_{ai} (kg/m ³)	U_{ai} (m ² /s)	μ_{ai} (Pa.s)	$C_{p,ai}$ (J/kg.K)	λ_{ai} (W/m.K)
1,2	$1,46 \cdot 10^{-5}$	$1,81 \cdot 10^{-5}$	1006	0,025

Tableau(VII.2) : Propriétés physiques de l'air sec à $\overline{T}_{ai}$ 293K.

$U = 2\text{m/s}$

donc: $Re = 4,52 \cdot 10^5 > 4000$ (l'écoulement turbulent)

$$Pr = 0,72$$

$$Nu = 689,85.$$

$$h_{p,ai}^c = 5,22 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (\text{VII.27})$$

$$G_{cv13} = 2557,8 \text{ W/K} \quad (\text{VII.28})$$

➤ Pour calculer G_{m13} , on utilise la relation suivante :

$$Q_{ai,p}^i = h_{ai,p}^i S_p (W_{ai} - W(\bar{T}_p)) = G_{m13} (\bar{T}_{ai} - \bar{T}_p) \quad (\text{VII.29})$$

$$G_{m13} = \frac{h_{ai,p}^i S_p (W_{ai} - W(\bar{T}_p))}{(\bar{T}_{ai} - \bar{T}_p)} \quad (\text{VII.30})$$

$h_{p,ai}^i$ est donnée par l'équation(III.77),(page32)

$L = 2466,2 \text{ J/kg}$ (voir les équations(III.79),(page32))

$$h_{p,ai}^i = 12,79 \text{ W/m}^2 \quad (\text{VI.31})$$

A l'aide d'une interpolation polynomiale, on obtient l'expression de χ_{ai} (humidité relative de l'air intérieur(chauffé) du 13.01.2000) sous la forme suivante :

$$\chi_{ai} = \chi_{ai}(T_{ai})$$

$$\chi_{ai} (\%) = 107,90253 - 1,55088 T - 0,00863 T^2, T(^{\circ}\text{C}) \quad (\text{VII.32})$$

pour calculer les humidités absolues de l'air intérieur et de l'air intérieur à la température de paroi , on utilise les équations(III.82),(III.83)et(III.84),(page33) :

$$\bar{T}_{ai} = 20^{\circ}\text{C}$$

$$\text{donc : } P_{S_{ai}} = 2911,6 \text{ Pa}$$

$$\bar{\chi}_{ai} = 73,8\% = 0,73$$

$$P_{V_{ai}} = 2125,46 \text{ Pa}$$

$$W_{ai} = 1.35\% = 0,0135 \quad (\text{VII.33})$$

$$\bar{T}_p = 25^{\circ}\text{C}$$

$$\text{donc : } P_s(\bar{T}_p) = 3175,45 \text{ Pa}$$

$$\chi_{ai}(\bar{T}_p) = 63.73\% = 0,63$$

$$P_v(\bar{T}_p) = 2000,53 \text{ Pa}$$

$$W(\bar{T}_p) = 1,27\% = 0,0127 \quad (\text{VII.34})$$

$$G_{m13} = 1 \text{ W/K} \quad (\text{VII.35})$$

$$G_{13} = 2558,8 \text{ W/K} \quad (\text{VII.36})$$

$$R_{13} = 3,9 \cdot 10^{-4} \text{ K/W} \quad (\text{VII.37})$$

VII.1.1.3/ R_{32} :

Couplage air intérieur – air extérieur :

$$R_{32} = \frac{1}{G_{32}} \quad (\text{VII.38})$$

$$G_{32} = G_{\text{Ren}32} + G_{\text{Renm}32} \quad (\text{VII.39})$$

$$> G_{\text{Ren}32} = \rho_{a1} R_a V_{a1} C_{P_{a1}} \quad (\text{VII.40})$$

$$\rho_{a1} = 1,2 \text{ kg/m}^3, C_{P_{a1}} = 1006 \text{ J/kg.K (voir le tableau (VII.2)).}$$

pour calculer le taux de renouvellement de l'air R_a , on utilise la formule (III.67) :

$$R_a = 1,7 \text{ h}^{-1} = 4,72 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

$$V_{a1} = V_s = 1093 \text{ m}^3$$

$$G_{\text{Ren}32} = 622,7 \text{ W/K} \quad (\text{VII.41})$$

> Pour calculer $G_{\text{Renm}32}$, on utilise la relation suivante :

$$Q_{\text{Ren}}^1 = \rho_{a1} L R_a V_{a1} (W_{ae} - W_{a1}) = G_{\text{Renm}32} (\overline{T}_{ae} - \overline{T}_{a1}) \quad (\text{VII.42})$$

$$G_{\text{Renm}32} = \frac{\rho_{a1} L R_a V_{a1} (W_{ae} - W_{a1})}{(\overline{T}_{ae} - \overline{T}_{a1})} \quad (\text{VII.43})$$

$$W_{a1} = 1,35\% = 0,0135$$

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

Pour calculer l'humidité absolue de l'air extérieur, on utilise les équations (III.82), (III.83) et (III.84), (page 33) :

$$\overline{\chi}_{ae} = 60\% = 0,6$$

$$\overline{T}_{ae} = 7,3^\circ \text{C}$$

$$\text{donc: } P_{S_{ae}} = 4660,16 \text{ Pa.}$$

$$P_{V_{ae}} = 2796,1 \text{ Pa}$$

$$W_{ae} 1,78\% = 0,0178 \quad (\text{VII.44})$$

$$G_{ren32} = 0,51 \text{ W/K} \quad (\text{VII.45})$$

$$G_{12} = 623,5 \text{ W/K} \quad (\text{VII.46})$$

$$R_{32} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ K/W} \quad (\text{VII.47})$$

VII.1.1.4/ R_{41} :

Couplage végétation – paroi :

$$R_{41} = \frac{1}{G_{41}} \quad (\text{VII.48})$$

$$G_{41} = G_{r41} \quad (\text{VII.49})$$

$$> G_{r41} = h_{v,p}^x S_v \quad (\text{VII.50})$$

$$G_{r41} = \sigma \varepsilon_v \varepsilon_p F_{v,p}^4 \cdot \left(\frac{\overline{T}_v + \overline{T}_p}{2} \right)^3 \cdot S_v \quad (\text{VII.51})$$

pour calculer G_{r41} est indispensable connaître surface de végétation; par l'estimation on trouve :

1 plant de tomate pour 1500 cm^2 de surface du sol.

1800 cm^2 de végétation pour 1500 cm^2 de surface du sol.

$$\text{Le rapport de } \frac{S_{si}}{S_v} = \frac{1500}{1800} = 0,8 \quad (\text{VII.52})$$

$$S_v = 0,8 \cdot S_{si} = 505 \text{ m}^2 \quad (\text{VII.53})$$

$$\varepsilon_v = 0,8, \varepsilon_p = 0,9 [29]$$

$$F_{p,v} = 1 ; \text{ donc : } F_{v,p} = 0,97.$$

$$G_{41} = 2085 \text{ W/K} \quad (\text{VII.54})$$

$$R_{41} = 0,47 \cdot 10^{-3} \text{ K/W} \quad (\text{VII.55})$$

VII.1.5/ R_{61} :

Couplage sol extérieur – paroi :

$$R_{61} = \frac{1}{G_{61}} \quad (\text{VII.56})$$

$$G_{61} = G_{r61} \quad (\text{VII.57})$$

$$\rightarrow G_{r61} = h_{se,p}^r S_{se} \quad (\text{VII.58})$$

$$G_{r61} = \sigma \varepsilon_{se} \varepsilon_p F_{se,p}^4 \cdot \left(\frac{\overline{T}_{se} + \overline{T}_p}{2} \right)^3 \cdot S_{se} \quad (\text{VII.59})$$

On utilise l'équation (III.27), (page 23) pour calculer G_{r61} :

$$G_{r61} = \sigma \varepsilon_{se} \varepsilon_p F_{p,se}^4 \cdot \left(\frac{\overline{T}_{se} + \overline{T}_p}{2} \right)^3 \cdot S_p \quad (\text{VII.60})$$

Le facteur de forme $F_{p,se}$ est donnée par l'équation (III.32), (page 23) : $F_{p,se} = 0,34$ $\varepsilon_{se} = 0,97$ [24].

$$G_{61} = 815,3 \text{ W/K} \quad (\text{VII.61})$$

$$R_{61} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ K/W}$$

(VII.62)

VII.1.1.6/ G_{73} :

Couplage agrotherm – air intérieur :

$$R_{73} = \frac{1}{G_{73}} \quad (\text{VII.63})$$

$$G_{73} = G_{cv73} \quad (\text{VII.64})$$

$$\rightarrow G_{cv73} = h_{ch,ai}^c S_{ch} \quad (\text{VII.65})$$

 $h_{ch,ai}^c = 15,67 \text{ W/m}^2\text{°C}$ (voir l'équation (III.65), (page 28)). $S_{ch} = 153,5 \text{ m}^2$ (voir l'équation (II.17), (page 15)).

$$G_{73} = 2405,3 \text{ W/K} \quad (\text{VII.66})$$

$$R_{73} = 4,1 \cdot 10^{-4} \text{ K/W}$$

(VII.67)

VII.1.1.7/ R_{62} :

Couplage sol extérieur – air extérieur :

$$R_{62} = \frac{1}{G_{62}} \quad (\text{VII.68})$$

$$G_{62} = G_{cv62} \quad (\text{VII.69})$$

$$> G_{cv62} = h_{se,ae}^c S_{se} \quad (\text{VII.70})$$

Pour calculer le coefficient d'échange par convection entre sol extérieur et l'air extérieur $h_{se,ae}^c$ qui donné par l'équation(III.54),(page27) :

$$S_{se} = 404 \text{ m}^2.$$

$$h_{se,ae}^c = 13,3 \text{ W/m}^2\text{°C} \quad (\text{VII.71})$$

$$G_{62} = 5373,2 \text{ W/K} \quad (\text{VII.72})$$

$$R_{62} = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ K/W} \quad (\text{VII.73})$$

VII.1.1.8/ R_{53} :

Couplage sol intérieur – air intérieur :

$$R_{53} = \frac{1}{G_{53}} \quad (\text{VII.74})$$

$$G_{53} = G_{cv53} + G_{m53} \quad (\text{VII.75})$$

$$> G_{cv53} = h_{si,ai}^c S_{si} \quad (\text{VII.76})$$

Pour calculer le coefficient d'échange par convection entre sol intérieur et l'air intérieur $h_{si,ai}^c$ qui donné par l'équation(III.63),(page28) :

$$h_{si,ai}^c = 5,22 \text{ W/m}^2\text{K}. \quad (\text{VII.77})$$

$$G_{cv53} = 2108,8 \text{ W/K} \quad (\text{VII.78})$$

> Pour calculer G_{m53} , on utilise la relation suivante :

$$Q_{si,ai}^1 = n_{si,ai} \cdot S_{si} (W_{si} - W(\bar{T}_{si})) = G_{m53} (\bar{T}_{si} - \bar{T}_{si}) \quad (\text{VII.79})$$

$$G_{m53} = \frac{h_{si,ai}^i S_{si} (W_{ai} - W(\bar{T}_{si}))}{(\bar{T}_{ai} - \bar{T}_{si})} \quad (\text{VII.80})$$

$h_{si,ai}^i$ est donné par l'équation(III.81),(page32)

$$h_{si,ai}^i = 12,79 \text{ W/m}^2 \quad (\text{VII.81})$$

Pour calculer l'humidité absolue de l'air intérieur à la température du sol intérieur qui sont données par, les équations(III.82),(III.83)et(VII.84),(page33):

$$\bar{T}_{si} = 23,8^\circ\text{C}$$

$$\text{donc : } P_s(\bar{T}_{si}) = 3063,06 \text{ Pa}$$

$$\chi_{ai}(\bar{T}_{si}) = 66,1\% = 0,66$$

$$P_v(\bar{T}_{si}) = 2021,61 \text{ Pa}$$

$$W(\bar{T}_{si}) = 1,28\% = 0.0128 \quad (\text{VII.82})$$

$$G_{m53} = 0,95 \text{ W/K} \quad (\text{VII.83})$$

$$G_{s3} = 2109,7 \text{ W/K} \quad (\text{VII.84})$$

$$R_{s3} = 4,7 \cdot 10^{-4} \text{ K/W} \quad (\text{VII.85})$$

VII.1.1.9/ R₄₃:

Couplage végétation – air intérieur :

$$R_{43} = \frac{1}{G_{43}} \quad (\text{VII.86})$$

$$G_{43} = G_{cv43} + G_{m43} \quad (\text{VII.87})$$

$$> G_{cv43} = h_{v,ai}^c S_v \quad (\text{VII.88})$$

$h_{v,ai}^c$ est donné par l'équation(III.61),(page28).

$$U_{ai} = 1,46 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}, \lambda_{ai} = 0,025 \text{ W/m.K (voir le tableau(VII.2))}$$

$$\text{Re} = \frac{UD}{U_{ai}} \quad (\text{VII.89})$$

$$D = 0,06 \text{ m.}$$

$Re = 8219,17 < 3.10^5$ régime laminaire, alors on utilise l'équation(III.59),(page28) :

$$Pr = 0,72 ; Nu = 54,23$$

$$h_{v,a1}^c = 22,6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (\text{VII.90})$$

$$G_{c143} = 11413 \text{ W/K} \quad (\text{VII.91})$$

➤ Pour calculer G_{m43} , on utilise la relation suivante :

$$Q_{ETP} = ET \cdot S_v = G_{m43} (\bar{T}_v - \bar{T}_{a1}) \quad (\text{VII.92})$$

$$G_{m43} = \frac{ET \cdot S_v}{(\bar{T}_v - \bar{T}_{a1})} \quad (\text{VII.93})$$

pour calculer l'évapotranspiration ET , on utilise l'équation(III.86),(page34) :

$$T_a = \bar{T}_{a1} = 293 \text{ K}, \chi = \bar{\chi}_{a1} = 73,8\%.$$

➤ calculer le rayonnement global moyen du 13.01.2000 (voir annexe B):

Temps(h)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Rayonnement global(W/m ²)	0	0	0	0	0	0	0	29,426	187,138	346,399	474,596	552,862

13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
570,775	526,021	424,424	279,941	115,849	0	0	0	0	0	0	0

Tableau(VII.3) : Le rayonnement solaire global du 13.01.2000.

