

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAID – TLEMCCEN

FACULTE DES SCIENCES

UNITE DE RECHERCHE DES MATERIAUX ET ENERGIES NOUVELLES

THESE DE DOCTORAT D'ETAT

ES-SCIENCES EN PHYSIQUE

Présentée par :

M. Nacereddine BIBI-TRIKI

THEME

**CARACTERISATION ET ANALYSE DU COMPORTEMENT
THERMO-ENERGETIQUE DE LA SERRE AGRICOLE
IDENTIFICATION IN SITU DES PARAMETRES
D'UN MODELE DYNAMIQUE**

Soutenu le 04 Décembre 2004 devant le Jury d'examination composé de :

Président :	Mr N. CHABANE-SARI	Professeur à l'université de Tlemcen
Directeur de thèse :	Mr B. BENYOUCEF	Professeur à l'université de Tlemcen
Examineurs :	Mr M. BELHAMEL	Directeur de recherche CDER Alger
	Mr T. BENOUAZ	Professeur à l'Université de Tlemcen
	Mr A. SAIDANE	Professeur à l'ENSET Oran
	Mr A. ABENE	Professeur à l'Université de Valenciennes



DEDICACES

*Des terres arides dues à une sécheresse quasi-permanente
et une très forte démographie ont entraîné une mal nutrition
et un déséquilibre au sein des pays pauvres.*

Des hommes ont réagit, ont cherché et ont trouvé.

*Ils ont trouvé le moyen d'y remédier
en inventant la serre, le goutte à goutte, le film de couverture, les équipements
d'automatique de commande et de contrôle,
l'informatisation de la gestion du microclimat etc...*

A tous les scientifiques et chercheurs qui donnent leur vie pour la science et le progrès,

*A tous ceux qui oeuvrent pour l'autosuffisance alimentaire
et protègent les enfants contre la famine,*

A tous ceux qui travaillent pour le bien être et la prospérité de l'humanité :

*Ce travail leur est dédié
et s'il peut apporter une contribution, aussi infime soit elle,
alors le but de ce travail a été atteint.*

Nacereddine

REMERCIEMENTS

Monsieur M.A.R. EL SAYED ancien Recteur de l'université de Mansourah Egypte et Professeur au sein des Universités de Mansourah et d'Alexandrie. Je vous remercie pour la spontanéité de l'accueil et pour m'avoir introduit au sein de l'équipe de la Station Bio-climatologique d'Alexandrie. Je vous remercie pour vos précieux conseils et orientations Je remercie aussi toute l'équipe de chercheurs de la dite station pour leur étroite collaboration à ce modeste travail. Veuillez bien trouver ici l'expression de ma respectueuse reconnaissance.

Monsieur B. BENYOUCEF, Professeur à l'Université de Tlemcen Directeur de l'Unité de Recherche des Matériaux et des Energies Renouvelables et Doyen de la Faculté des Sciences, veuillez trouver ici l'expression de mes plus chaleureux remerciements pour l'aide que vous m'avez prodiguée tout le long de ce travail.

Monsieur N. CHABANE-SARI, Professeur à l'Université de Tlemcen, veuillez trouver ici ma profonde gratitude pour avoir bien voulu présider le Jury.

Monsieur M. BELHAMEL, Directeur de recherches CDER Alger, je vous adresse ici mes plus vifs remerciements d'avoir malgré vos nombreuses responsabilités accepté de consacrer une partie de votre temps à l'examen de cette thèse.

Monsieur A. ABENE, Maître de conférence et FIDR à l'Université de Valenciennes, je vous prie de trouver ici l'expression de ma profonde reconnaissance pour avoir bien voulu examiner ce document et participer au Jury.

Monsieur T. BENOUAZ, Professeur à l'Université de Tlemcen

Monsieur A. SAIDANE Professeur à l'ENSET d'Oran,

vous avez bien voulu accepter de faire partie du jury et Soyez-en vivement remercié.

Mes remerciements les plus sincères vont tout aussi particulièrement à Mr H. BENSALAH chargé de cours à l'Université de Tlemcen pour ses conseils tout aussi précieux.

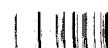


SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
Introduction.....	2
CHAPITRE I : MILIEU SERRE.....	5
I- La serre et la plante	6
I.1- La plante.....	7
I.1.1- Besoins des plantes.....	8
I.1.2- Croissance et développement	10
I.1.3- Influence de la température sur la plante.....	11
I.1.4- Vitesse moyenne de croissance	12
I.1.5- Vitesse de développement	15
I.2- La serre.....	15
I.2.1- Type de serre	17
I.2.2- Matériaux de charpente	17
I.2.3- Matériaux de couverture.....	18
CHAPITRE II : CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE	28
PRINCIPE D'IDENTIFICATION DES PARAMETRES.....	28
II.1- Problématique générale de la gestion des serres	29
II.1.1- Les différents niveaux de décision	29
II.1.2- Domaine d'intérêt dans la gestion du climat	31
II.2- Position du problème	33
II.2.1- Nécessité de modèles dynamiques	33
II.2.2- Approche utilisée	34
II.3- Concepts de l'approche « système »	34
II.3.1- Rappel des fondements de la théorie des systèmes	35
II.3.2- Utilité d'un modèle.....	37
II-3-2-1- Modèle de connaissance	38
II-3-2-2- Modèle de comportement	39
II-3-2-3- Modèle simplifiés.....	39
II.4- Objectif de l'étude	40
II.5 Principe de l'identification.....	41
II.6- Méthodes d'identification	42



II-6-1- Eléments nécessaires à l'identification	42
II-6-2- Méthodes locales et globales	43
CHAPITRE III : MODÉLISATION PHYSIQUE DES SERRES CHOIX D'UN	
MODÈLE SIMPLIFIÉ	45
III.1- Principes de base.....	46
III.1.1- Les différents types de modèle physique de serres	46
III.1.2- Spécificité de la thermique des serres par rapport à celle des bâtiments d'habitation.....	48
III.2- Les bases du modèle simplifié.....	50
III.2.1- Hypothèses simplificatrices et équations de base.....	50
III.2.2- Explication des paramètres et des flux.....	53
III.2.2.1- Les coefficients de transfert.....	53
III.2.2.2- Formulation simplifiée du flux de transpiration.....	55
III.2.2.3- Modélisation du taux de renouvellement de la serre	56
III.3- Formulation et intégration du modèle simplifié : Equation du bilan d'énergie	57
III.4- Approche du bilan d'énergie de la serre.....	58
CHAPITRE IV : DISPOSITIF EXPERIMENTAL	59
IV.1- Description de la serre et ses équipements	60
IV.1.1- Microordinateur : Fig 20	62
IV.1.2- Les capteurs utilisés	65
IV.2- Conception du Logiciel SERRISTE	66
IV.3- La culture.....	67
CHAPITRE V : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET VALIDATION	68
V.1- Validation de la théorie.....	70
V.2- Les difficultés expérimentales rencontrées	71
V.2.1- Problèmes posés par la qualité et la nature des mesures d'entrée et de sortie	72
V.2.2- Problèmes inhérents au comportement du système.....	73
V.3- Résultats	74
V.3.1- Identification des paramètres de l'équation du bilan d'énergie utilisant le rapport de Bowen (eq. 12, 20 et 21).....	74
V.3.2- Etude de la sensibilité des paramètres identifiés.....	87



V.4- Validation	89
CHAPITRE VI : APPORT ENERGETIQUE	94
VI.1- Apport énergétique d'une serre.....	95
VI.2- hypothèses	96
VI.3- Echanges thermiques au niveau de la paroi de nuit	96
VI.3.1- Expression de la puissance d'échanges par rayonnements IR de nuit au niveau de la paroi	97
VI.3.2- Expression de l'équation d'échanges par conduction- convection au niveau de la paroi	98
VI.3.3- Le bilan thermique de nuit au niveau de la paroi aura pour expression	98
VI.4- Echanges thermiques au niveau de la paroi de jour.....	98
VI.5- Méthode d'estimation des besoins énergétique de la serre	99
VI.5.1- Estimation du refroidissement nocturne par rayonnement infrarouge..	99
VI.5.2- Estimation des déperditions par convection-conduction au niveau de la paroi de la serre (Q_{ccs})	100
VI.5.3- Estimation des déperditions par fuite (Q_{fs})	101
VI.6- Résultats.....	101
VI.7- Recommandations pour l'économie d'énergie par réduction de perte de chaleur	104
VI.7.1- Echanges par conduction-convection.....	104
VI.7.2- Echanges radiatives.....	105
VI.7.3- Echanges par renouvellement d'air (fuites)	105
VI.7.4- Effets de chauffage par augmentation de gain de chaleur	106
CHAPITRE VII : DISCUSSION GENERALE.....	107
CONCLUSION	112
BIBLIOGRAPHIE	116



INTRODUCTION

INTRODUCTION

La culture des plantes sous serre a connu ces dernières décennies une application croissante en raison d'une part, de l'élévation du niveau de vie de la population, d'autre part de l'exigence accrue de produits frais en fruits et légumes tout au long de l'année. Cet état de fait s'accompagne d'une demande à la consommation de plus en plus forte et pressante.

L'étalement de la production agricole sous serre s'est traduit par une exploitation efficace des terres agricoles et par l'utilisation rationnelle d'une main d'œuvre de plus en plus réduite, spécialisée et permanente.