$$R_g = 146,14 \text{ W/m}^2.$$

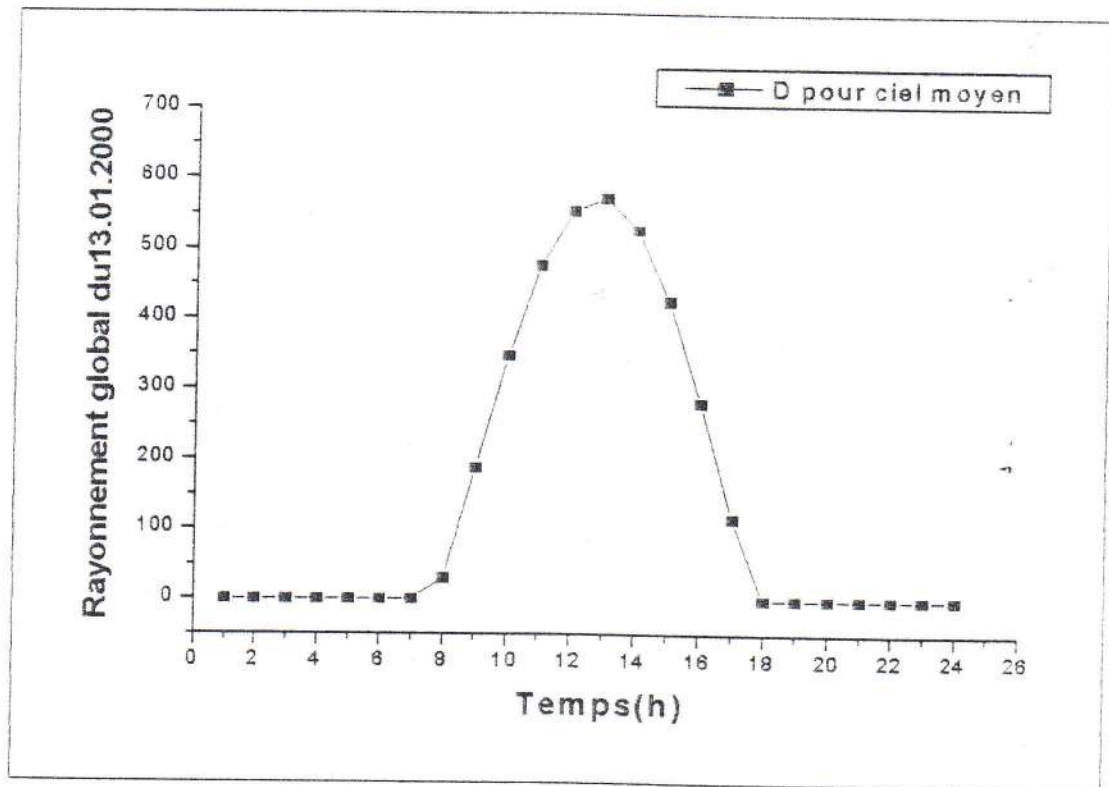
$$\text{Donc: } ET = 29,589 \text{ W/m}^2$$

$$G_{m43} = 7471,2 \text{ W/K} \quad (\text{VII.94})$$

$$G_{43} = 18884,2 \text{ W/K} \quad (\text{VII.95})$$

$$R_{d1} = 0,5.10^{-4} \text{ K/W}$$

$$(\text{VII.96})$$



Figure(VII.4) : Rayonnement global du 13.01.2000.

VII.1.1.10/ R_{74} :

Couplage agrotherm – végétation :

$$R_{74} = \frac{1}{G_{74}} \quad (\text{VII.97})$$

$$G_{74} = G_{r74} \quad (\text{VII.98})$$

$$> G_{r74} = h_{ch,v}^x S_{ch} \quad (\text{VII.99})$$

$$G_{r74} = \sigma \varepsilon_{ch} \varepsilon_v F_{ch,v}^4 \cdot \left(\frac{T_{ch} + \bar{T}_v}{2} \right)^3 \cdot S_{ch} \quad (\text{VII.100})$$

$$\varepsilon_v = 0,8 ; \varepsilon_{ch} = 0,9 [29],$$

$$F_{ch,v} = 1$$

$$G_{74} = 725,2 \text{ W/K} \quad (\text{VII.101})$$

$$R_{74} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ K/W} \quad (\text{VII.102})$$

VII.1.1.11/ G_{75} :

Couplage agrotherm – sol intérieur :

$$R_{75} = \frac{1}{G_{75}} \quad (\text{VII.103})$$

$$G_{75} = G_{cd75} \quad (\text{VII.104})$$

➤ Pour calculer G_{cd75} , on utilise la relation suivante :

$$Q_{ch,si}^{cond} = -\frac{\lambda_{si} S}{e_{si}} (T_{ch} - \overline{T}_{si}) = G_{cd75} (\overline{T}_{si} - T_{ch}) \quad (\text{VII.105})$$

$$G_{cd75} = \frac{\lambda_{si} S}{e_{si}} \quad (\text{VII.106})$$

 $\lambda_{si} = 1,3 \text{ W/m.K}$ (voir le (voir le tableau (II.2), (page 16)). $e_{si} = 1,5 \text{ m}$.

$$S = \frac{1}{5} (\pi D) \cdot L_{ch} \quad (\text{VII.107})$$

 $L_{ch} = 1955 \text{ m}$, $D = 0,025 \text{ m}$ donc : $S = 30,7 \text{ m}^2$.

$$G_{75} = 26,6 \text{ W/K} \quad (\text{VII.108})$$

$$R_{75} = 0,037 \text{ K/W} \quad (\text{VII.109})$$

VII.1.1.12/ R_{54} :

Couplage sol intérieur – végétation :

$$R_{54} = \frac{1}{G_{54}} \quad (\text{VII.110})$$

$$G_{54} = G_{r54} \quad (\text{VII.111})$$

$$\text{➤ } G_{r54} = h_{si,v}^r S_{si} \quad (\text{VII.112})$$

$$G_{r54} = \sigma \varepsilon_v \varepsilon_a F_{a,v}^4 \left(\frac{\overline{T}_v + \overline{T}_{si}}{2} \right)^3 S_a \quad (\text{VII.113})$$

 $\varepsilon_{si} = 0,97$ [24] $F_{si,v} = 1$.

$$G_{54} = 1842,1 \text{ W/K} \quad (\text{VII.114})$$

$$R_{54} = 0,54 \cdot 10^{-3} \text{ K/W} \quad (\text{VII.115})$$

VII.1.1.13/ R_{56} :

Couplage sol intérieur – sol extérieur :

$$R_{56} = \frac{1}{G_{56}} \quad (\text{VII.116})$$

$$G_{56} = G_{cd56} \quad (\text{VII.117})$$

➤ Pour calculer G_{cd56} , on utilise la relation suivante :

$$Q_{si,se}^{Cond} = \frac{\pi \lambda_{si} L_s}{\ln(D_2/D_1)} (\bar{T}_{si} - \bar{T}_{se}) = G_{cd56} (\bar{T}_{si} - \bar{T}_{se}) \quad (\text{VII.118})$$

$$G_{cd56} = \frac{\pi \lambda_{si} L_s}{\ln(D_2/D_1)} \quad (\text{VII.119})$$

$$L_s = 47,5 \text{ m},$$

$$D_2 = 10 \text{ m}, D_1 = 8,5 \text{ (largeur de la serre)}.$$

$$G_{56} = 1193,6 \text{ W/K} \quad (\text{VII.120})$$

$$G_{56} = 0,83 \cdot 10^{-3} \text{ K/W} \quad (\text{VII.121})$$

VII.2/ Calcul des capacités :

Le calcul des capacités nécessite de connaître la masse volumique la chaleur massique et le volume de chaque composants de la serre.

VII.2.1/ C_1 :

Capacité de la paroi plastique :

$$C_1 = \rho_p C_{Pp} V_p \quad (\text{VII.122})$$

$$\rho_p = 925 \text{ kg/m}^3, C_{Pp} = 3200 \text{ J/kg.K (voir le tableau (II.2), (page 16))}.$$

$$V_p = S_p \cdot E_p = 490,0,18 \cdot 10^{-3} = 0,00882 \text{ m}^3.$$

$$C_1 = 261072 \text{ J/K} \quad (\text{VII.123})$$

VII.2.2/ C₃:

Capacité de l'air intérieur

$$C_3 = \rho_{a1} C_{P_{a1}} V_{a1} \quad (\text{VII.124})$$

 $\rho_{a1} = 1,2 \text{ kg/m}^3, C_{P_{a1}} = 1006 \text{ J/kg.K}$ (voir le tableau(VII.2)).

$$V_{a1} = V_s = 1093 \text{ m}^3.$$

$$C_3 = 1319469,6 \text{ J/K}$$

(VII.125)

VII.2.3/ C₄:

Capacité de la végétation :

$$C_4 = \rho_v C_{P_v} V_v \quad (\text{VII.126})$$

 $\rho_v = 360 \text{ kg/m}^3, C_{P_v} = 900 \text{ J/kg.K}$ (voir le tableau(II.2), (page 16)).

$$V_v = S_v \cdot E_v = 505 \cdot 10^{-3} = 0,505 \text{ m}^3.$$

$$C_4 = 163620 \text{ J/K}$$

(VII.127)

VII.2.4/ C₅:

Capacité du sol intérieur :

$$C_5 = \rho_{s1} C_{P_{s1}} V_{s1} \quad (\text{VII.128})$$

 $\rho_{s1} = 1620 \text{ kg/m}^3, C_{P_{s1}} = 1480 \text{ J/kg.K}$ (voir le tableau(II.2), (page 16)).

$$V_{s1} = S_{s1} \cdot E_{s1} = 404 \cdot 1,5 = 606 \text{ m}^3.$$

$$C_5 = 1452945,6 \text{ KJ/K}$$

(VII.129)

VII.2.5/ C₆:

Capacité du sol extérieur :

$$C_6 = \rho_{se} C_{P_{se}} V_{se} \quad (\text{VII.130})$$

 $\rho_{se} = 1620 \text{ kg/m}^3, C_{P_{se}} = 1480 \text{ J/kg.K}$ (voir le tableau(II.2), (page 16)) .

$$V_{se} = S_{se} \cdot E_{se} = 404.0,75 = 303 \text{ m}^3.$$

$$C_e = 726472,8 \text{ KJ/K}$$

(VII.131)

VII.3/ Calcul de sources des courants :

Pour calculer les sources des courants qui sont des sources des flux solaire, il est indispensable de connaître le rayonnement solaire et surface de chaque composant de la serre.

VII.3.1/ φ_{s1} :

Flux solaire de la paroi plastique :

$$\varphi_{s1} = \alpha_p R_{sg} \cdot S_p \quad (\text{VII.132})$$

α_p :facteur d'absorption de paroi plastique(polyéthylène).

La formule de rayonnement solaire global donne par l'équation (IV.25),(page40)

$$R_{sg} = G^* = A(\sinh)^0 \quad (\text{VII.133})$$

$A=1080$ $D=1,22$ pour un ciel moyen

$\sinh$ est donné par l'équation (IV.2),(page37).

la déclinaison δ est donné par l'équation (IV.1),(page37).

La mesure expérimentale on fait 13/01/2000 donc :nj=13

$$\delta = -21,61^\circ = -0,37 \text{ rad.} \quad (\text{VII.134})$$

Latitude de Ouargla $\phi = 31^\circ 57' \text{N} = 31,95^\circ = 0,55 \text{ rad.}$

(VII.135)

$$\omega = 15(\text{TSV}-12) \quad (\text{VII.136})$$

$$\omega = \frac{\pi}{12 \cdot 3600} \text{TSV}' - 3,14 (\omega \text{ en rad, t en seconde}). \quad (\text{VII.137})$$

$$\text{TSV}' = 3600 \cdot \text{TSV} \quad (\text{VII.138})$$

$$\text{TSM} = \text{TU} + \frac{\lambda}{15} \quad (\text{VII.139})$$

$$\text{en Algérie } \text{TU} = \text{TL} - 1 \quad (\text{VII.140})$$

$$\text{Longitude de Ouargla } \lambda = 5^\circ 24' \text{E} = 5,40^\circ \quad (\text{VII.141})$$

$$\text{E} = -8,64 \text{ mn} = -0,14 \text{ h} \quad (\text{VII.142})$$

$$\text{TSV} = \text{TL} - 0,78 \quad (\text{VII.143})$$

$$TSV' = TL' - 2808 \quad (VII.144)$$

$$\omega = 0,072 \cdot 10^{-3} (TL' - 2808) - 3,14 \quad (VII.145)$$

remplacer les formules de ω , δ , φ dans l'expression de $Sinh$

$$Sinh = 0,794 \cos(0,072 \cdot 10^{-3} (TL' - 2808) - 3,14) - 0,188 \quad (VII.146)$$

on pose $TL' = t$ (t en secondes).

$$R_{sg} = 1080 (0,794 \cos(0,072 \cdot 10^{-3} (t - 2808) - 3,14) - 0,188)^{1,22} \quad (VII.147)$$

$$R_{sg} = 1080 (0,794 \sin(0,072 \cdot 10^{-3} (t - 2808) - 1,57) - 0,188)^{1,22} \quad (VII.148)$$

$$\text{puisque: } \cos(\alpha) = \sin(\alpha + \frac{\pi}{2}) \quad (VII.149)$$

$$\alpha_p = 20\% = 0,2 ; S_p = 490 \text{ m}^2$$

$$\varphi_{s1} = 105840 [0,794 \cdot \sin(0,072 \cdot 10^{-3} t - 1,77) - 0,188]^{1,22} \text{ (W)} \quad (VII.150)$$

VII.3.2/ φ_{s3} :

Flux solaire de l'air intérieur :

$$\varphi_{s3} = \tau_p R_{sg} \cdot 2 \cdot S_{ver} \quad (VII.151)$$

$$\tau_p = 50\% = 0,5 ;$$

$$S_{ver} = L_s \cdot H$$

$$\varphi_{s3} = 169290 [0,794 \cdot \sin(0,072 \cdot 10^{-3} t - 1,77) - 0,188]^{1,22} \text{ (W)} \quad (VII.152)$$

VII.3.3/ φ_{s6} :

Flux solaire du sol extérieur :

$$\varphi_{s6} = (1 - a_s) R_{sg} \cdot S_{se} \quad (VII.153)$$

l'albédo de Ouargla $a_s = 0,35$

$$S_{se} = 404 \text{ m}^2.$$

$$\varphi_{s6} = 283608 [0,794 \cdot \sin(0,072 \cdot 10^{-3} t - 1,77) - 0,188]^{1,22} \text{ (W)} \quad (VII.154)$$

Remarques :

1) $\varphi_{s1}, \varphi_{s3}, \varphi_{s6}$ sont des sources des flux solaires, représentés par des sources. Celles-ci dépendent du temps du rayonnement solaire du 13/01/2000 ; Ce jour là, le temps solaire commence à 8 heures et se termine à 18heures, mais dans le logiciel Pspice la fenêtre de Transient ne trouve pas le temps initial, on utilise le temps corrigé $t=t'+8h$ alors : $8h \leq t \leq 18h$ et $0h \leq t' \leq 10h$ remplace le temps par le temps corrigé dans les expressions $\varphi_{s1}, \varphi_{s3}, \varphi_{s6}$:

$$\varphi_{s1} = 105840[0,794.\sin(0,072.10^{-3}t'+0,3)-0,188]^{1,22}$$

$$\varphi_{s3} = 169290[0,794.\sin(0,072.10^{-3}t'+0,3)-0,188]^{1,22}$$

$$\varphi_{s6} = 283608[0,794.\sin(0,072.10^{-3}t'+0,3)-0,188]^{1,22}$$

2) $\varphi_{s1}, \varphi_{s3}, \varphi_{s6}$ sont sources des courant alternative, qui écrivant sous la forme :

$$\varphi_s = A \sin(\omega t + \varphi) + B$$

donc la puissance de $\varphi_{s1} (1,22) = 1+0,22$.

$$\varphi_{s1} = 105840[0,794\sin(0,072.10^{-3}t'+0,3)-0,188].[0,794\sin(0,072.10^{-3}t'+0,3)-0,188]^{0,22}$$

puis on calcule l'expression : $g = [0,794.\sin(0,072.10^{-3}t'+0,3)-0,188]^{0,22}$

t'(s)	0	3600	7200	10800	14400	18000	21600	25200	28800	32400	36000
g	0,509	0,726	0,814	0,863	0,888	0,895	0,884	0,854	0,798	0,696	0,253

Après ça, on calcule $g_{moy} = 0,74$

On remplace cette valeur dans les expression de $\varphi_{s1}, \varphi_{s3}, \varphi_{s6}$:

$$\varphi_{s1} = 62187,35.\sin(0,072.10^{-3}t'+0,3)-14724,46$$

$$\varphi_{s3} = 99468,03.\sin(0,072.10^{-3}t'+0,3)-23551,62$$

$$\varphi_{s6} = 166636,71.\sin(0,072.10^{-3}t'+0,3)-39455,54$$

Conclusion:

Le calcul des composants étant effectué, nous allons lancer la simulation dans le chapitre VIII.

Chapitre VIII

Chapitre VIII

La simulation

VIII.1/ Définition de la simulation :

Il s'agit d'étudier le comportement du modèle dans des conditions données, et de calculer les paramètres recherchés. Dans le cas de la thermique, les paramètres inconnus seront essentiellement des températures en des points donnés du système.

Il est nécessaire de préciser l'importance du facteur temps dans l'étude du fonctionnement du système (dans la simulation).

Pour cela , il faut envisager :

- » le comportement stationnaire du système: c'est le cas où l'on considère que les paramètres de fonctionnement demeurent constants .
- » le comportement variable dans le temps : les paramètres n'étant plus constants, dans ce cas il faut considérer le système comme étant une succession de comportements stationnaires de courte durée .

VIII.2/ Le logiciel de simulation Pspice et ses périphériques :

Dans le domaine de l'électricité et de l'électronique, les moyens de simulation sont nombreux. Pspice, élaboré à l'Université de Berkeley, est une référence dans l'industrie et dans l'enseignement .Si à sa souplesse d'utilisation et à ses performances on ajoute qu'une version réduite(dite version d'évaluation) est diffusée gratuitement, on mesure l'intérêt que peut susciter ce logiciel près de l'étudiant qui peut traiter de façon très satisfaisante la plupart de ses problèmes.

Ce logiciel consacré à l'étude de transfert thermique par la méthode nodale et orienté Vers la thermique de l'habitat.

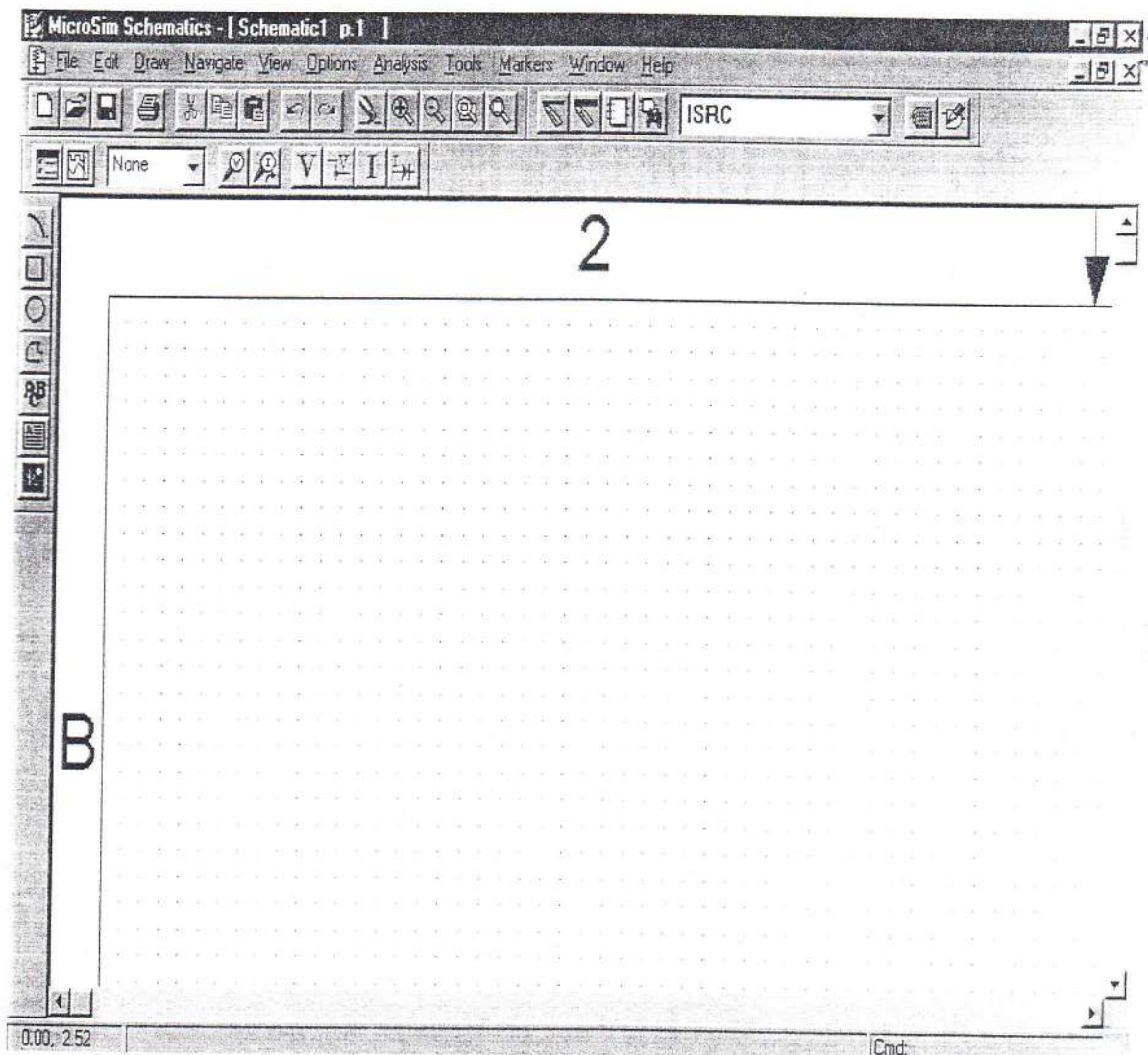
La version de Pspice (8.0) avec son éditeur de dessins (Schématics), son traceur de Courbes(Probe) et son routeur(PCboard)permet, l'environnement sous Windows.

Une séquence de simulation comporte deux étapes. Dans la première, il s'agit d'effectuer la description du réseau à étudier puis d'éditer les tâches ou les

commandes à exécuter sous Pspice, le logiciel de calcul. Dans la seconde les commandes sont exécutées et débouchent sur l'exploitation proprement dite des résultats de calcul en faisant appel, au traceur de courbes Probe[2].

VIII.3/ Description du réseau électrique équivalent à la serre :

Pour réaliser le schéma électrique équivalent avec ses composants affectés de leurs valeurs numériques respectives (figure(VIII.2)), on commence par lancer Schématics à partir Windows :



Figure(VIII.1) :Schématics de logiciel Pspice[2].

VIII.3.1/ Mise en place des composants :

Pour placer un composant sur le schéma, on ouvre le menu Draw et ou on sélectionne Get New Part ou bien on appuit sur la touche de raccourci CTRL G ou bien encore on clique sur l'icône . On clique sur Libraries pour choisir une bibliothèque. On choisit une bibliothèque (Library) puis un composant dans Part. On clique ensuite sur OK puis sur Close.

VIII.3.1.1/ Résistances (R) :

On clique sur l'icône :  (Equivalent de Draw/ Get New Part ou Control G)
On clique sur Libraries et on choisit la bibliothèque Analog.slb dans la fenêtre Library puis R dans la fenêtre Part ou bien on tape R dans la fenêtre PartName.
On clique ensuite sur OK puis sur Close.

VIII.3.1.2/ Condensateurs (C) :

Procéder de la même manière que pour les résistances mais en choisissant, dans la bibliothèque Analog.slb le composant C.

VIII.3.1.3/ Sources de courant instationnaires (ISRC) :

Procéder de la même manière que pour les résistances mais en choisissant, dans la bibliothèque Source.slb le composant ISRC.

Par exemple: ϕ_{s1} est un courant sinusoïdal ISIN d'amplitude I, de composante continue I_0 est décrit par : I SIN(I_0 I fréq 0 0 phase)
 ϕ_{s1} : SIN(-14724,46 62187,35 11,574u 0 0 0,3)

VIII.3.1.4/ Source de tension continue (VDC) :

Procéder de la même manière que pour les résistances mais en choisissant, dans la bibliothèque Source.slb le composant VDC.

VIII.3.2/ Interconnexion des composants :

Pour interconnecter les composants sur le schéma, on ouvre le menu Draw et on sélectionne Wire ou bien on appuit sur la touche de raccourci CTRL W ou bien encore on clique sur l'icône .

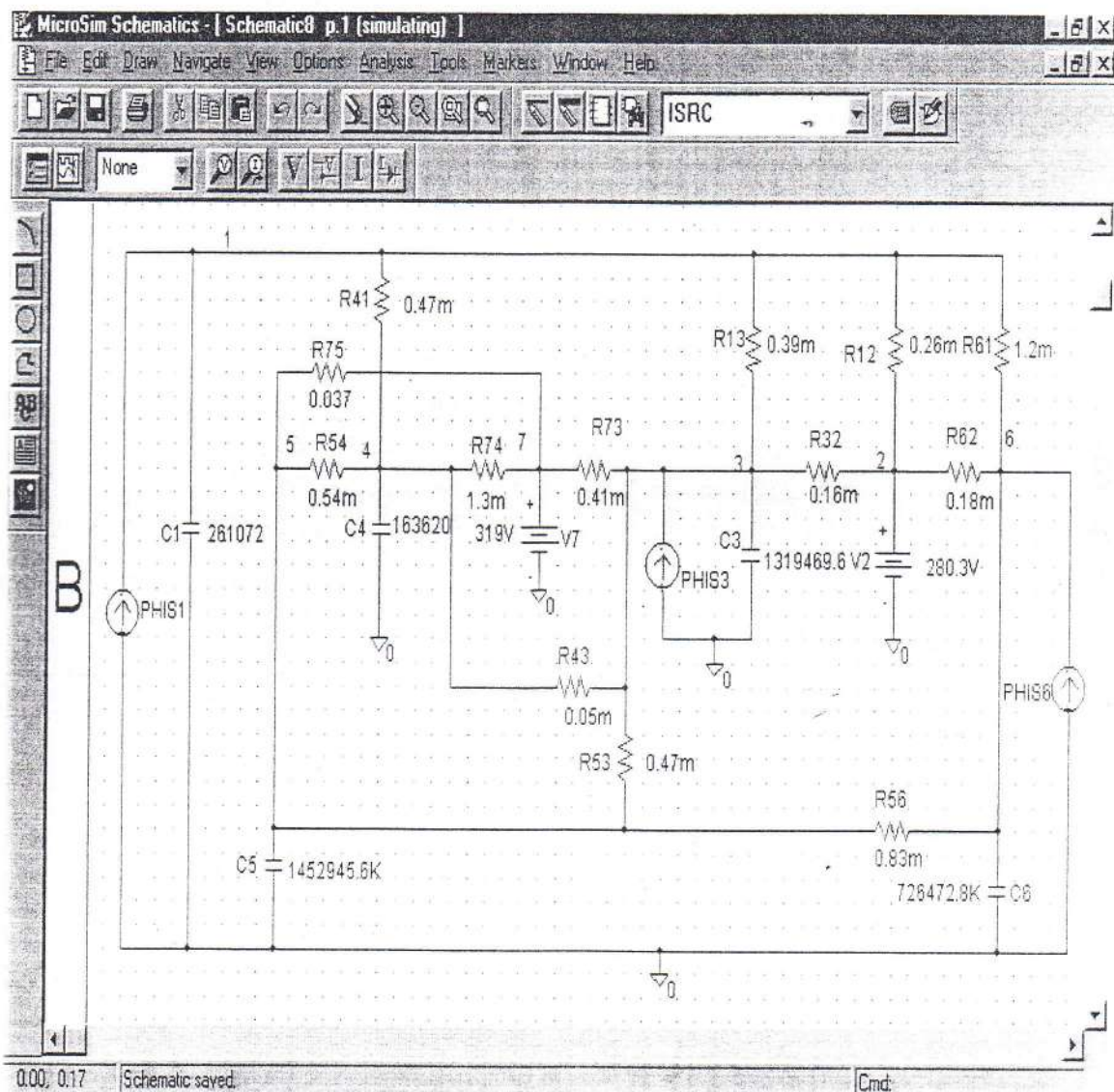
VIII.3.3/ Attribution des valeurs aux composants :

Initialement, la tension continue vaut zéro volt. Pour la modifier, on clique

deux fois sur sa valeur : une fenêtre **Set Attribute Value** s'ouvre. On remplace **0V** par **319V** et on clique sur **OK** dans la tension **V7** par exemple. De la même façon, on pourrait modifier les valeurs des composants du circuit (R,C...).