La serre conçue à l'origine comme une simple enceinte limitée par une paroi transparente, tel est le cas de la serre tunnel conventionnelle largement répandue dans le Maghreb, amplifie certaines caractéristiques du climat extérieur et accuse des conditions peu favorables aux cultures. Ce type de serres dans les pays du bassin méditerranéen est confronté au refroidissement nocturne intense, caractérisé parfois par l'inversion des températures intérieures et par des problèmes de surchauffe et de faible hygrométrie durant les saisons estivales. Les températures extrêmes observées à l'intérieur des abris constituent un facteur nuisible capable de freiner le développement de la plante, et dans le meilleur des cas, elles pénalisent le rendement et la qualité des produits.

Dans les pays développés, la serre solaire passive est largement répandue. Le mot d'ordre de la conception de ces serres est l'avarice : laisser entrer le plus de soleil possible, le stocker, et en laisser repartir le moins possible. La conception de la serre solaire passive se distingue de la serre tunnel conventionnelle par :

- la combinaison de surfaces transparentes et de surfaces opaques ;
- la présence de « masses thermiques » sous abri ;
- la possibilité d'isolation nocturne.

L'orientation du concept de la serre, par l'amélioration de l'effet de serre, la diminution des déperditions par rayonnement I.R., par convection - conduction et par la fuite, réduit l'apport énergétique nécessaire à la climatisation, d'une proportion appréciable. L'aération naturelle et mécanique reste pour le moment, le

moyen le plus utilisé, le plus pratique et le plus économique quoique les mécanismes qui la régissent soient encore mal connus.

La climatisation des serres permet de maintenir les cultures dans des conditions compatibles avec les objectifs agronomiques et économiques de l'agriculteur. Elle peut être rentable dans la mesure où la structure de la serre est améliorée, le choix du type de couvertures et des installations d'accompagnement sont judicieusement choisies. Les systèmes de climatisation traditionnels utilisés dans l'habitat sont trop chers et ne peuvent être adaptés aux conditions de production agricole sous serre.

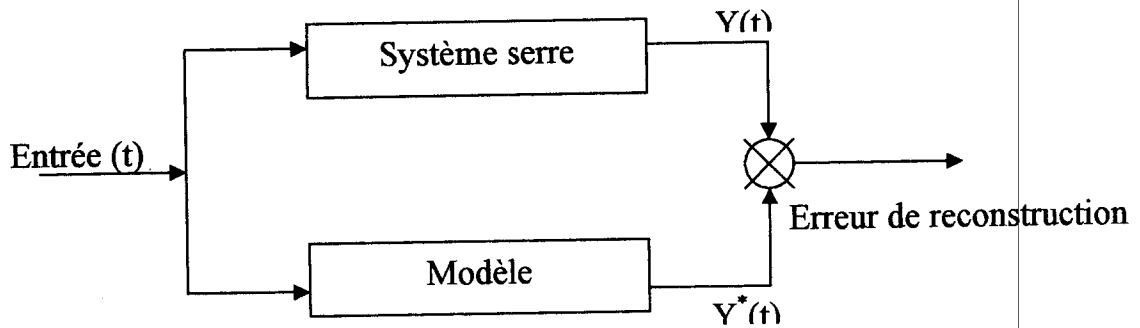
Les serristes ont généralement recours aux méthodes de type « passif », comme la ventilation statique (ouvrants), les écrans d'ombrage, le refroidissement par évaporation, et plus rarement de type « actif », comme la ventilation dynamique (extraction d'air). Ces méthodes sont moins coûteuses, mais plus difficiles à gérer et à optimiser. Elles font appel à des mécanismes physiques qui ne sont pas bien étudiés et encore moins maîtrisables. Les études de la climatisation et son intégration dans le système serre constituent un domaine de recherche où beaucoup de progrès restent à réaliser.

A partir de ce constat, nous avons entrepris cette étude. L'objectif principal est de caractériser le fonctionnement du système complexe que constitue la serre avec ses différents compartiments (sol, couverture, culture, environnement intérieur et extérieur), en utilisant des modèles qui permettent de reproduire l'essentiel des propriétés, des mécanismes, des interactions entre les différents compartiments et en identifiant les paramètres de ces modèles. L'identification qui est au centre de cette démarche est un processus de recherche d'un modèle mathématique qui minimise les écarts du système réel par rapport au système modélisé. Elle comporte deux étapes :

- L'identification des paramètres du modèle qui permet de caractériser puis de simuler l'évolution dynamique de l'état thermique de la serre, obéit à une méthodologie d'identification de modèles réduits de serre qui fait appel aux méthodes d'identification et de réduction de modèles élaborés dans le cadre d'étude des systèmes thermiques appliqués aux bâtiments.

- La prédiction du système qui succède à sa caractérisation doit passer nécessairement par la validation du modèle.

Notre travail s'intéresse aux deux étapes précitées, dont une bonne partie sera consacrée à la caractérisation du système « serre ». C'est sans doute l'une des tâches la plus délicate à réaliser dans l'identification, car elle doit aboutir à la fourniture de valeurs identifiables qui présentent néanmoins un certain sens physique.



Prédiction de la sortie

La prédiction de la température interne de la serre, nous amène à envisager l'apport énergétique de complément nécessaire à la croissance et au développement de la plante. Ce modèle établi dans le cadre de notre publication, prévu initialement pour l'estimation prévisionnelle d'énergie des projets d'investissement dans le domaine des serres et ayant pour mission d'évaluer l'incidence énergétique dans la gestion du microclimat, sera aujourd'hui confronté à la consommation d'énergie réelle de la serre expérimentale.

CHAPITRE I

MILIEU SERRE

I- LA SERRE ET LA PLANTE

La serre est considérée comme un milieu très confiné où plusieurs composantes s'échangent entre-elles. Les principaux facteurs du milieu interne à une serre, sont : la température, la lumière, l'humidité. Il est bien connu "effet de serre", que le sol et les plantes situés sous abris recevant les rayons du soleil, s'échauffent bien plus qu'à l'air libre : ceci est dû à la suppression du vent et à la réduction de la convection de l'air, mais aussi aux propriétés physiques de la couverture de la serre (assez transparente pour le rayonnement solaire, mais autant absorbante pour l'infrarouge émis par le sol placé à température ordinaire, d'où effet de "piégeage" des radiations solaires). En été une surchauffe dangereuse est à craindre, la ventilation naturelle ou forcée (mécanique) est indispensable pour refroidir la serre. En hiver, le chauffage s'impose en général soit par couche (chaleur de fermentation du fumier ou des feuilles mortes) ainsi que d'autres procédés biotechnologiques, soit par d'autres sources d'énergie (électricité, fuel, énergie solaire, etc...). Quant au facteur lumière, la plupart des serres sont tributaires de la lumière solaire existant dans chaque lieu à chaque saison. Seules des serres très perfectionnées, comme il en existe pour des cultures très rentables (orchidées, par exemple) ou encore dans les installations qui accompagnent les phytotrons, sont munies de batterie de tubes fluorescents s'allumant automatiquement quand l'éclairage céleste baisse. Comme une partie appréciable de la lumière disponible est occultée par la charpente de la serre, on a cherché à en réduire l'ombre portée en remplaçant le bois par le métal profilé ou même en supprimant l'ossature: cela est réalisé par des serres gonflables, constituées d'un film souple en plastique, maintenu en forme par une légère surpression d'air. Ce dernier système peut recevoir une régulation automatique de la température par ventilation forcée et peut facilement être démonté et remonté ailleurs ce qui est un avantage par rapport aux serres classiques. Pour uniformiser l'éclairement moyen reçu par les plantes en une journée. On a inventé aussi des serres rotatives qui tournent avec le soleil et qui sont plus satisfaisantes pour la culture expérimentale de grandes plantes (tropicales notamment), quoique plus économiques à l'usage, que les phytotrons ou enceinte à éclairage

artificiel. L'humidité enfin est augmentée dans les serres par la transpiration de la plante, par l'absence de vent et par l'évaporation d'eau d'arrosage en enceinte relativement close. Laissée excessive l'humidité, favorise la croissance de moisissures et autres champignons ; elle doit donc être contrôlée, ce qui se fait même automatiquement dans les serres perfectionnées. De toutes façons, dans les serres les facteurs climatiques ne sont pas maintenus à des valeurs strictes et indépendantes, contrairement à ce qui se fait dans un phytotron. L'éclairement et la température sont liés par l'effet de serre même, et varient assez largement selon l'heure et la saison. L'évolution va, d'une part dans le sens de l'automatisation jouant sur un ou plusieurs facteurs (température, humidité de l'air et arrosage du substrat) et d'autre part, dans le sens d'une utilisation de matériaux nouveaux pour la couverture (verre ou plastique à effets spéciaux, isolants, colorés, à transparence variable, etc...), en vue de mieux adapter les serres au climat et aux besoins des plantes.

Les serres permettent de produire des végétaux dans des conditions économiques rentables : fruits et légumes hors saison ou bien dans des régions froides ou désertiques où il faudrait les transporter au prix fort ou fleurs, pour en être produite en avant saison ou même à n'importe quelle saison (cas des jacinthes et des tulipes) ou être débarrassées des parasites. Ce sont donc des outils fort utiles à l'horticulteur ou au cultivateur spécialisé sans compter leur utilisation en recherches physico biologique, technologique et agronomique.