VIII.3.4/ Mise en place de la masse analogique (AGND) :

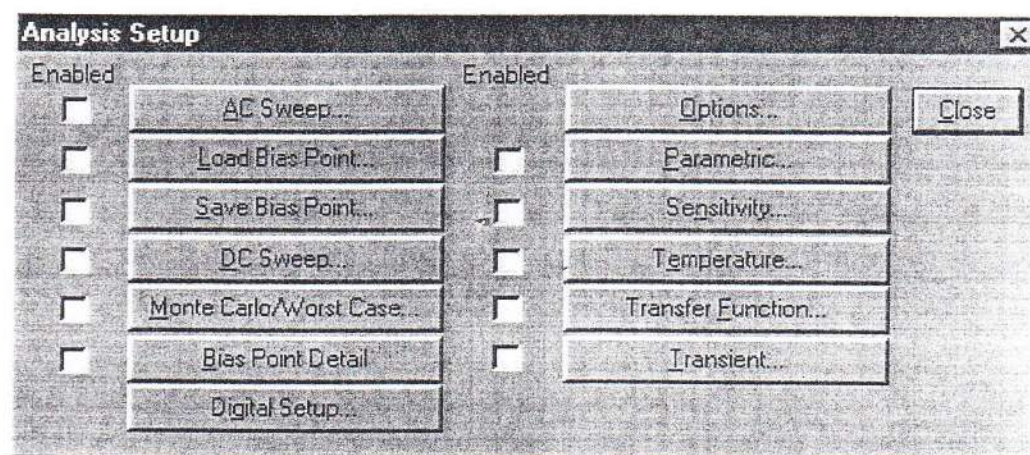
Pour réaliser une simulation, il est indispensable de placer la masse du circuit. Celle-ci s'indique à l'aide du symbole **AGND** (bibliothèque **Port.slb**). Un point symbolisant la liaison doit apparaître lorsqu'on la relie au fil.



Figure(VIII.2) : Schéma électrique équivalent avec ses composants affectés de leurs valeurs numériques respectives .

VIII.3.5/ Edition des commandes :

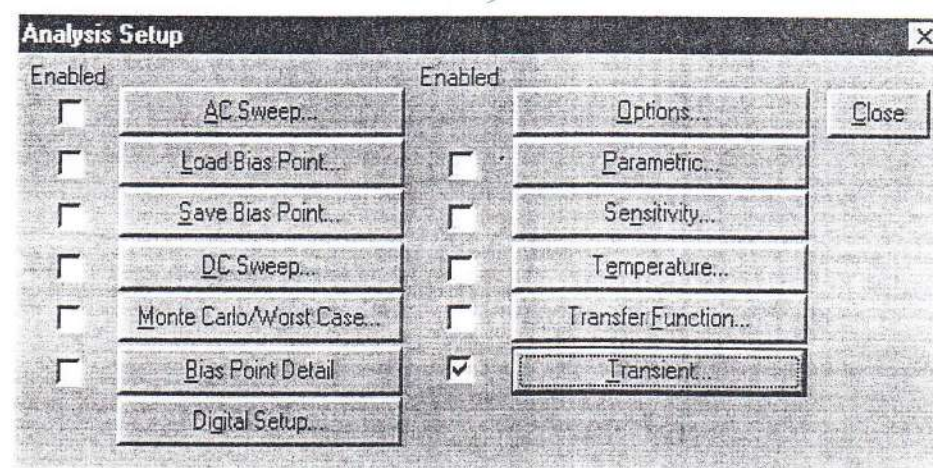
On édite les commandes de simulation en renseignant les options choisies dans le sous-menu Setup...accessible en cliquant la souris sur l'icône **Setup des commandes** ou par **Analyse –Setup...**Les options apparaissent sur la copie d'écran(figure(VIII.3))[2].



Figure(VIII.3) :Les commandes de logiciel Pspice.

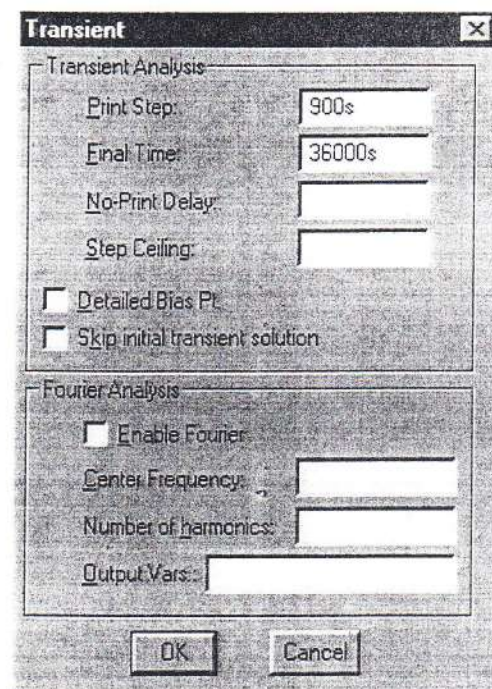
VIII.3.5.1/ Paramétrage de la simulation :

On paramètre alors la simulation en cochant la case **Transient** et en cliquant sur **Transient**.



Figure(VIII.4) :paramétrage de la simulation .

La fenêtre suivante s'ouvre alors :



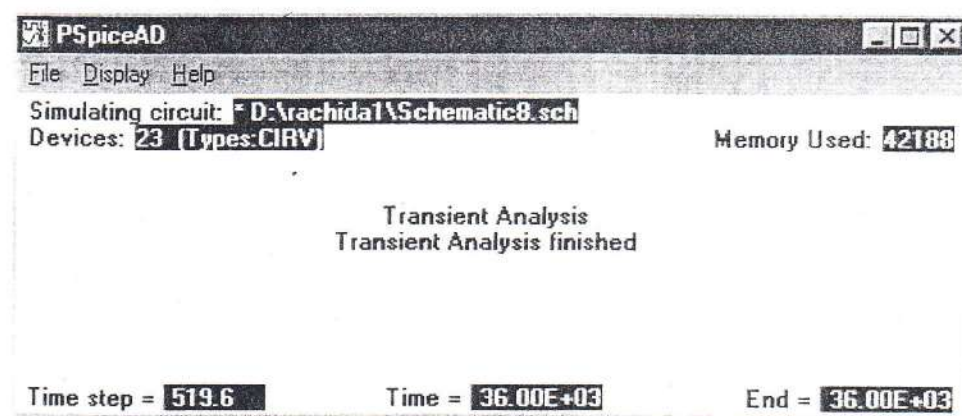
Choisit le pas d'affichage, en écrivant 900s dans **Print Step** et la durée de la simulation, en écrivant 36000s dans **Final Time**. On clique sur **OK** puis sur **Close**.

Figure(VIII.5) :paramétrage de la simulation Transient.

On sauve enfin le schéma et on lance la simulation.

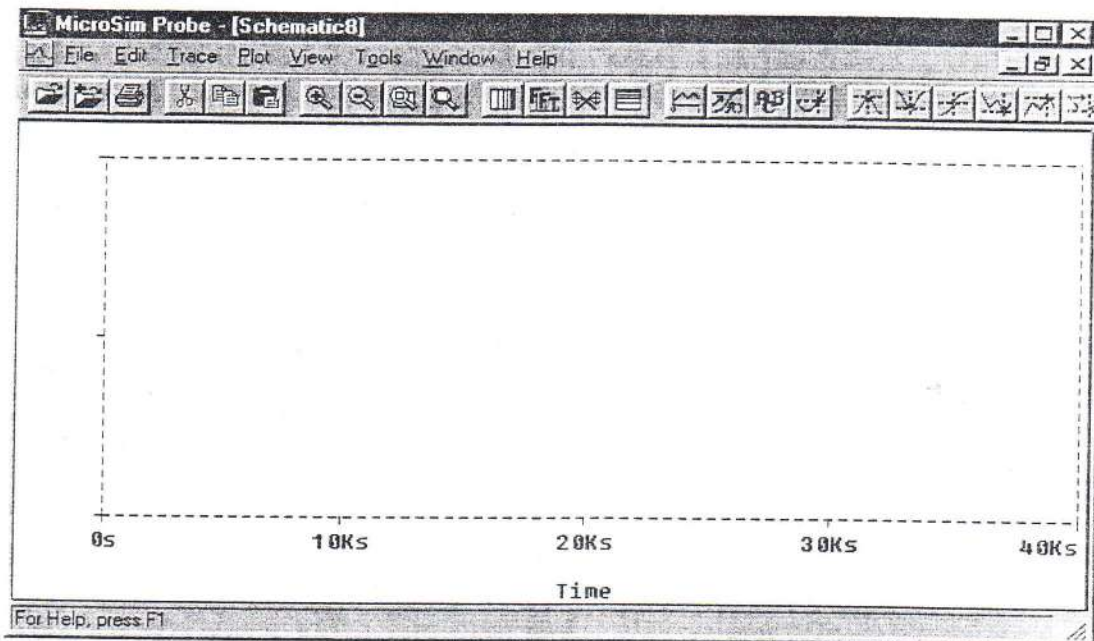
VIII.3.6/ Mise en route de la simulation :

Pour cela, on clique sur l'icône :  (Equivalent de **Analysis/Simulate** ou de **F11**). La fenêtre du simulateur Pspice s'ouvre pendant la simulation.



Figure(VIII.6) :Simulation de PspiceAD.

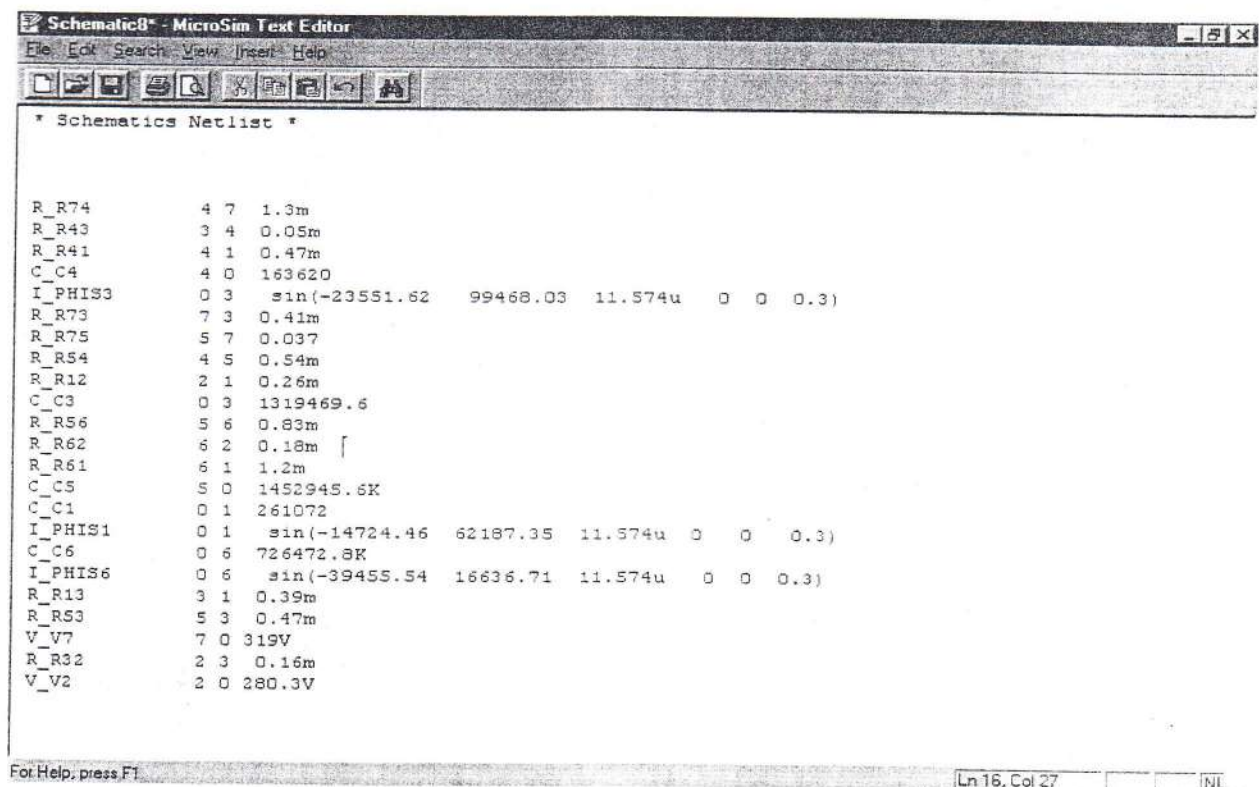
On ferme cette fenêtre, et la fenêtre de résultats (**PROBE**) s'ouvre :



Figure(VIII.7) :Fenêtre de résultats de la simulation PROBE.

VIII.3.7/ Examen de la liste des nœuds du circuit :

En ouvrant Analysis/Examine Netlist, on obtient :



Figure(VIII.8) :Analysis/Examine Netlist du circuit électrique équivalent de la serre.

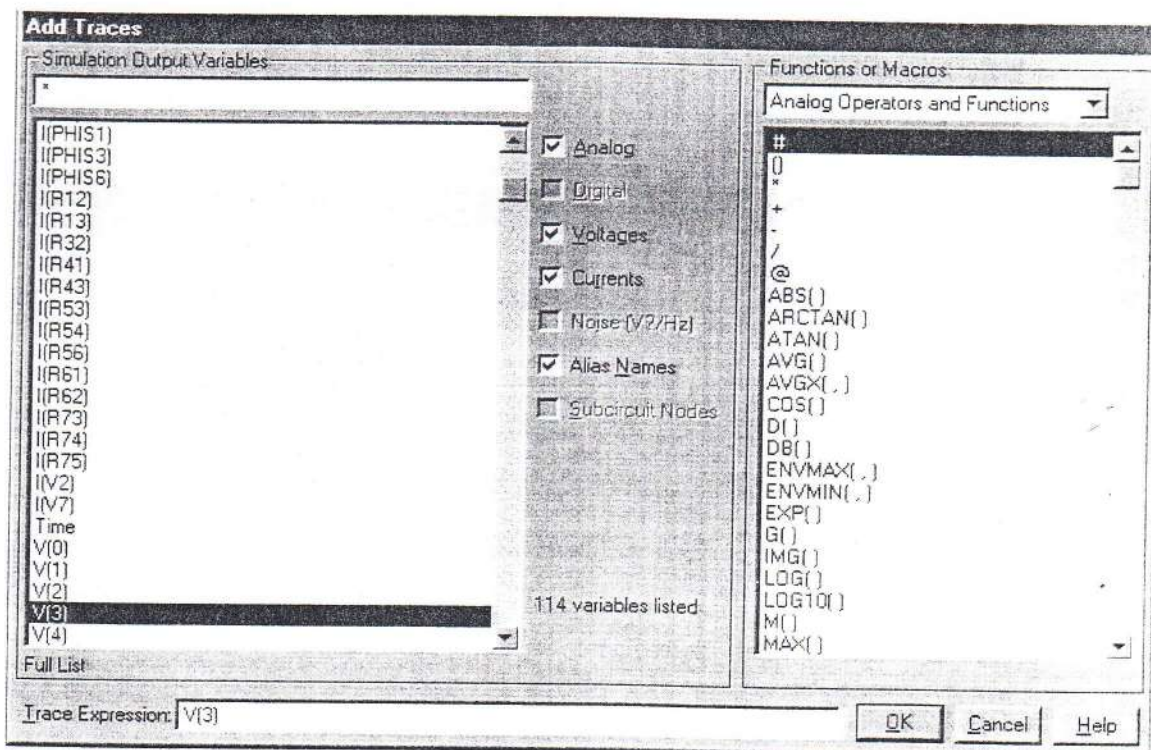
Où les numéros de 1 à 7 désignent les nœuds suivants :

- 1 : Paroi plastique.
- 2 : Air extérieur.
- 3 : Air intérieur.
- 4 : Végétation.
- 5 : Sol intérieur.
- 6 : Sol extérieur.
- 7 : Agrotherm.