1.1- La plante

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

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

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

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

1.1.1- Besoins des plantes

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

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

- La photosynthèse : grâce à l'assimilation chlorophyllienne, la plante absorbe du gaz carbonique, rejette de l'oxygène. Cette assimilation n'est possible qu'en présence de la lumière. Dans certaines limites, elle devient autant plus active que la lumière est intense.
- La respiration : La plante absorbe de l'oxygène et rejette du gaz carbonique. La respiration ne nécessite pas de lumière et se poursuit aussi bien la nuit que le jour. Elle brûle les réserves de la plante, alors que la photosynthèse les élabore.
- La transpiration : La plante rejette de la vapeur d'eau

Les facteurs : température, lumière, humidité et teneur en gaz carbonique agissent simultanément et d'une façon dépendante.

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

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

Malgré ces contraintes l'INRA propose des plages de températures à respecter en fonction du stade de développement de la plante (tableau 1).

Le tableau 1, que nous propose l'INRA, classe les plantes maraîchères en quatre catégories, suivant leurs exigences thermiques :

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

Tableau 1 : Besoins des espèces légumières cultivées sous abris en fonction du stade de développement (INRA)

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

La confrontation de ces exigences aux données climatiques conduit à dire que les serres froides ne permettent pas d'atteindre un gain significatif de précocité : même dans le sahel, le chauffage de nuit semble se justifier. L'expérience de ces dernières années montre que le rendement des cultures sous serres serait largement amélioré si un chauffage d'appoint permettant d'avancer davantage le calendrier de production par rapport à celui des cultures de plein champ.

1.1.2- Croissance et développement

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

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

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

1.1.3- Influence de la température sur la plante

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

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

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

Les températures de profondeur du sol, d'en dépend une large mesure de développement des plantes sont repérées à différentes profondeurs caractéristiques. Par contre la température des surfaces foliaires est difficile à approcher. La différence des températures entre la surface du sol et sa profondeur se traduit par un flux ϕ correspondant aux échanges par conduction.

$$\phi = (T_1 - T_2) / (Z_1 - Z_2)$$

Cette relation est uniquement valable dans le cas du régime permanent.

Dans le sol, la température varie avec la profondeur et se caractérise par un déphasage entre l'onde thermique de surface du sol et celle à une profondeur donnée.

L'importance de ces phénomènes varie en fonction des caractéristiques du sol (texture, structure, humidité etc...)

Conséquences des températures :

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

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

I.1.4- Vitesse moyenne de croissance

L'enregistrement des vitesses de croissance en fonction des températures a été réalisé expérimentalement par divers auteurs. Il conduit à des formes de courbes comparables mais peu différentes selon les espèces. LEHENBAUER établit la loi d'action de la température sur la croissance en mesurant l'élongation de plantules de maïs. Après un départ exponentiel, la vitesse de croissance suit une fonction linéaire entre 16°C et 30°C pour décroître ensuite, la courbe est dissymétrique (Figure 1)

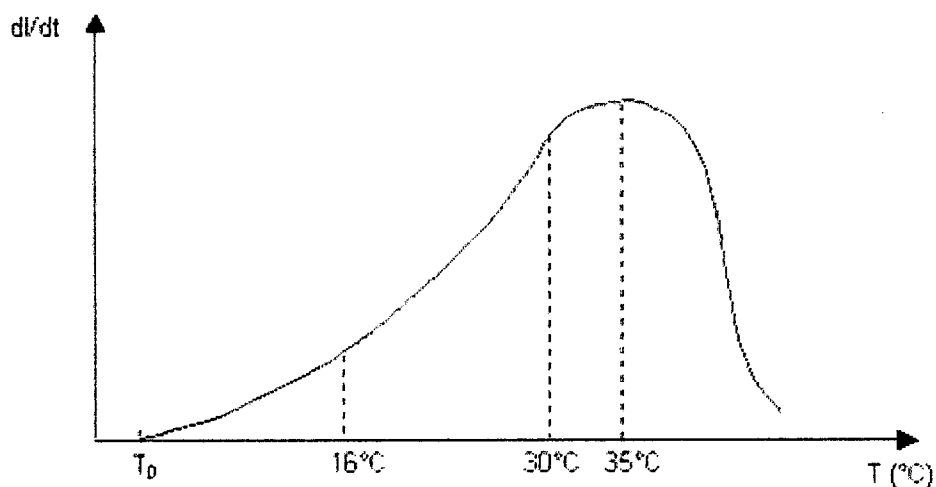


Figure 1 : Courbe de la vitesse de croissance de plantules de maïs d'après LEHENBAUER

La différence de vitesse de croissance pour deux végétaux de la même espèce, ne peut provenir que du coefficient K_T . Celui-ci est variable avec la température.

Les vitesses correspondantes à un même état d'avancement par rapport au stade final L_p , stade identique dans les deux cas dépendent des températures T_1 et T_2 imposées à la culture des plantes de la même espèce (Figure 2 et 3).

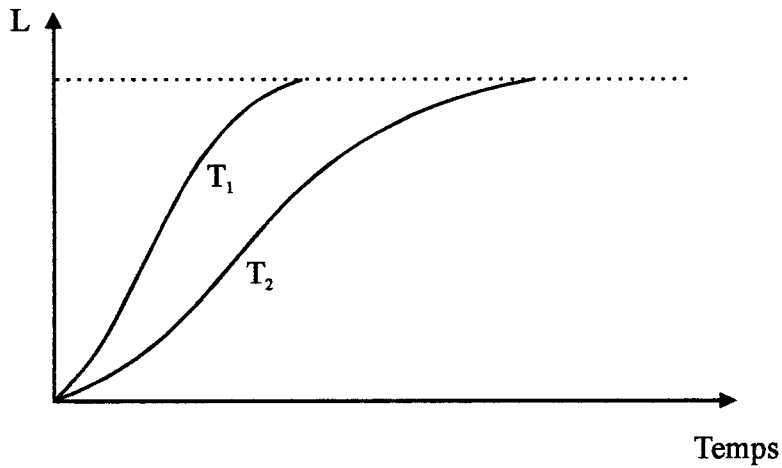


Figure 2 : Courbes d'allongement en fonction du temps pour T_1 et T_2

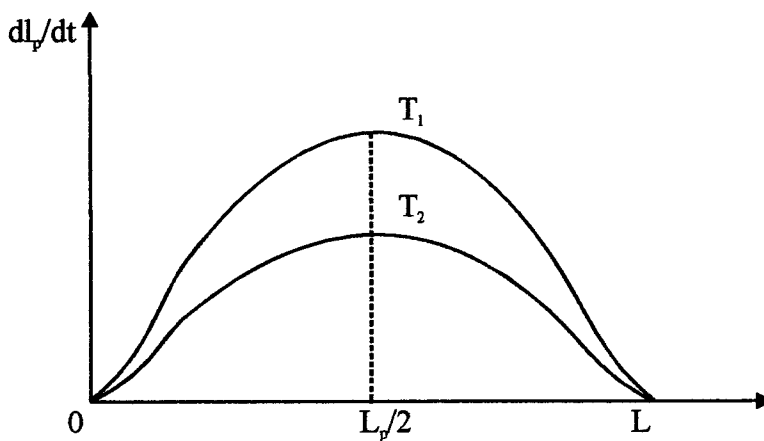


Figure 3 : Vitesse de croissance en fonction de l'allongement pour T_1 et T_2

Au-dessus de T_0 , la plante commence à s'allonger ou à augmenter de poids. D'après une étude accomplie au laboratoire de l'INRA en France, la vitesse de croissance doublait chaque fois que la température augmentait de 10°C , Loi du Q10 (biologie).

D'après l'hypothèse d'ARRHENIUS la vitesse de réaction chimique est multipliée par un facteur constant à chaque fois que la température augmente de 10°C. La vitesse de développement est fonction exponentielle de la température, on peut donc écrire:

$$m_T = a e^{bT}$$

où : a: la vitesse de la réaction chimique ou de développement

$$Q_{10} = m_{(T+10)}/m_T = ae^{b(T+10)}/ae^{bT} = e^{10b}$$

où : $m_T = a(Q_{10})^{T/10}$

Remarquons qu'une telle hypothèse ne peut s'appliquer à toutes les zones de températures. Lorsque la température est comprise entre T_0 et T_{max} , on peut dans certains cas confondre la courbe de croissance avec une droite (ajustement linéaire).

Le développement de la plante ne peut avoir lieu si le suc qui remplit ses cellules est en mouvement. La rapidité de ce mouvement est régit par la température jusqu'à un optimum à partir duquel il diminue assez rapidement.

La température semble n'avoir qu'une action très faible, sinon nulle sur la taille de la plante (L_P), mais elle agit sur la vitesse de croissance, autrement dit sur le temps mis pour la culture de la plante.

D'après l'hypothèse de ROBERTSON, la vitesse de croissance est définie par :

$$V_c = dl_p/dt = K_T \cdot l_p(L_P - l_p)/L_P$$

Selon les travaux de DURAND, le coefficient K_T correspond effectivement à l'expression :

$$K_T = dl_p/dt (L_P/l_p(L_P - l_p))$$

I.1.5- Vitesse de développement

Les modifications qui se succèdent au cours de l'évolution de la plante, permettent de définir les phases de son développement.