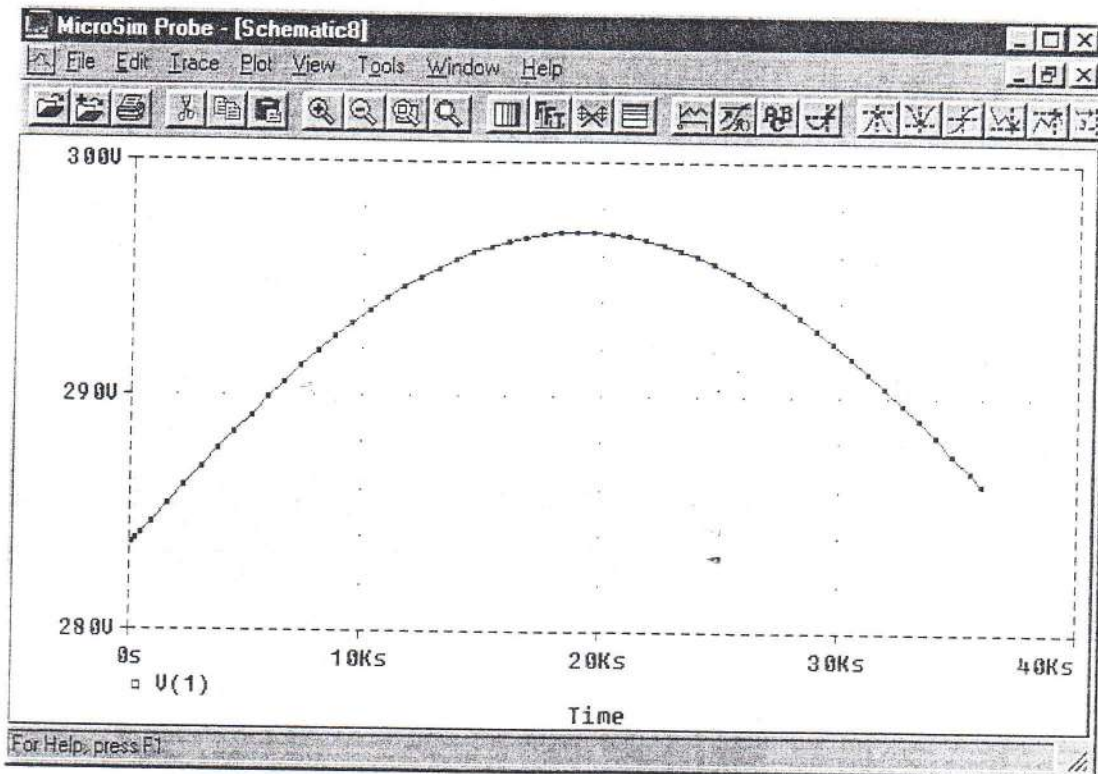
VIII.3.8/ Résultats de la simulation PROBE :

Les fonctions permettent de réaliser des opérations sur les tensions, courants...

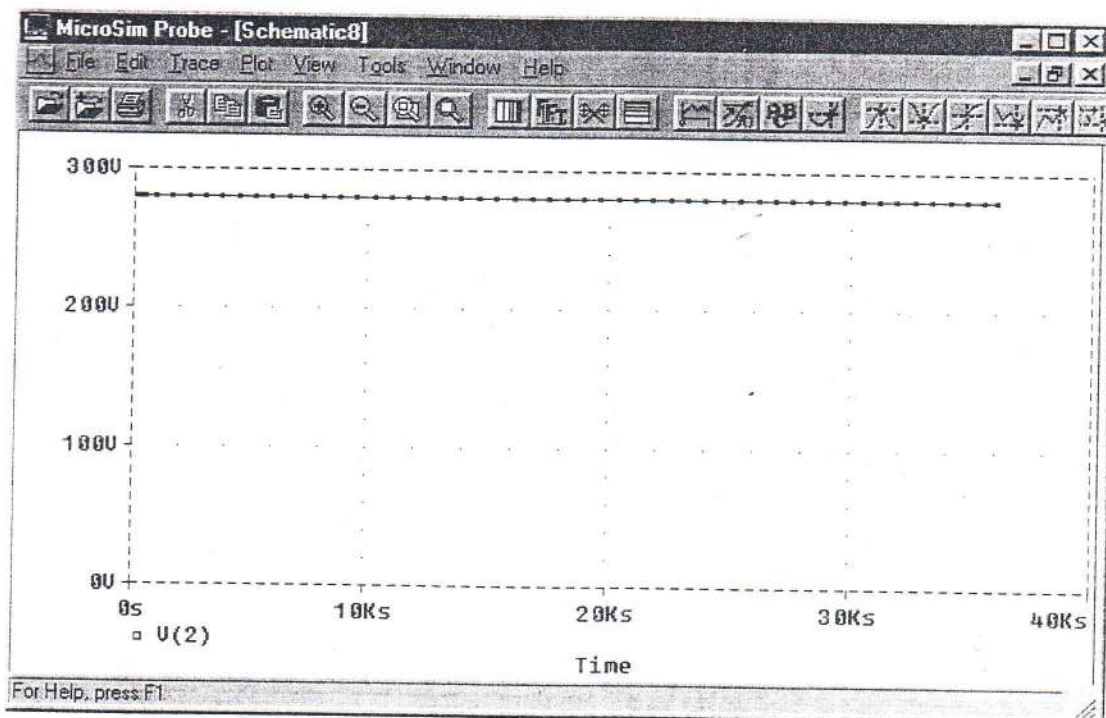
On y accède en ouvrant **Trace/Add** (ou bien on clique sur l'icône ) dans **Probe**.



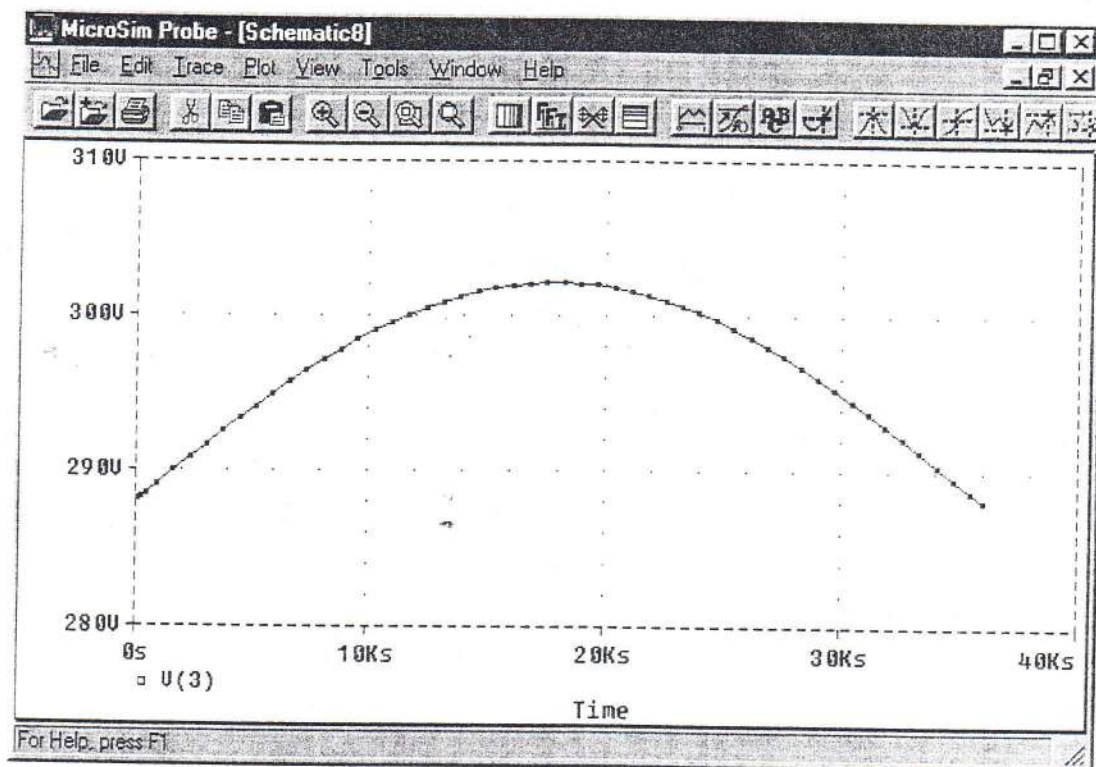
Pour obtenir les graphes temporelles des température calculées à l'aide du logiciel, on sélectionne le nœud désiré dans la fenêtre ci-dessus, ce qui permet d'obtenir les graphes suivantes :



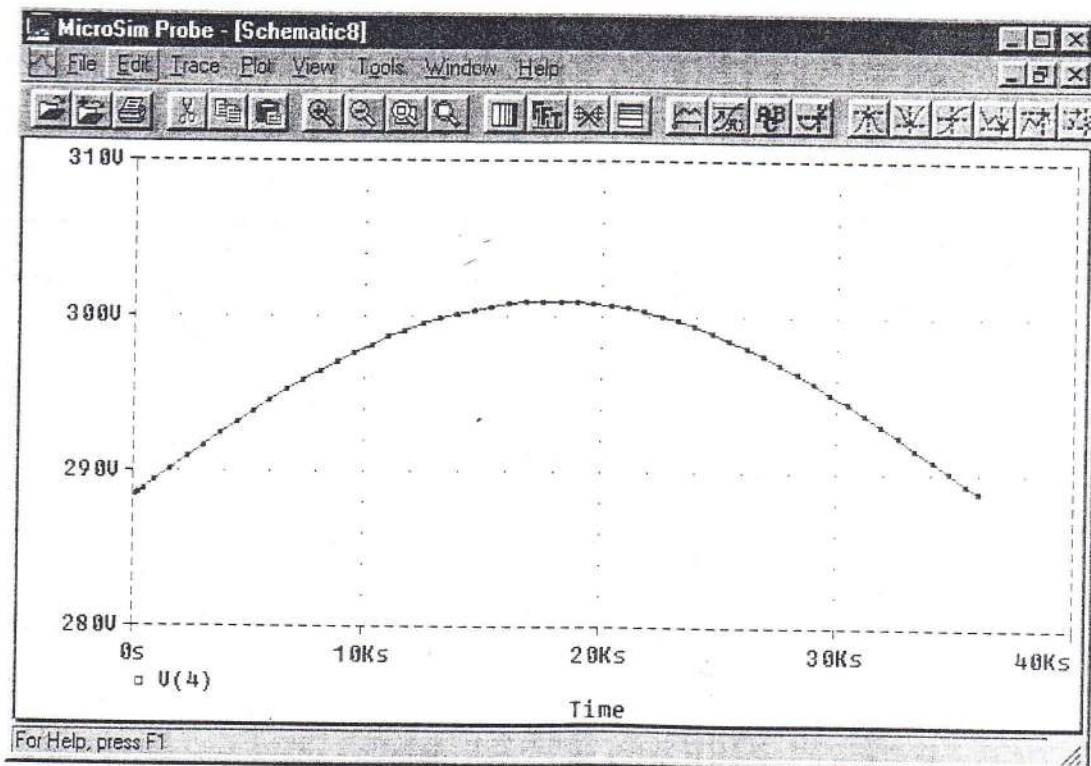
Figure(VIII.9):Température de la paroi plastique.



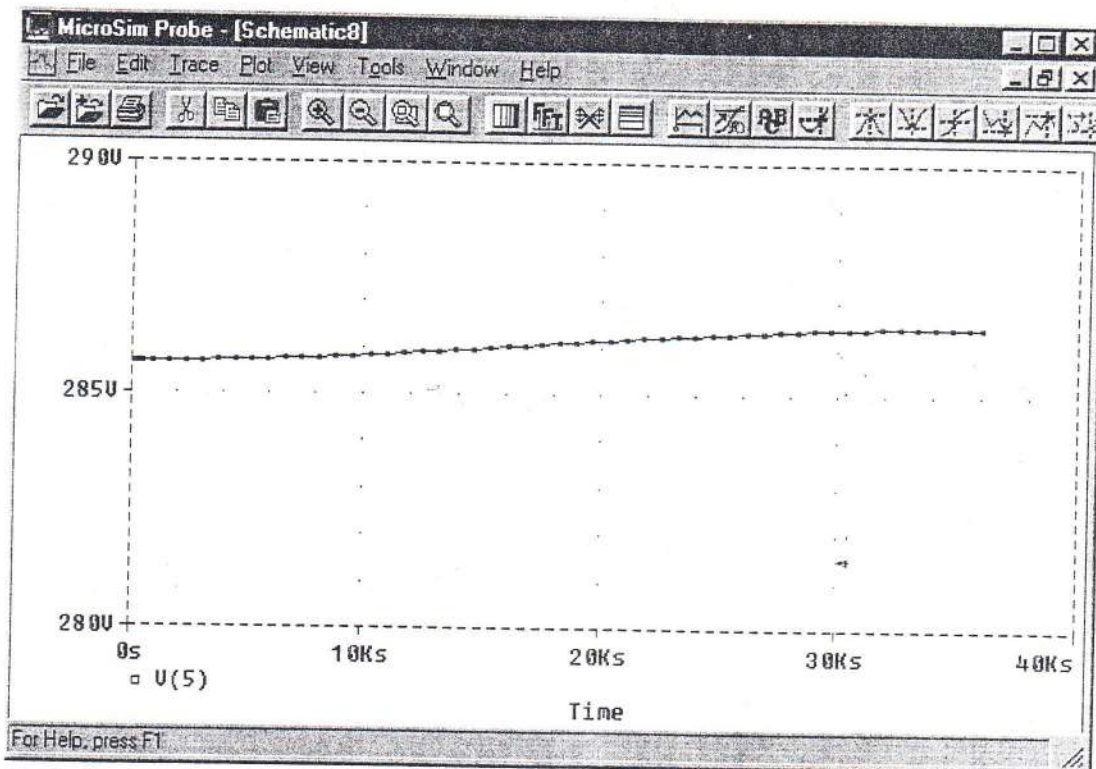
Figure(VIII.10):Température de l'air extérieur.



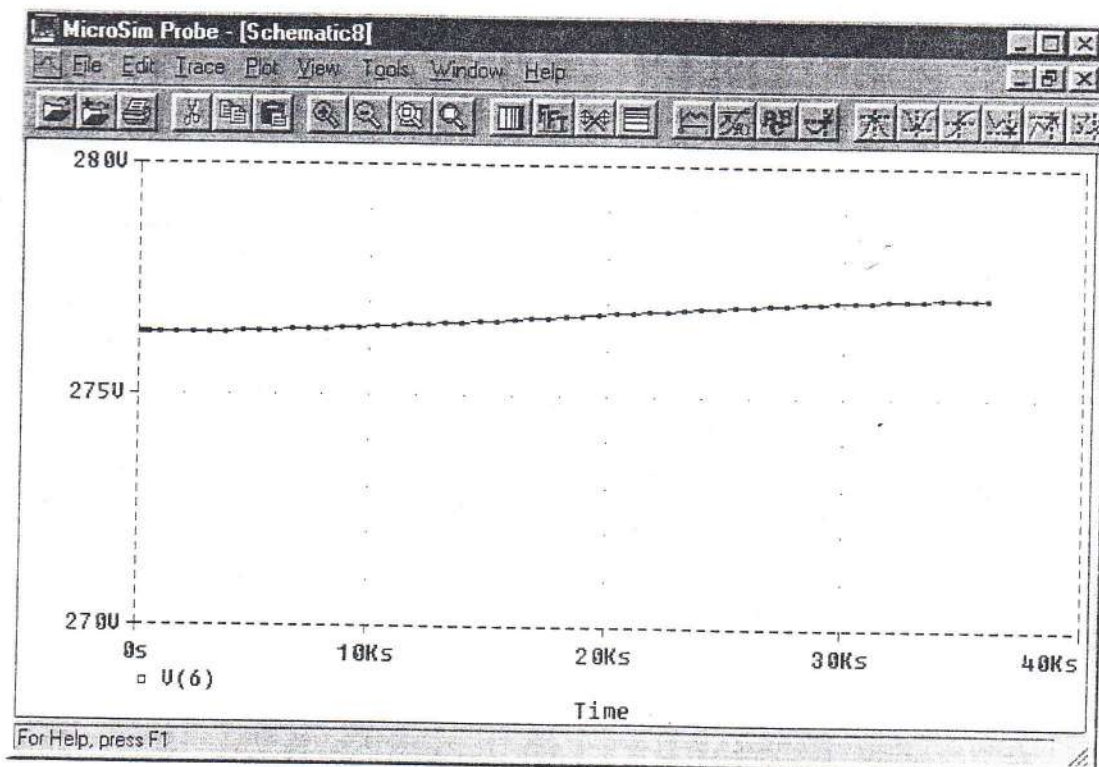
Figure(VIII.11):Température de l'air intérieur.



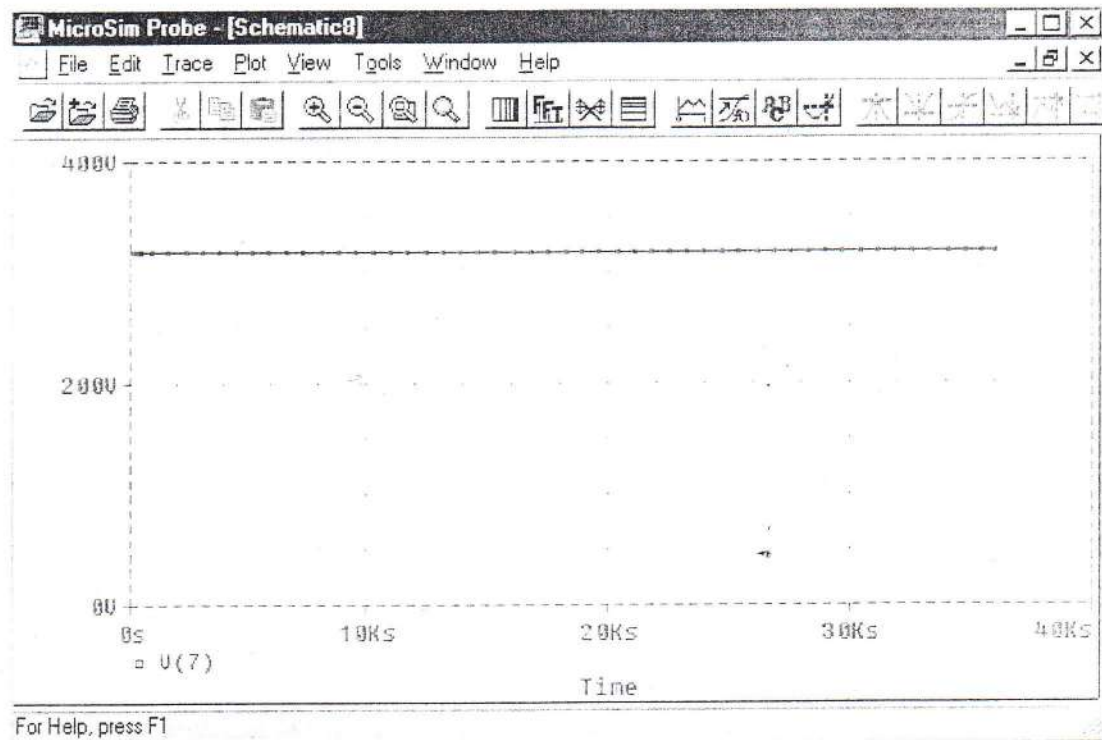
Figure(VIII.12) :Température de la végétation.



Figure(VIII.13): Température du sol intérieur.



Figure(VIII.14): Température du sol extérieur.



Figure(VIII.15):Température de l'agrotherm.

VIII.4/ Interprétations des résultats :

VIII.4.1/ Température de la paroi plastique :

D'après le graphe (figure(VIII.9)), on constate que la température de la paroi plastique atteint son max (24°C) au alentours de 13h15min.

► Cet échauffement est dû :

- au flux solaire croissant, absorbé par la paroi plastique .

► Le refroidissement est dû quant à lui :

- à l'évaporation du film liquide, formé par condensation antérieure (durant la nuit).
- aux différents flux thermiques (convection forcée et rayonnement) à partir de la paroi plastique en direction du reste de la serre.
- à la déclinaison du soleil à partir de 13 heures environ.

VIII.4.2/ Température de l'air extérieur :

La température de l'air extérieur reste constante puisque c'est une température d'entrée du système(figure(VIII.10)).

VIII.4.3/ Température de l'air intérieur :

D'après le graphe (figure(VIII.11)), on constate que la température de l'air intérieur atteint son max (29°C) au alentours de 13h30min.

» Son échauffement serait dû :

- au flux thermique issu de l'agrotherm .
- au flux solaire transmis par la paroi plastique.

» Son refroidissement est dû quant à lui :

- aux entrées d'air frais à travers les ouvrants.
- aux différents flux convectifs échangés entre l'air intérieur et le reste de la serre.
- au déclin du soleil à partir de 13 heures environ.

VIII.4.4/ Température de la végétation :

D'après le graphe (figure(VIII.12)), on constate que la température de la végétation atteint son max (27°C) au alentours de 14h.

» Son échauffement serait dû au :

- flux solaire qui est absorbée par la végétation .
- l'agrotherm qui chauffe la végétation par rayonnement.

» Son refroidissement est dû quant à lui :

- à l'évapotranspiration de la végétation.
- aux différents flux thermiques (convection forcée, rayonnement) à partir de la végétation en direction du reste de la serre.
- à la déclinaison du soleil à partir de 13 heures environ.

VIII.4.5/ Température du sol :

Puisque d'une part, le sol possède une inertie thermique assez élevée, la chaleur stockée pendant le jour sera restituée pendant la nuit en créant le phénomène d'effet de serre, et d'autre part, du fait que l'agrotherm est posé au sol, celui-ci réchauffe le sol pendant la nuit, par conséquent la température du sol de la serre pendant la période de chauffage s'élève nettement par rapport à celle du sol extérieur (voir dans les figures ((VIII.13),(VIII.14))), cette augmentation favorise la germination ainsi que le développement de la plante.

VIII.4.6/ Température de l'agrotherm :

La température de l'agrotherm reste constante puisque c'est la température de l'eau géothermale, la température de l'eau prise à l'intérieur des tuyaux est la moyenne entre l'entrée et la sortie.

VIII.5/ Validation du modèle :

En confrontant les températures de l'air de la serre mesurées et effectuées sur site [1] à celles que nous venons de calculer (figure(VIII.16)) on constate que les deux courbes sont pratiquement confondues .

La fiabilité de ce modèle vient du fait qu'il tient compte des principaux échanges de chaleur et de masse dans la serre, ses coefficients identifiés représentent des valeurs physiques.

Le tableau (VIII.1) illustre l'erreur entre les valeurs de la température de l'air intérieur mesurées et les valeurs calculées.

t(s)	Tais(K)	Taim(K)	(Tais-Taim) ²
28800	288,081	288	0,006561
32400	292,308	293	0,478864
36000	296,245	296	0,060025
39600	299,391	297	5,7616881
43200	301,410	301	0,1681
50400	301,391	303	2,588881
54000	299,362	298	1,855044
58680	295,108	295	0,011664
64800	288,088	293	24,127744
	2661,384	2664	35,013764

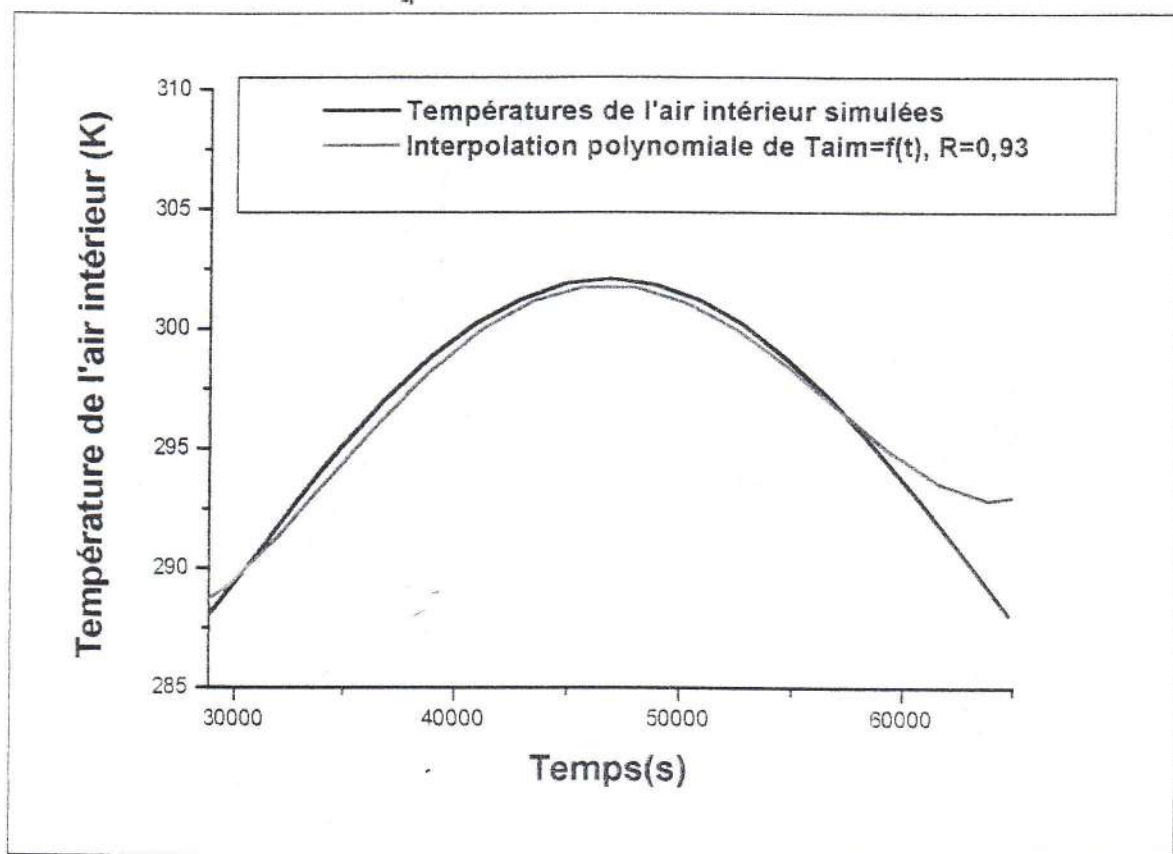
Tableau(VIII.1) : L'erreur entre les valeurs de l'air intérieur mesurées et calculées par logiciel.

L'écart entre les points expérimentaux et la courbe théorique peut être évalué en définissant par :

$$\sigma = \frac{\left[\sum (T_{ais} - T_{aim})^2 \right]^{1/2}}{\sum T_{ais}} \quad (\text{VIII.1})$$

Le calcul effectué à partir du tableau (VIII.1) donne :

$$\sigma = 0,002 = 0,2\% \quad (\text{VIII.2})$$



Figure(VIII.16) : Températures de l'air intérieur mesurées et calculées.

Conclusion

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons développé un modèle qui décrit le climat de l'air intérieur de la serre, en utilisant la méthode dite nodale.

Le climat dans une serre agricole chauffée par l'eau géothermale est une fonction des conditions climatiques telles que la température, l'humidité et le rayonnement solaire.

Ce modèle tient compte des échanges thermiques et hydriques entre diverses composantes de la serre constituant les nœuds du modèle (paroi, air extérieur, air intérieur, végétation, sol intérieur, sol extérieur, agrotherm).

Les formules empiriques qu'on a utilisé et qui sont appliquées à des phénomènes aussi mal connus et difficilement mesurables tel que le taux de renouvellement de l'air, les coefficients de rayonnement, les coefficients de convection ne peuvent donner des résultats très précis.

Le calcul des températures à l'aide du logiciel de simulation Pspice ; nous avons permis de tracer la courbe de variation journalière de la température de chaque composant de la serre. Par ailleurs, la validation du modèle s'est basé essentiellement sur les températures expérimentales[1] de l'air intérieur où nous avons montré que les températures de l'air de la serre mesurées et calculées se rapprochent l'une de l'autre, puisque la concordance entre les valeurs est jugée satisfaisante, l'écart étant de l'ordre de 0,2 %.

En résumé, nous recommandons :

- De contrôler le climat de la serre chauffée au moyen d'un système de régulation.
- D'ajouter dans le modèle une source de courant simulant les multi- réflexion, si l'on considère que l'air est semi-transparent du point de vue radiatif.
- D'utiliser une méthode d'optimisation (par la méthode linéaire du Simplex par exemple), lors de la phase du calage du modèle.