Par analogie avec la vitesse de croissance, la vitesse de développement sera la pente de la droite joignant les points relatifs à deux étapes de développement. La vitesse de développement a pour expression :

$$v_d = (L_p - l_p) / (t_2 - t_1)$$

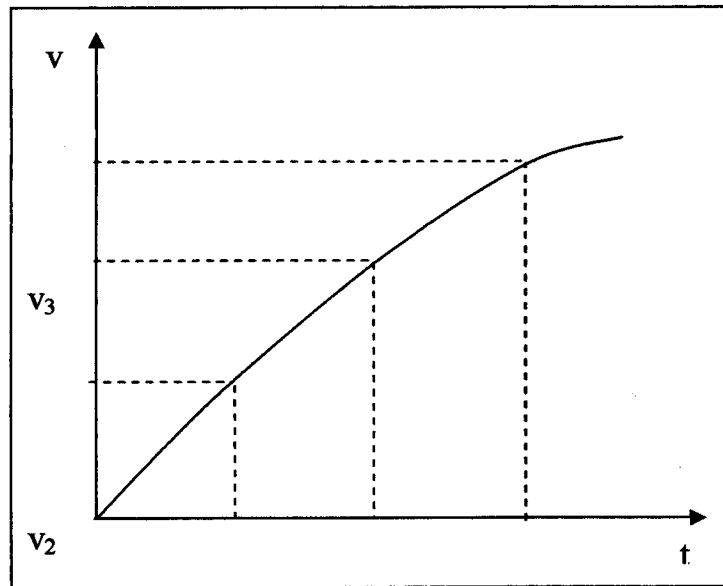


Figure 04 : Courbe de la vitesse de développement

I.2- La serre

Toute serre est solaire, bien entendu. Son premier objectif est de protéger les plantes contre les intempéries et les turbulences non commandables, tout en leurs apportant de la lumière solaire. Dans la conception de la serre, il est possible de faire le meilleur usage possible de cet apport solaire. Le principe est simple, c'est celui de l'avare : emmagasiner autant d'énergie solaire que possible, en perdre le moins possible.

La valorisation des ressources naturelles, surtout quand elles sont favorables, et des apports artificiels (chauffage, climatisation, aération, apport en CO₂, irrigation etc...) offrent à la plante des conditions adéquates à sa croissance et à son développement. Ce microclimat artificiel permettra en conséquence une production rentable sur une aire de culture réduite.

Une relation positive existe entre l'énergie fournie pour la climatisation de la serre et les rendements agronomiques obtenus. Elle est due aussi à l'allongement de la période de culture qui commence plutôt et la multiplication des calendriers de production, par exemple pour la tomate, une culture de saison en plein champ donnera 50 tonnes à l'hectare alors que sous serre climatisée elle dépasse les 170 tonnes à l'hectare, étalée de janvier au mois de juillet.

Le rayonnement solaire est mis en valeur par ce que l'on appelle l'effet de serre. Cela se traduit par l'effet radiatif dont l'énergie véhiculée par le spectre solaire (rayonnement visible et infrarouge proche) pénètre aisément dans l'abri, par contre le rayonnement thermique émis de longueurs d'ondes compensatrices entre 3 et 40 μ m par les surfaces du sol, de la végétation et des annexes doit au moins être absorbé par la paroi et non transmis directement. Certains matériaux (verre, polyester, polycarbonate, polyméthacrylate de méthyle) réalisent cette fonction dans une proportion assez intéressante, alors que les plastiques (polyéthylène non traité spécialement, polychlorure de vinyle) ont un facteur de transmission pour les infrarouges lointains allant de 50 à 80%. Ces derniers sont donc mal adaptés à l'effet anti-convectif qui consiste à emprisonner l'air réchauffé par l'effet radiatif.

Ce capteur thermique efficace mais peu inerte, que constitue la serre, conduit souvent à une situation paradoxale qui est la surchauffe pendant le jour et qui impose une aération naturelle ou forcée. Le refroidissement excessif la nuit oblige à chauffer.

1.2.1- Type de serre

Il paraît nécessaire d'établir une classification dans ce domaine, car les problèmes d'économie d'énergie ne sont pas abordés de la même façon pour toutes les serres. La diversité se manifeste au niveau de la forme (chapelles, tunnels, multichapelles) du matériaux utilisé pour l'enveloppe (verre, film en plastique), du climat entretenu (serre antigel, serre tempérée ou moyennement chauffée, serre chaude), du système de chauffe (générateur d'air chaud, aérothermes, conduite à eau chaude, paillage radiant etc...) de la fonction de la serre (cultures maraîchères, plante en pots), du modèle de serre (fixe ou pivotante). A partir de ces éléments, chaque type de serre présente ses propres avantages et insuffisances.

1.2.2- Matériaux de charpente

La charpente qui doit donner la rigidité à l'ensemble de la structure et résister aux charges et aux poussées peut être réalisée en béton et bois (construction dure), en acier galvanisé ou traité à l'antirouille et en aluminium. Du point de vue de l'ombrage, les dimensions des arceaux, des fermes, des pannes et de tous les éléments constituant la structure en hauteur de la serre, doivent être aussi réduites que possible. Les matériaux les plus adéquats sont l'acier et l'aluminium. Ils ont une résistance élevée. Le bois pour une résistance équivalente, doit avoir des dimensions bien plus grandes et provoque plus d'ombrage.

L'utilisation de l'aluminium ou de l'acier profilé présente d'autres avantages :

- l'emploi d'éléments de structure normalisés,
- assemblage facile par juxtaposition des éléments,
- déformation presque inexistante,
- l'usure réduite,
- l'installation dans un temps réduit,
- frais d'entretien sont minimes sinon inexistants.

1.2.3- Matériaux de couverture

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

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

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

A) Verres :

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

L'emploi de certains types de verres tels que les vitrages isolants, absorbants, colorés, réfléchissants, diffusants etc... sont actuellement réservés seulement à des utilisations assez restreintes et spéciales d'une part à cause du coût élevé de ces produits, d'autre part de son incidence sur le rendement immédiat. Parmi les matériaux verriers les plus utilisés, on peut citer le verre à vitre et ses dérivés, en particulier le verre, imprimé aux propriétés de diffusion de la lumière. C'est un matériau fragile, relativement pondéreux. L'utilisation d'une couverture en verre exige une charpente rigide qui élève le coût de la construction. Pour ce type de verres le taux de transmission des rayonnements solaires est représenté sur la figure 5

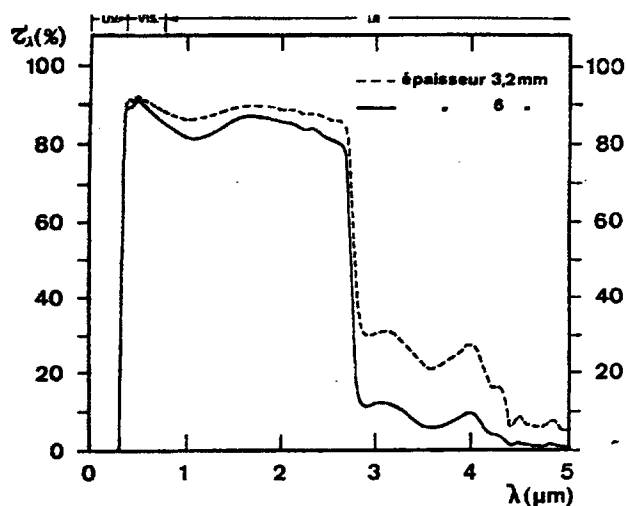


Figure 05: Courbes spectrales de transmission énergétique d'un verre clair

Les autres matériaux verriers modifient le bilan énergétique et lumineux par rapport à celui obtenu par le verre ordinaire dans la mesure où leurs propriétés s'écartent de celles de ce dernier : réduction des pertes de chaleur par conduction-convection pour les vitrages isolants, réduction de l'énergie solaire pénétrant dans la serre pour les matériaux absorbants, colorés ou réfléchissants. Leur intérêt horticole est fonction de leur comportement différentiel vis-à-vis du rayonnement visible par rapport au rayonnement infrarouge de courtes longueurs d'onde.

B) Matériaux plastiques rigides :

Ces matériaux se présentent sous forme de plaques plus ou moins rigides de l'épaisseur de l'ordre de mm. Ils possèdent en général une bonne transparence au rayonnement solaire (bien qu'inférieure à celle du verre ou des films plastiques) et ont une opacité marquée au rayonnement infrarouge, ce qui leur assure un "effet de serre" plus ou moins net.

Le polyméthacrylate de méthyle a une durée de vie très longue à l'instar du verre, il n'en est pas encore de même pour tous les chlorures de polyvinyle et les polyesters, dont l'utilisation généralisée reste, subordonnée à la stabilité dans le temps. A titre indicatif nous présentons ci-dessous des courbes spectrales de transmission du polyméthacrylate.

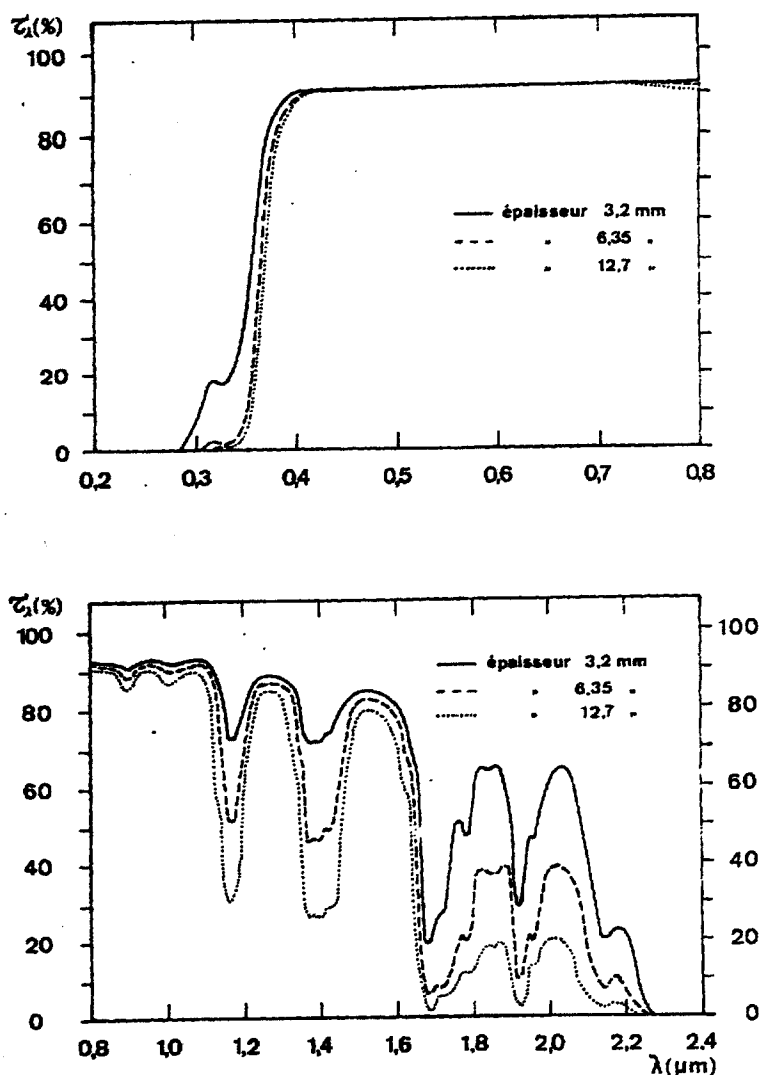


Figure 06: Courbes spectrales de transmission énergétique du polyméthacrylate de méthyle (échantillon contenant des absorbants ultraviolets)

C) Matériaux plastiques en films :

Etant donné leurs très faible épaisseur (de l'ordre de 1/10 mm), ces matériaux possèdent en général une excellente transparence au rayonnement solaire et une transmission aussi nette dans l'infrarouge lointain. Seuls, le chlorure de polyvinyle et le polyéthylène vinylacétate, assurent dans une certaine mesure, un effet de serre. Cette situation conduit dans certains cas de rayonnement intense, principalement nocturne, à des inversions de température sous abris : la température devient inférieure à celle de l'extérieur, suite au rôle de barrière que joue la paroi pour les mouvements d'air. Cette chute de température peut conduire à des situations de gel sous abri, alors que la température extérieure reste

supérieure à 0°C. En plus ces films possèdent des performances mécaniques limitées et une longévité très courte (entre un et deux ans). Il faut noter que ces matériaux doivent être utilisés en fonction de leurs propriétés optiques et mécaniques et non en tant que substituts du verre ou des plaques rigides.

Les polyéthylènes (PE): sont disponibles en faible épaisseur et en très grande largeur (12m). Leur transparence est élevée dans les domaines spectraux de 0,39 à 39 μm . ils ne possèdent pas l'aptitude d'effet de serre sauf traitement spécial ou présence d'un film d'eau condensé sur sa face inférieure.

Le PE infrarouge : dont le spectre visible est identique à celui du film ordinaire mais qui ne laisse passer qu'un faible pourcentage d'infrarouge long, égalant ainsi les propriétés du film PVC classique.

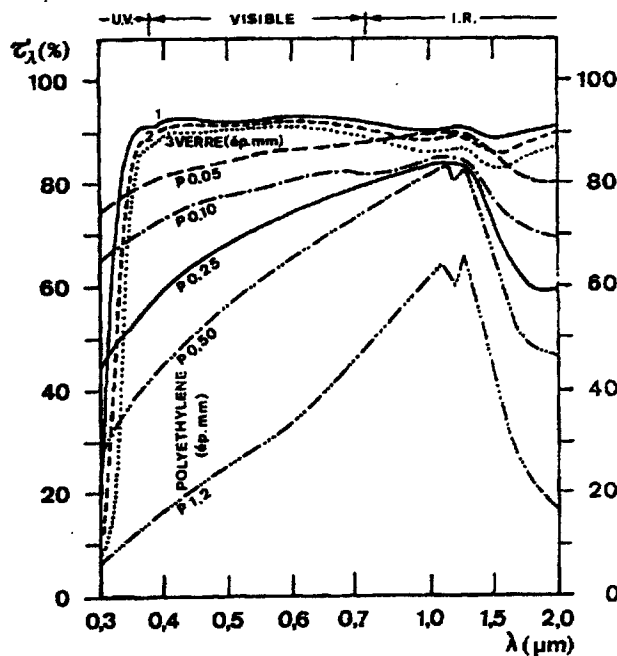


Figure 07 : Courbes spectrales de transmission énergétique (%) du verre ordinaire et d'un polyéthylène avec diverses épaisseurs

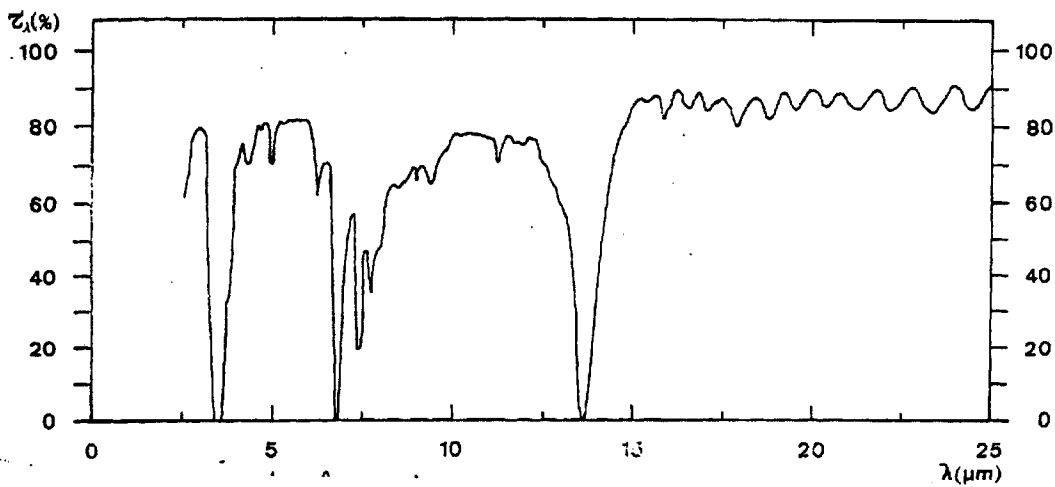


Figure 08 : Courbes spectrales de transmission énergétique de polyéthylène de 0,15mm d'épaisseur, facteur de transmission $\tau' = 0,729$ dans le domaine de 2,5 à 25 μm

Dans la plupart, des cas, le caractère temporaire des constructions de serres facile à fabriquer et à monter, recouvertes de films en plastique, se justifie par le coût peu élevé du matériau et de la structure métallique.

Le Chlorure de polyvinyle (PVC) :

Sous forme de film, le PVC possède pratiquement les mêmes caractéristiques que celles des plaques à l'exception de la durabilité et bien évident du prix. Il est donc aussi transparent sinon davantage au rayonnement solaire que le polyéthylène ordinaire et présente en outre la caractéristique d'être assez opaque aux infrarouges longs (Fig. 09).



Tableau. 2 — Ordres de grandeur des caractéristiques principales de divers matériaux de qualité horticole utilisés en couverture de serres.

	Verres			en plaques				Plastiques				
	Unités (1)	Verre à vitre 3 mm	Vitrage double réfléchissant 2 x 4 mm	Vitrage double isolant 2 x 4 mm	Polycarbonate 1 mm	Polymét. de méthyle 3 mm	Chlorure de polyvinyle 1 mm	Chlorure de polyvinyle plastifié 0,15 mm	Chlorure de polyvinyle densité 0,10 mm	Polyéthylène basse densité 0,15 mm	(Polyéthylène-vinylacétate 0,10 mm	0,15 mm
Propriétés optiques indice de réfraction n_D facteur de transmission a) rayonnement visible 0,38 - 0,76 μm b) rayonnement solaire 0,3 - 2,5 μm c) rayonnement I.R. 5 - 25 μm		1,52 0,87 à 0,90 0,85 0,00	1,52 0,60 à 0,20 0,50 à 0,10 0,00	1,52 0,70 à 0,40 0,50 à 0,30 0,00	1,52 à 1,57 0,7 à 0,8 0,6 à 0,7 0,00	1,49 0,85 à 0,93 0,73 0,00	1,54 0,77 à 0,80 0,75 0,00	1,54 0,80 à 0,87 0,82 0,28	1,51 0,70 à 0,85 0,80 0,73	1,51 0,70 à 0,85 0,80 0,60 à 0,80	1,51 0,70 à 0,85 0,80 0,60 à 0,80	1,51 0,70 à 0,85 0,80 0,60 à 0,80
Propriétés physiques et mécaniques masse volumique ρ module d'élasticité (Young) E résistance à la traction résistance à la flexion allongement à la rupture résistance à la déchirure amorcée résistance à la déchirure non amorcée résistance à l'impact	10^3 kg.m^{-3} kg.mm^{-2} kg.mm^{-2} kg.mm^{-2} % g g g	2,5 7 000 à 7 500 4 à 9 4 à 5 —	2,5 7 000 à 7 500 4 à 9 4 à 5 —	2,5 7 000 à 7 500 4 à 9 4 à 5 —	1,5 à 1,6 800 à 1 000 9 à 14 15 à 25 très faible	1,19 300 6 à 7 11 très faible	1,4 300 4,5 à 6,5 8 à 12 50 à 200	1,2 à 1,3 2 à 10 1,5 à 2,5 — 150 à 300	0,91 à 0,92 18 à 22 1,2 à 1,4 1 à 1,2 350 à 500	0,92 à 0,93 14 à 17 1,5 à 2 — 650 à 900	200 à 400 450 à 1 000 — 1 900 à 2 600 500 à 800 800 à 1 200	200 à 400 450 à 1 000 — 1 900 à 2 600 500 à 800 800 à 1 200
Propriétés thermiques coefficient de dilatation linéique α coefficient de conductivité thermique λ coefficient de transmission thermique K tenue au froid et à la chaleur durabilité	10^{-6} K^{-1} $\text{W.m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ $\text{W.m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ $^{\circ}\text{C}$	8 à 9 0,7 à 0,9 5,9 —	8 à 9 0,7 à 0,9 1,5 à 2,0 —	8 à 9 0,7 à 0,9 3,0 —	40 à 50 0,17 à 0,23 5,8 -20 à +100 5 à 10 ans si absor- beurs UV et résine hort.	73 0,16 à 0,17 5,5 -60 à +80 15 à 25 ans	60 à 80 0,15 5,3 -20 à +70 5 à 10 ans si absor- beurs UV	60 à 80 0,14 5,8 -20 à +50 1 à 2 ans	200 0,29 5,8 -40 à +50 0,5 à 1 an sauf fabrication spéciale	100 à 200 0,35 à 0,41 6,0 -40 à +70 1 à 1,5 an sauf fabrication spéciale	100 à 200 0,35 à 0,41 6,0 -40 à +70 1 à 1,5 an sauf fabrication spéciale	100 à 200 0,35 à 0,41 6,0 -40 à +70 1 à 1,5 an sauf fabrication spéciale