Bibliographies

Bibliographies

- [1]-Youcef BABI;« Exploitation de l'énergie géothermique pour le chauffage des serre agricole »,Thèse de magistère ;Centre Universitaire de Ouargla ,2001.
- [2]- Henri CORTES;Joseph BLOT ; « Transfert thermique Application à l'habitat étude par méthode nodale »,ellipses/édition marketing S.A ,1999 .
- [3]-BAILLE,A;DAUPLE,P;BERNINGER,E ;« INRA-et les cultures sous serre » ; INRA France .
- [4]-C.Monteil;M.Amouroux; « Analyse du comportement thermique du sol d'une serre agricole par simulation dynamique », France, les édition de physiue1997 .
- [5]-André MUSY;Marc SOUTTER ; « Physique du sol » ,France .
- [6]-Louis BERTOLO;Bernard BOURGES ; « Données climatique utilisée dans les bâtiments » , (B2015)Technique de l'ingénieur France,1992 .
- [7]-Claude BELORME; « Rayonnement solaire utilisable gisement solaire » , Professeur à l'Université d'Avignon France ,1987 .
- [8]-BOULARD Theiry ; « Caractérisation et modélisation du climat des serres :Application à la climatisation estivale »,Thèse de Doctorat :Ecole Nationale Supérieure de Montpellier France,1996 .
- [9]-C.Tavares; A.Gonçalves ,P.Castro ;D.Loureiro;A.Joyce; « Modeling an production greenhouse » ,Renewable Energy ,2001 .
- [10]-J.F;SACADURA;« Initiation aux transfert thermique » ,Technique et documentation France,1993 .
- [11]-WWW.UTILS.SOLAIRES.COM/ Glossaire/Terminologie du rayonnement et processus radiatif .
- [12]-SELLAMI Mohammed Hassen ; « Utilisation de l'énergie solaire pour la déminéralisation des eaux saumâtre dans le Sud Algérien », Centre Universitaire de Ouargla,2000 .
- [13]-CAPDEROU ,M; « Atlas solaire de l'Algérie » ,Ecole polytechnique d'architecture et d'urbanisme ;Tome(1)Volume(1),1987 .

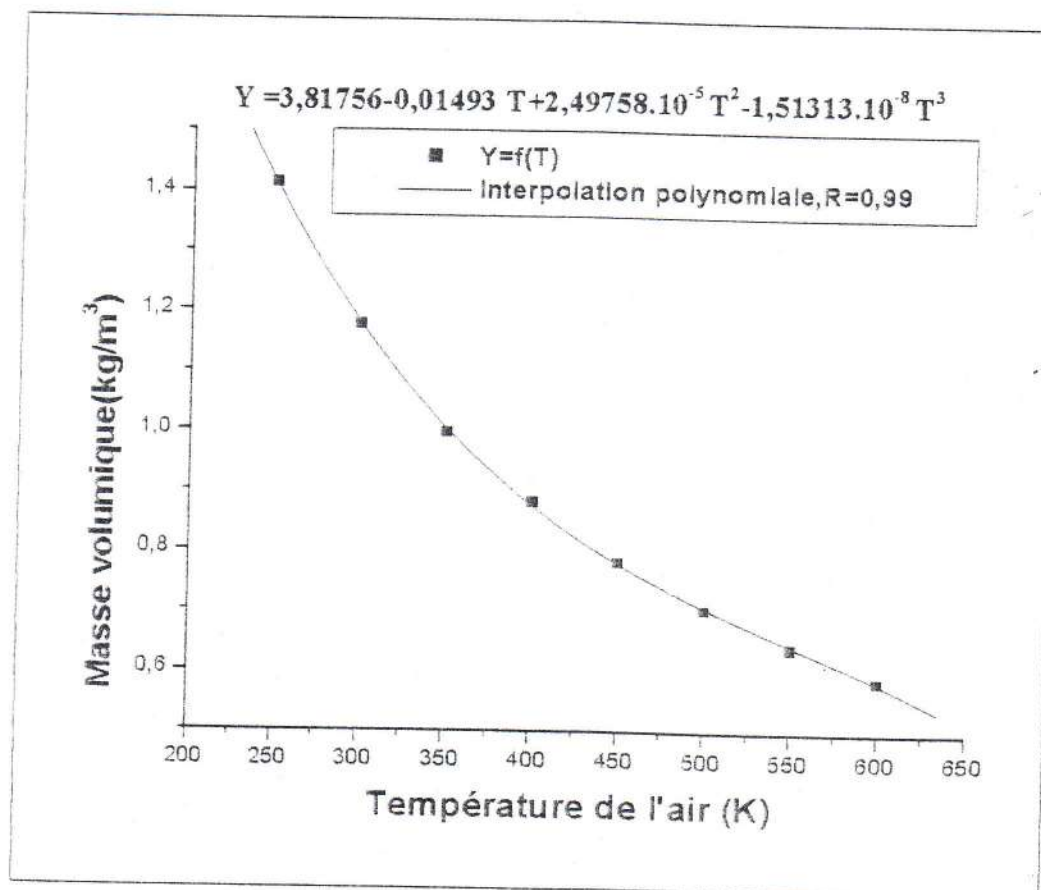
- [14]-COMARY,Y ;NIKOLAS,C ; « La thermique des serres » ,Collection de la direction des études et recherche d'électricité de France,1985 .
- [15]-CAPDEROU ,M ; « Atlas solaire de l'Algérie » ,Ecole polytechnique d'architecture et d'urbanisme ;Tome(1)Volume(2),1987 .
- [16]-HADJADJ,Mohamed; « Vieillissement naturel de films en polyéthylène basse densité utilisés comme couvertures de serres agricoles »,1996 .
- [17]-KITTAAS,C ; « Contribution théorique et expérimentale à l'étude du bilan énergétique d'une serre » ,Thèse de Docteur ingénieur Perpignan,1980 .
- [18]-M.SOUSSE ;L.SBITA ;M.ANNABI ;« Solar Energy and Environment proceedings » ,Actes du colloque énergie solaire et environnement Agadir. Maroc,1996 .
- [19]-Bernard, Eyglunet ; « Manuel de thermique » ,ingénieur INPC France, 2000 .
- [20]- J.Taine, J.P.Petit ; « Transfert thermique » , Ecole d'ingénieurs/2^e Cycle universitaire 2^e édition, Dunod, Paris 1995 .
- [21]-Gilles, LEFEBVRE; « Comportement thermique et dynamique des bâtiments:simulation et analyse » ,(B2041)Technique de l'ingénieur France .
- [22]-Riadh, JEMAA;Thierry, BOULARD,« Besoins en eau et pilotage de l'irrigation sous serre » , France ,1991 .
- [23]-John, A ;DUFFIE;WILLAMA;BECKMAN; « Solar Engineering and thermal processes » ,A.WILEY-Inter science publication ,1980.
- [24]- J.M.CAMASSERIAUX ;« Conversion thermique du rayonnement solaire » , Paris,1984 .
- [25]- Jean-Bernard SAULNIER ;« La modélisation et ses applications aux transferts couples et au contrôle actif » ,Thèse de docteur sciences physiques,1980 .
- [26]- Yves, JANNOT; « Le rayonnement solaire » , 2003 .
- [27]-Sandor FUZESEY; « Polyéthylène basse densité » ,(A3310)Technique de l'ingénieur France ,1996 .
- [28]-Sandor FUZESEY; « Polypropylènes » ,(A3320)Technique de l'ingénieur France ,1991 .
- [29]-Michel CHATAIN;Philippe HERVE ; « Propriétés thermooptiques de plastiques » , (A3145)Technique de l'ingénieur France ,1998 .

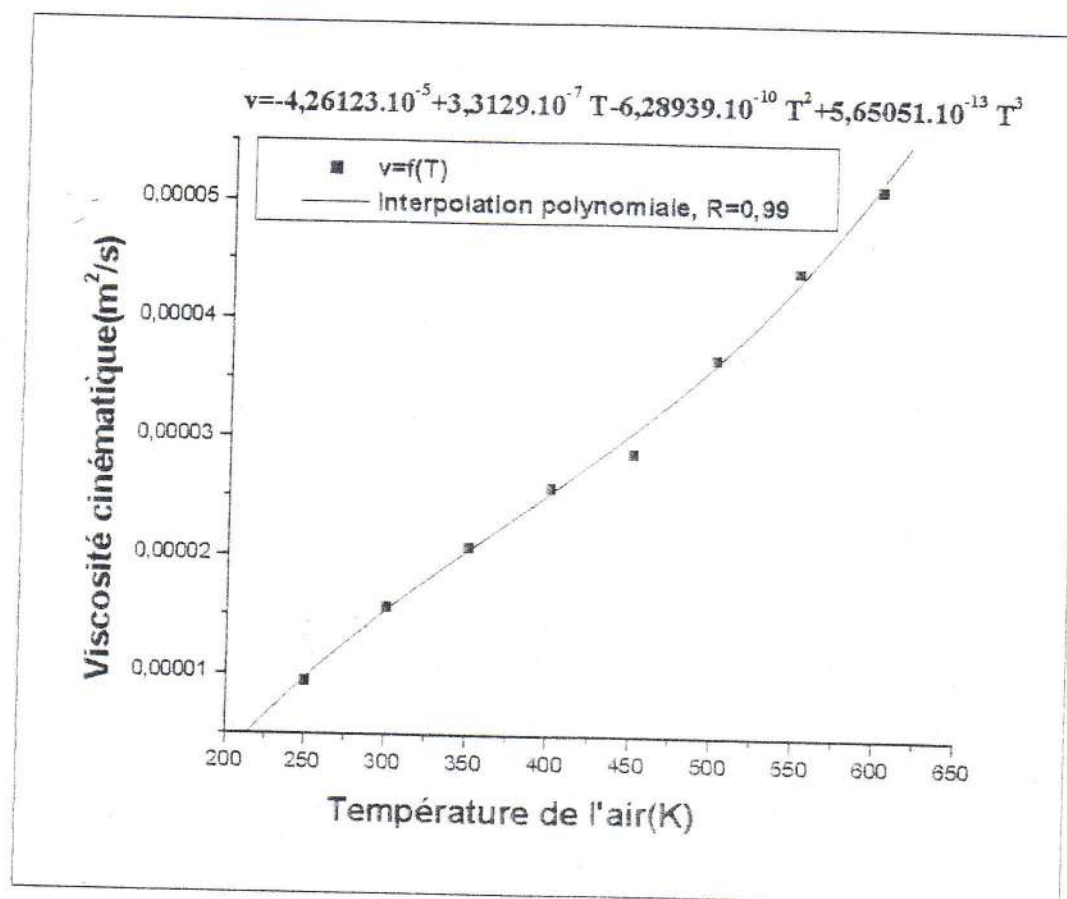
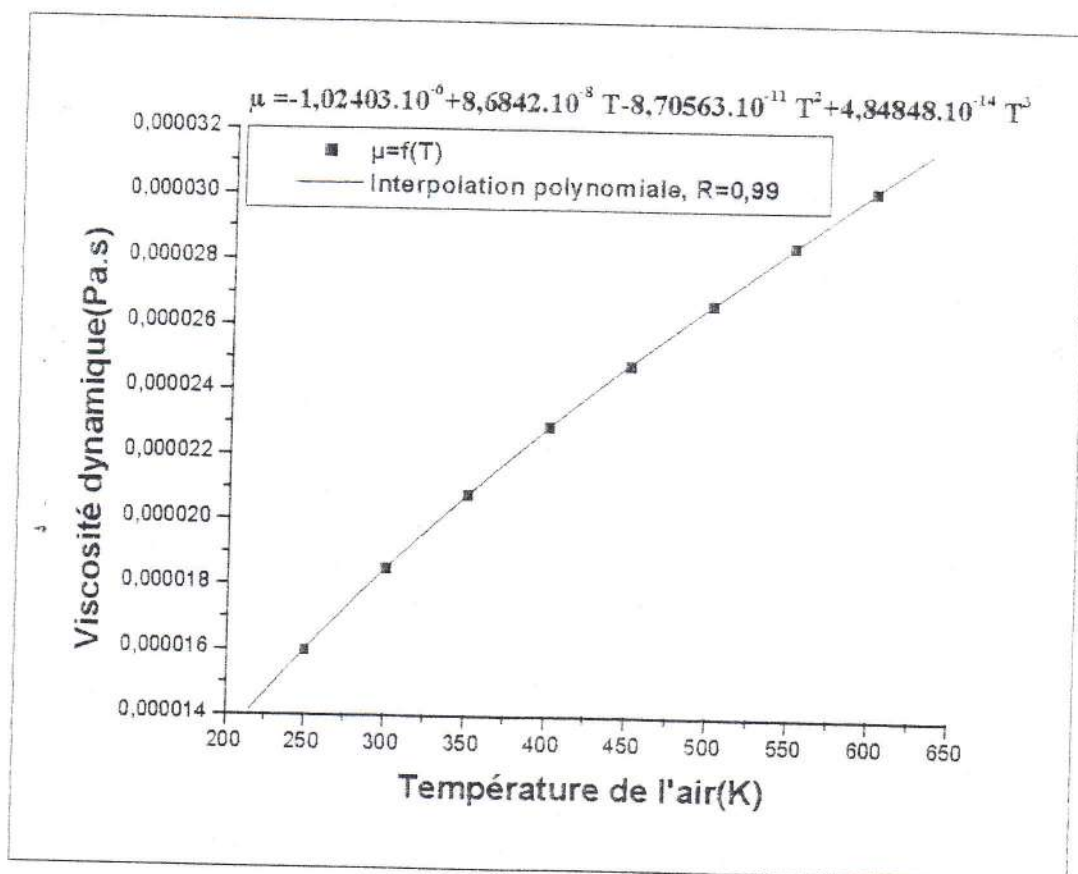
Annexes