(1) Les grandeurs sont données dans les unités du système international; la reconnaissance d'autres unités ne dédouane pas du système international telles que la cal et ses dérivées expirant à la date du 31 décembre 1977 (AR du 16.6.1970). Facteur de conversion 1 W = 0,8598 kcal/h.

1- Condensation sur la paroi de la serre :

En ce qui concerne la condensation d'eau sous la paroi de la serre, l'humidité relative élevée conduit à l'obtention d'un point de rosée, qui s'observe dès qu'il y ait une faible variation de température externe. La quantité d'eau condensée est pratiquement la même sur la face intérieure de la couverture, alors qu'il n'en est pas le cas sur le mode d'évacuation de cette eau : tantôt elle se condense sous forme de gouttelettes qui s'accroissent en volume et tombent sur place, tantôt apparaît un film d'eau continue très mince et plus ou moins mobile suivant la tension superficielle de la couverture, de sa pente et de sa forme géométrique. Elle peut même glisser et s'accumuler à la partie inférieure du pourtour de la serre. De toute façon, la présence de ce film d'eau modifie le bilan thermique de l'enceinte en particulier de nuit, il améliore l'effet de serre du matériau de couverture, tandis que les gouttelettes d'eau en formes caractérisées, accroissent le pouvoir diffusant de ce même matériau pour la lumière. Il faut noter aussi qu'une humidité relative élevée pose problème à la production sous serre.

2- La salissure de la couverture de la serre :

La saleté qui se dépose sur la paroi de la serre consiste en poussières atmosphériques ainsi qu'en résidus industriels à base de suie et de mazout provenant notamment des brûleurs utilisés dans l'agriculture. Ce dépôt provoque une perte assez importante de transmission lumineuse et bien entendue une baisse de rendement de la culture sous serre. Certaines études estiment à 10% la perte moyenne annuelle de lumière dans les conditions normales d'utilisation et davantage encore dans le cas des matériaux à faces non lisses. Il est à noter que pour les serres chauffées, l'installation de la chaudière et de la cheminée doit être bien étudiée. Il est conseillé de les installer sous les vents dominants ou bien d'élever la hauteur de la cheminée.

En général, ces saletés sont tenaces et très difficile à enlever par simple lavage ou brossage au moyen de détergents ou solvants. Un entretien continu de la paroi de la serre pourra préserver aussi longtemps ses caractéristiques. A titre indicatif nous présentons ci-dessous l'effet de la salissure sur la transmission du vitrage.

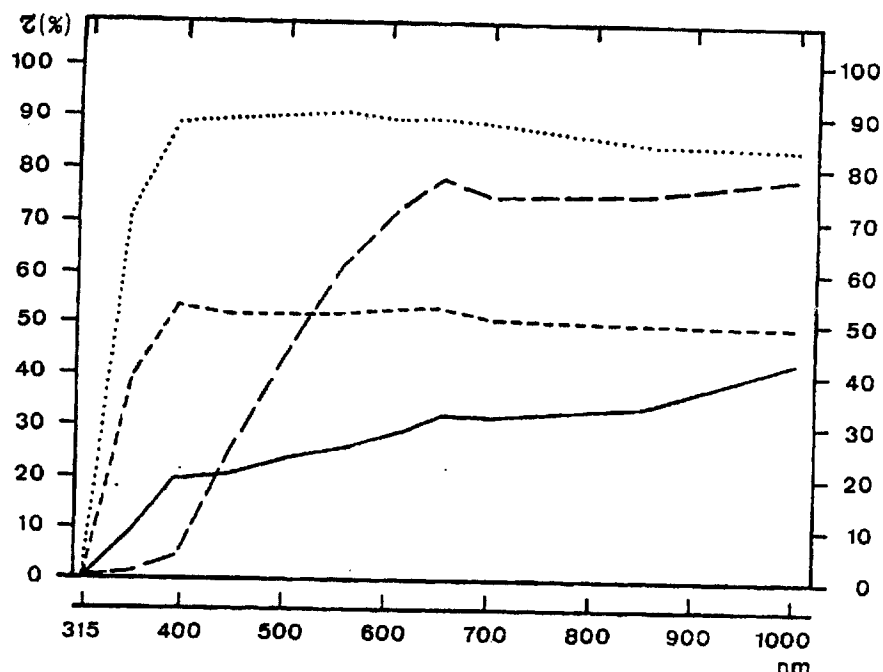


Figure 10 : Effet de la salissure sur la transmission du vitrage

- Vitrage propre
- Vitrage pare-soleil
- ___ Vitrage sali par dépôt de verre
- Vitrage sali par effet de la pollution atmosphérique

3- Vieillessement des matériaux

Tous les matériaux utilisés comme paroi de serres se dégradent plus ou moins rapidement dans le temps.

Les produits verriers et leurs dérivés s'altèrent lentement. Les phénomènes d'irisation et de casse sont inévitables, s'accroissent davantage quand la serre est soumise aux conditions défavorables.

Les matériaux de synthèse se caractérisent surtout par leur instabilité relative dans le temps. Ceci se traduit par une altération des propriétés optiques suite à la photo-dégradation et par un affaiblissement des propriétés mécaniques qui s'extériorisent sous forme de déchirures, de délaminage etc...

Parmi les problèmes optiques causés par le vieillissement nous retenons :

- Le jaunissement du matériau de couverture résultant du déplacement de bandes d'absorption, qui apparaissent dans l'ultraviolet (ce jaunissement

s'observe notamment chez les polyéthylènes et les chlorures de polyvinyle et peut s'accroître jusqu'à une opacité quasi-totale) ;

- La microfissuration de la surface exposée au rayonnement solaire qui

CHAPITRE II

CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE PRINCIPE D'IDENTIFICATION DES PARAMETRES

La gestion et l'optimisation de la production sous serre (Udink ten cate.[80]; Baille et al.[7]) peuvent être intégrées dans le schéma classique des systèmes. Elles sont décomposées en trois modules successifs, caractérisés par une échelle de temps et un niveau de décision.

- le sous-système « serre/microclimat instantané »
- le sous-système « serre/microclimat à court terme »

déclenchement (ou l'arrêt) des fonctions de climatisation (chauffage, ventilation, déshumidification...) et le maintien des consignes avec une amplitude de variation plus ou moins grande autour de la valeur de consigne.

- de définir et transmettre les informations au niveau immédiatement supérieur où elles seront analysées, puis traduites éventuellement sous forme de nouvelles consignes que le premier niveau devra exécuter.

- d'éviter les situations conflictuelles entre différentes fonctions de climatisation en classant les priorités définies à l'avance.

- de déclencher les alarmes lorsqu'un des paramètres de contrôle dépasse des valeurs seuils préalablement fixées.

Niveau 2 : Croissance et développement de la culture à court terme

C'est à ce niveau que s'effectue le choix des consignes à faire exécuter par le premier niveau. L'échelle de temps est de l'ordre de la journée. Les processus physiologiques qui évoluent significativement à cette échelle de temps et qui se traduisent par la croissance et le développement journalier de la culture sont intégrés à ce niveau.

Ces sorties seront utilisées soit pour choisir les consignes à réaliser par le premier niveau, soit comme données d'entrée du niveau supérieur pour une intégration de ces données journalières.

Niveau 3 : Croissance de la culture à long terme

A ce niveau, on situe les processus qui opèrent à une échelle de temps supérieure à la journée ; parmi ceux-ci, on peut citer:

- la morphogénèse ;
- le développement (rythme d'apparition des organes) ;
- l'apparition et le développement de maladies (développement de champignons pathogènes).

Les sorties de ce troisième niveau pourront ensuite être intégrées dans un modèle économique qui évaluera entre autre le revenu brut de la culture et les coûts de production relatifs à la stratégie climatique choisie (coût du chauffage, de l'enrichissement en CO₂, de la déshumidification, etc...) et donnera les éléments qui permettront le choix motivé d'une stratégie optimisée à partir de critères

économiques. Généralement, ce critère sera la maximisation de la différence entre revenu brut et le coût du produit.