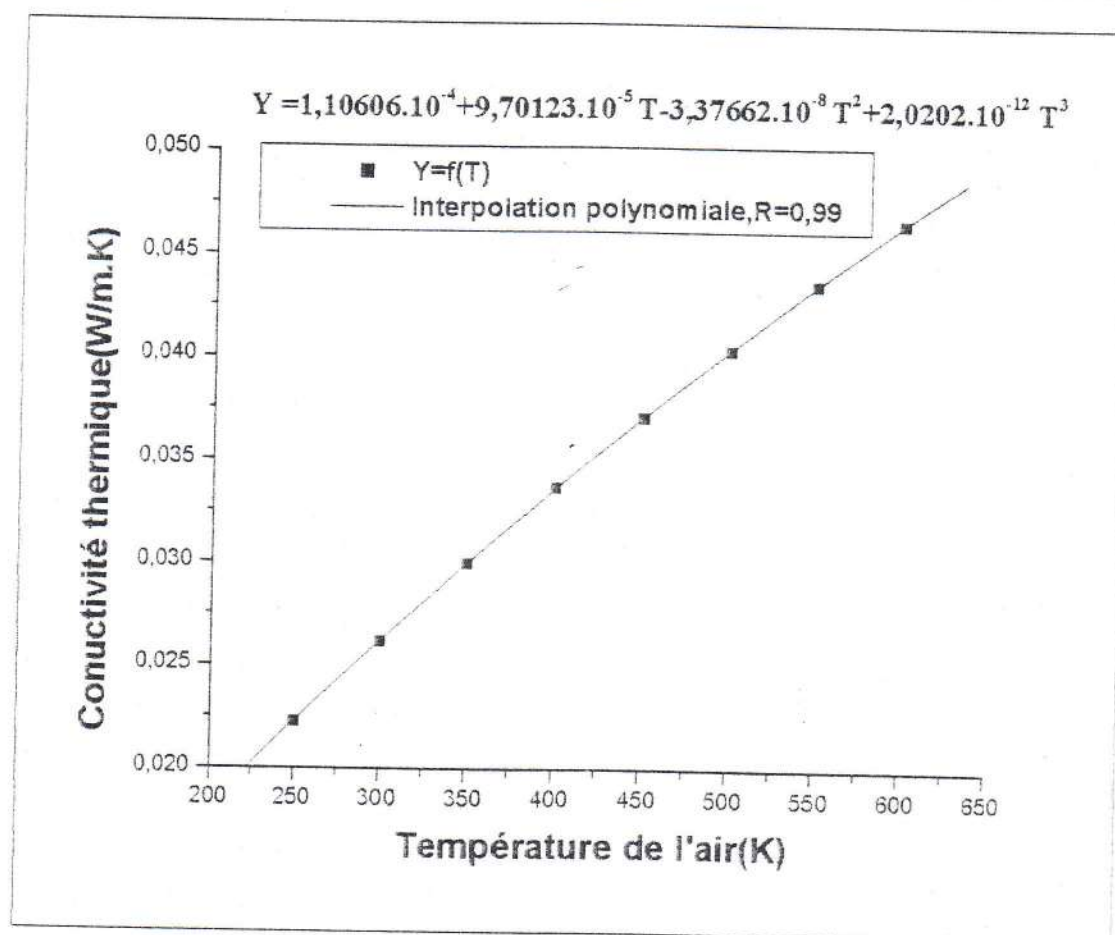
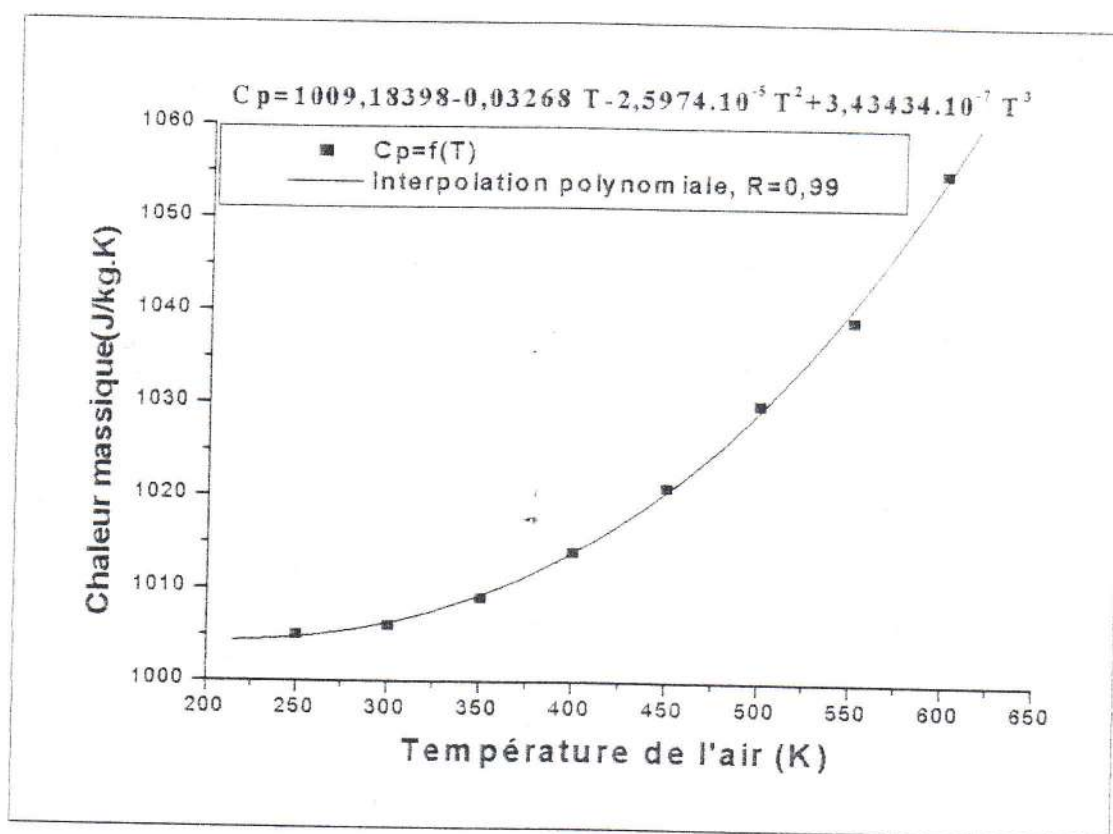
Annexe A

LES INTERPOLATIONS POLYNOMIALES des propriétés physiques de l'air sec.

T(K)	ρ (kg/m ³)	μ (Pa.s)	ν (m ² /s)	C_p (J/m.K)	λ (W/m.K)
250	1,413	$1,60 \cdot 10^{-5}$	$9,49 \cdot 10^{-5}$	1005	0,0223
300	1,177	$1,57 \cdot 10^{-5}$	$1,57 \cdot 10^{-5}$	1006	0,0262
350	0,998	$2,08 \cdot 10^{-5}$	$2,08 \cdot 10^{-5}$	1009	0,0300
400	0,883	$2,59 \cdot 10^{-5}$	$2,59 \cdot 10^{-5}$	1014	0,0337
450	0,783	$2,89 \cdot 10^{-5}$	$2,89 \cdot 10^{-5}$	1021	0,0371
500	0,705	$3,69 \cdot 10^{-5}$	$3,69 \cdot 10^{-5}$	1030	0,0404
550	0,642	$4,43 \cdot 10^{-5}$	$4,43 \cdot 10^{-5}$	1039	0,0436







Annexe B

PROGRAMME VISUAL FORTRON

de le rayonnement solaire global de 13.01.2000

```
program RSG
  y=5.40
  g=31.95
  b=15.
  pe=3.14159
  g=(g*pe)/180.
  b=(b*pe)/180.
  open(13,file='bg.out',status='new')
  nj=13
  x=(360./365.)*(nj-81)
  x=(x*pe)/180.
  et=(9.87*sin(2*x))-(7.53*cos(x))-(1.5*sin(x))
  et=et/60.
  v=((360./365.)*(284.+nj))
  v=(v*pe)/180.
  d=23.45*sin(v)
  d=(d*pe)/180.
  do 30  TL=1,24
  TU=TL-1
  tsm=tu+(y/15.)
  tsv=tsm+et
  w=15.*( tsv-12.)
  w=(w*pe)/180.
  sh=(sin(g)*sin(d))+(cos(g)*cos(d)*cos(w))
  h=asin(sh)
  if(sh.lt.0)then
    g1=0
    g2=0
```

```

g3=0
else
a1=1150.
b1=1.15
g1=a1*(sh**b1)
a2=1080.
b2=1.22
g2=a2*(sh**b2)
a3=990
b3=1.25
g3=a3*(sh**b3)
endif
write(13,*) nj,TL,g1,g2,g3
30 continue
close(13)
end
13 1.000000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
13 2.000000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
13 3.000000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
13 4.000000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
13 5.000000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
13 6.000000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
13 7.000000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
13 8.000000 38.52866 29.42608 24.68697
13 9.000000 220.3515 187.1385 164.3066
13 10.00000 393.7191 346.3992 308.7767
13 11.00000 529.7701 474.5960 426.3383
13 12.00000 611.7545 552.8629 498.5146
13 13.00000 630.4205 570.7753 515.0699
13 14.00000 583.7183 526.0214 473.7317
13 15.00000 476.8128 424.4244 380.2222
13 16.00000 322.0959 279.9418 248.2336
13 17.00000 140.2158 115.8495 100.5228
13 18.00000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
13 19.00000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
13 20.00000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
13 21.00000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
13 22.00000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
13 23.00000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
13 24.00000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00

```

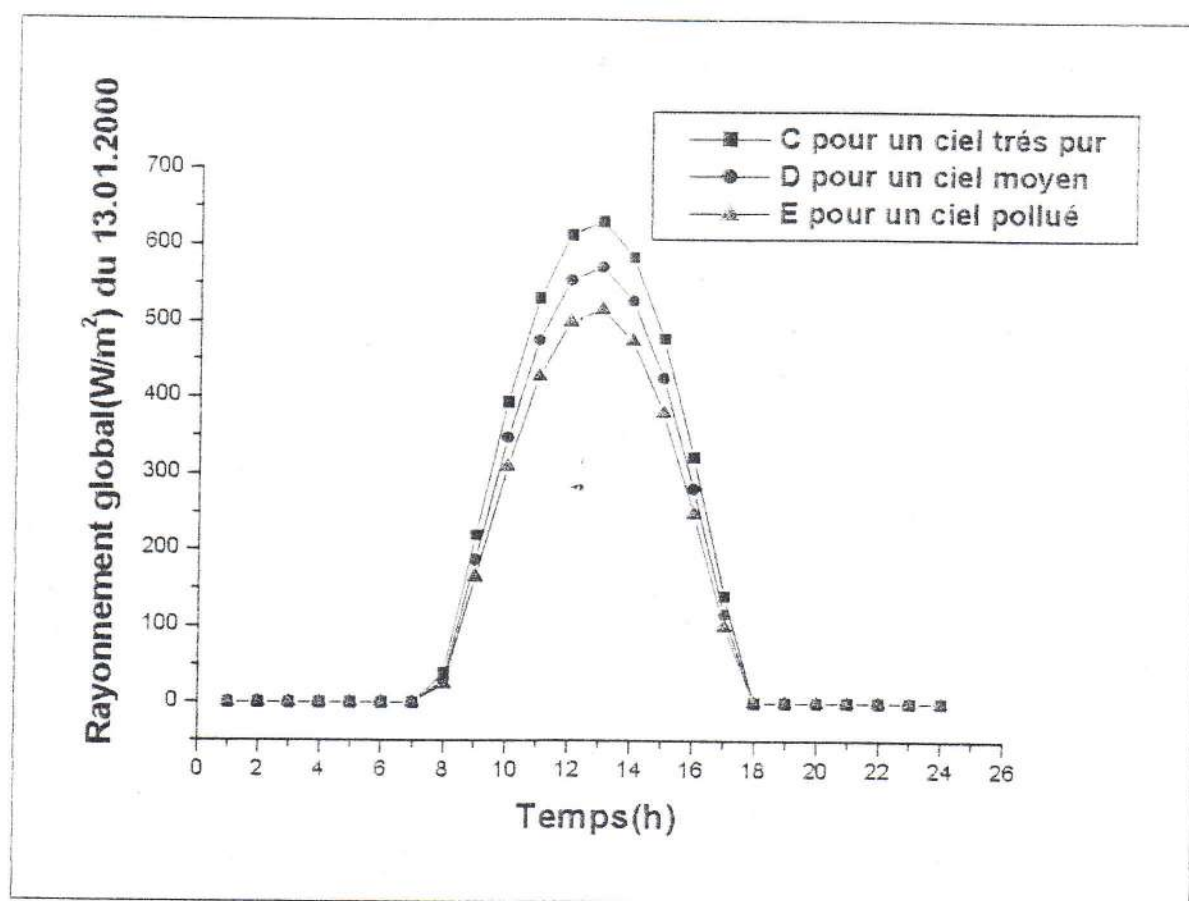


Figure : Rayonnement solaire global du 13.01.2000.

Résumé

ملخص:

إن هذا العمل يهدف إلى دراسة التعديل الحراري لمناخ البيت البلاستيكي مسخن بمياه جوفية . وعلى هذا الأثر نقسم هذا العمل إلى قسمين أولهما: تعديل مناخ البيت البلاستيكي، ثم تطبيق الموازنات الحرارية والكتلية، وحل المعادلات التفاضلية لهذا النظام .
والقسم الثاني بدوره ينقسم إلى جزئين: أولهما المحاكاة العددية للسلوك الحراري بواسطة برامجي Pspice ، والثاني التأكد من صحة النتائج المقاسة لدرجات الحرارة الداخلية للبيت البلاستيكي الموجودة على شكل ملحنى في مذكرة بابي 'إستغلال طاقة انمياة الجوفية من أجل تسخين البيوت البلاستكية' .
وأخيرا خاتمة وإقتراح بعض التوصيات في امثالية نموذج البيت البلاستيكي .

الكلمات الدالة: بيت بلاستيكي، تعديل، محاكاة عددية ، Pspice .

Résumé :

On se propose d'étudier le comportement thermique d'une serre agricole chauffée à l'eau géothermale et la modélisation de son climat intérieur.

A cet effet, nous avons consacré deux parties, la première comporte la modélisation du climat de la serre, après avoir établi les bilans thermiques et massiques, suivis de la résolution des équations différentielles qui en découlent.

La seconde partie prend en charge d'une part, la simulation du comportement thermique à l'aide du logiciel Pspice, et d'autre part, la validation des résultats de la modélisation à l'aide des mesures de températures de l'air de la serre existantes, figurant dans le mémoire de Babi : « Exploitation d'énergie géothermale pour chauffage des serres agricoles ».

En conclusion, quelques recommandations sont suggérées afin d'optimiser le modèle de la serre.

Mots clés : serre agricole, modélisation, simulation, Pspice.

Abstract

This work highlight to study the thermal behavior of a greenhouse heated by the geothermal water and to modeling its interior climate.

In this effect, we toke our attention to two parts. The former include establishing of thermal balances and to modeling climate of the greenhouse.

The later is divided into two sections :

First : Simulation of the thermal behavior aided by Pspice software.

Second : Validation of the modeling results helped by the measures of the greenhouse air temperature exciting as graphs in the work of Babi named « Exploitation of the thermal energy for heating the agricultural greenhouse ».

In conclusion, some recommendation are suggested in order to optimize the model of the greenhouse.

Keywords: greenhouse, modeling, simulation, Pspice.