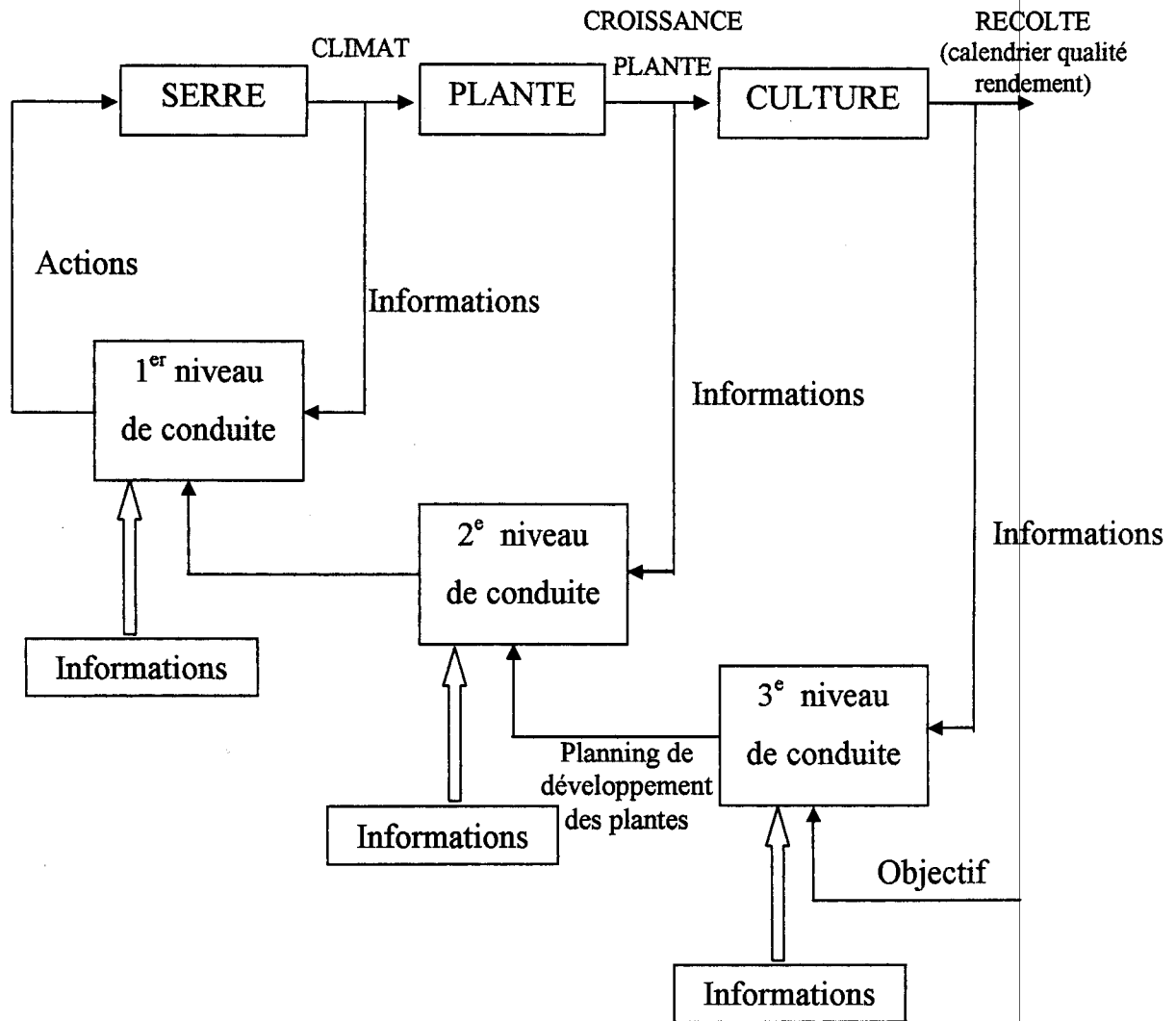


Figure. 12 : Schéma des différents niveaux de commande dans une serre

II.1.2- Domaine d'intérêt dans la gestion du climat

Si nous nous référons à cette approche globale sur la gestion des serres, c'est au premier niveau (contrôle du microclimat) que la modélisation physique du comportement de la serre peut nous fournir des informations utiles à la gestion de l'agrosystème. Cette modélisation tient compte des différents modes de transfert thermique et hydrique qui interviennent dans l'établissement du bilan énergétique de la serre. De nombreux modèles dynamiques de simulation qui reposent sur la

résolution numérique des équations décrivant le bilan d'énergie ont été publiés dans la littérature (Takakura et al. [76]; Van Bavel et al.[83]; Kimball [54]; Jolliet [52]; Issanchou [48]; Boulard [20]; Athienitis et al. [2]; Bojic et al. [14]; De Paepe [35]; Gauthier et al.[40]).

Dans le domaine de la climatisation du bâtiment, l'utilisation jadis de modèles sophistiqués dans les algorithmes de pilotage se heurte à leur complexité de mise en œuvre. Les chercheurs spécialisés en thermique des bâtiments ont été parmi les premiers à utiliser des modèles dits « réduits » [75,88].

L'association de modèles dits de « réduction » et d'identification des paramètres peut converger vers une conduite de pilotage de la gestion de la serre. De toute manière, la modélisation physique de l'agrosystème améliorerait très sensiblement le contrôle du processus de production sous serre aux trois niveaux déjà cités. Les exemples suivants l'illustrent :

Au premier niveau (ou niveau « opérationnel ») :

La gestion des situations conflictuelles entre différentes fonctions de climatisation s'effectue actuellement en appliquant des priorités déterminées à l'avance. Le cas typique est le conflit entre l'aération (refroidir ou, déshumidifier la serre) et l'enrichissement en CO₂. Faute de modèle, prédictif et de données quantitatives sur les flux de ventilation, et donc sur l'évolution interne de la température, de l'hygrométrie et de la concentration en CO₂, il est impossible de calculer la position optimale de chacun des organes de contrôle et le choix des priorités se fait donc de façon empirique et peu satisfaisant. L'existence d'un modèle permettrait d'évaluer les consommations de CO₂ ainsi que les coûts induits, et donc de déterminer la meilleure combinaison des organes de contrôle.

Au deuxième niveau (ou niveau « tactique ») :

Les critères d'origine physiologiques peuvent se traduire par les concepts de « somme » de température et de rayonnement. Pour atteindre une somme de température fixée à l'avance, dans ce domaine limité par un maximum et un minimum admissible de température, on pourra faire évoluer la température sous la serre de façon à limiter les déperditions énergétiques et donc la consommation d'énergie (Boulard et al. [22]). On sera ainsi conduit à moins chauffer la nuit par

vent fort et température extérieure faible, et à maximiser l'efficacité du chauffage naturel dispensé par le soleil.

Un tel contrôle n'est bien sûr envisageable que si nous disposons d'un modèle physique permettant de calculer la consommation d'énergie à chaque instant.

Au troisième niveau (ou niveau « stratégique ») :

Pour différents calendriers, moyens de production, types de serre et d'équipements, un modèle de bilan d'énergie des serres permettra de calculer les performances climatiques et le coût de la climatisation, et facilitera ainsi le choix du système optimal dans une situation climatique et géographique donnée. La modélisation sert ici à définir les moyens et la stratégie, qui permettront d'atteindre les objectifs agronomiques au moindre coût énergétique.

II.2- POSITION DU PROBLEME

II.2.1- Nécessité de modèles dynamiques

Au vu de la complexité des mécanismes à prendre en charge, l'analyse du comportement thermique dynamique des serres est un problème ardu. Parmi les difficultés, on cite en premier lieu les sollicitations extérieures, variables dans le temps auxquelles le système est soumis et en second lieu, les facteurs directement liés à la serre, comme sa structure, son inertie, son système de climatisation et la culture, qui mettent en jeu de multiples interactions.

Une meilleure gestion des équipements de la serre, tant au niveau de l'ambiance que de la consommation énergétique, par la mise au point de système de régulation plus performant, nécessite donc d'aborder le problème du contrôle des serres en régime dynamique et de dépasser le stade du régime stationnaire.

Une première approche possible consiste à établir des modèles de connaissance qui se basent sur une description directe des phénomènes. Cependant de nombreux facteurs et paramètres (caractéristiques physiques, géométriques, climatiques...) sont à prendre en compte et, risquent de générer des résultats incohérents ou peu plausibles.

Une deuxième approche (approche inverse) consiste à identifier les paramètres d'un modèle dont la forme est établie à priori, en se basant sur des séquences expérimentales réelles. Cette pratique permet d'avoir des modèles dits de « comportement ».

II.2.2- Approche utilisée

L'approche privilégiée est en fait la méthode hybride qui consiste :

- à utiliser l'approche directe pour acquérir une connaissance des paramètres fondamentaux, dont le but de déterminer une forme de modèle réduit adapté aux phénomènes étudiés [58] ;

- à utiliser l'approche inverse pour déterminer expérimentalement ces paramètres avec précision.

Cette approche a été largement employée depuis plus d'une décennie dans plusieurs domaines, notamment pour développer des modèles de comportement de bâtiments (Neirac [65]; et Cools [32]), pour caractériser des composants passifs de bâtiments comme (Attalage [3]) et pour la modélisation des émetteurs de chaleur à circulation d'eau.

II.3- CONCEPTS DE L'APPROCHE « SYSTEME »

Si on considère la serre comme un système de production, constitué de différentes composantes physiques et biologiques qui échangent entre elles des flux de matière et d'énergie, l'approche « système » peut être, utilisée et appliquée afin d'analyser les interactions entre ces compartiments et prédire la composante dynamique de la serre. Ce comportement va être caractérisé par l'évolution de variables d'état et de flux de sortie, en fonction d'entrées (perturbations, contrôles externes, critères économiques...) que l'on suppose connues.

Il est donc utile pour le moment de rappeler quelques définitions et concepts généraux de l'approche « système ».

II.3.1- Rappel des fondements de la théorie des systèmes

La théorie des systèmes de De Larminat et Thomas. [34] constitue une branche des mathématiques appliquées susceptible d'être utilisée dans un grand nombre de problèmes techniques (mécanique, électrique, chimique, thermique) et autres (biologique, économique, écologique etc...). André et Nicolas.[1] définissent ainsi cette théorie qui s'attache avant tout à décrire l'évolution de systèmes au cours du temps. Variable indépendante de tout système, le temps possède bien une essence fondamentale qui va se répercuter au niveau de la classification des systèmes considérés par la théorie. C'est ainsi que la distinction s'opère tout naturellement entre les systèmes statiques (ou à réponse instantanée) et dynamique (ou à réponse retardée, caractérisée par l'existence d'une constante de temps).

Outre le temps, les variables suivantes caractérisent la description mathématique d'un système :

* Variables d'état ou variables internes du système (variables endogènes »)

Ces variables décrivent le comportement interne du système, d'où elles peuvent éventuellement échapper à l'observation de l'intérieur du système.

* Variables d'entrée/sortie (variables « exogènes »)

Ces variables décrivent l'interaction entre le système et son environnement et sont, par conséquent, accessibles à l'utilisateur. Elles se divisent en variables d'entrée (action du milieu extérieur sur le système) et en variables de sortie (action du système sur le milieu extérieur).

Les variables d'entrée, peuvent elles-mêmes être subdivisées, en :

- variables de commande, correspondant aux variables sur lesquelles l'utilisateur possède une action (variables qu'on peut commander).

- variables perturbatrices, correspondant aux variables sur lesquelles l'utilisateur ne peut exercer aucune action (variables qu'on ne peut pas commander).

• Paramètres

Indépendamment des variables qui servent à quantifier son évolution, un système est décrit mathématiquement par un ensemble de paramètres dont la

propriété essentielle qu'ils ne subissent théoriquement aucune modification au cours du temps.

La construction d'un modèle mathématique pour un système donné consiste à sélectionner les variables et paramètres qui interviennent de façon significative dans la description des phénomènes physiques caractérisant le système et à établir mathématiquement les relations entre ces différents éléments.

L'expression mathématique la plus générale pour la description d'un système est constituée des deux équations suivantes :

- Une équation décrivant le comportement interne du système (équation d'état) :

$$\frac{dX(t)}{dt} = f(t, X(t), U(t), p) \quad (1)$$

- Une équation d'observation (équation de sortie) :

$$Y(t) = g(t, X(t), U(t), p) \quad (2)$$

où :

$X(t)$, de dimension (n), représente le vecteur des variables d'état du système.

$Y(t)$, de dimension (p), représente le vecteur des observations du système.

$\frac{dX(t)}{dt}$, de dimension (n), représente la dérivée première par rapport au temps de $X(t)$.

$U(t)$, variables d'entrée commandables et non commandables, appelées aussi sollicitations.

p : les paramètres physiques et biologiques du système serre-culture.

t : temps.

Ces équations sont tout à fait générales et, de ce fait, recouvrent tous les modèles possibles de système. Le système serre est un système pour lequel, moyennant certaines simplifications, le principe de superposition est vérifié : une sollicitation amplifiée engendre une réponse également amplifiée. Pour cette catégorie particulière de système, les équations générales deviennent :

- pour l'équation d'état :

$$\frac{dX(t)}{dt} = F X(t) + BU(t) \quad (3)$$

- pour l'équation de sortie :

$$Y(t)=H X(t)+DU(t) \quad (4)$$

Les coefficients F, B, H, D sont en toute généralité, des matrices dont les dimensions sont liées aux dimensions respectives des vecteurs d'état, de commande, de perturbation et de sortie : ce sont les paramètres du système.

F, de dimension (n x n), est la matrice de dynamique du système, elle est diagonale et permet le calcul des temps caractéristiques τ .

B et D, de dimensions (q x n), sont deux matrices qui caractérisent les paramètres de commande du système (par exemple : la surface ouverte des ouvrants ou la quantité d'énergie utilisée pour le chauffage).

H, de dimensions (q x n), est la matrice des observations.

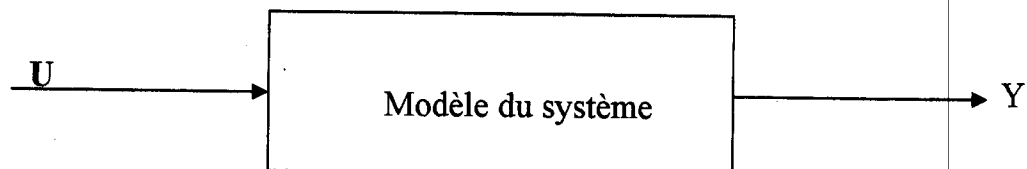
Une fois, posé dans ces termes, tout problème abordé dans le cadre de la théorie des systèmes peut recevoir différents traitements et applications.

II.3.2- Utilité d'un modèle

Sans entrer dans une discussion philosophique, l'emploi d'un modèle est nécessaire. D'une manière globale, la finalité d'un modèle consiste à :

- Analyser et prédire le comportement du processus,
- Guider l'évolution d'un processus à travers des lois de régulation,
- Remplacer des expérimentations et aider à la conception du système.

Un modèle est nécessairement associé à un système, qui est un processus physique (ou biologique) qui reçoit du monde extérieur des entrées (des commandes et des sollicitations) et produit des sorties. Ainsi un modèle d'un système peut être défini comme une relation mathématique \mathcal{F} entre les entrées U et les sorties Y du système.



$$Y = \mathcal{F} [U]$$

Figure. 13 : Représentation schématique d'un système et de son modèle.

On distingue deux approches de construction de modèle. La première théorique, utilisant les lois de la physique qui régissent le processus : elle conduit à des modèles de connaissance dont les paramètres sont reliés aux constantes physiques. La deuxième est expérimentale, déterminée à partir de l'observation du processus en fonctionnement et conduit à des modèles de comportement dont les paramètres n'ont pas nécessairement une signification physique.

II-3-2-1- Modèle de connaissance

L'obtention des modèles de connaissance passe par trois étapes fondamentales (Richalet [69,70]).

a) Analyse physique des phénomènes

La physique, qui permet d'analyser et de transcrire les phénomènes mis en jeu, conduit à des modèles fins. Elle déterminera le choix des entrées et les phénomènes que l'on peut négliger si le compromis entre la précision envisagée et la complexité du modèle est satisfaisant.

b) Représentation mathématique

L'élaboration d'un modèle de connaissance passe par une représentation mathématique des phénomènes mis en jeu. Après analyse et choix des hypothèses, la représentation peut, selon les cas, prendre la forme d'un système d'équations algébriques, différentielles, aux dérivées partielles, d'une fonction de transfert, etc...

c) Résolution

Il s'agit de résoudre la formulation mathématique du problème envisagé. On sait résoudre analytiquement certains problèmes dont la géométrie est simple, et procéder par des techniques numériques pour les formes géométriques assez complexes. Dans ces différents cas les méthodes sont multiples et peuvent aller de la résolution des systèmes linéaires à la résolution d'équations aux dérivées partielles non linéaires.

Les modèles de connaissance jouent un rôle important dans les phases de conception (notamment d'optimisation), de simulation et d'analyse des lois de commande. Cependant, vu leur complexité, leur utilisation demeure lourde. Ceci

conduit à les transcrire souvent sous une forme réduite, au détriment de la précision par rapport au modèle initial.

II-3-2-2- Modèle de comportement

Contrairement aux modèles de connaissance, les modèles de comportement, permettent de caractériser un système existant, de le simuler ou encore de le commander, mais rarement de l'optimiser. Les seules données expérimentales du processus (signaux d'entrée-sortie) peuvent conduire au développement de modèles de comportement. Pour cela il faut :

- Disposer a priori d'une loi qui relie les entrées aux sorties ;
- Ou déduire cette loi d'expérimentations au préalable.

Pour des systèmes où le degré de complexité est très élevé, il est en général difficile de disposer d'une forme de modèle susceptible de conduire à cette représentation. Dans certains cas, il est alors possible, grâce à des techniques mathématiques de réduction de modèles, de déduire cette forme à partir des modèles de connaissance. Puis, c'est une méthode d'identification qui complétera la détermination des paramètres de ces types de modèles.

II-3-2-3- Modèle simplifiés

Le développement d'un modèle simplifié consiste à sélectionner les variables à prendre en compte afin de représenter correctement les phénomènes que l'on étudie et à réaliser un calcul adéquat des paramètres de ce modèle afin de satisfaire à certains critères imposés à l'avance.

Dans le cas d'un modèle complexe, les techniques de réduction permettent d'éliminer les variables inutiles ou redoutables afin d'aboutir à un modèle facilement manipulable.

Parfois, le calcul des paramètres d'un modèle simplifié n'est pas possible, soit parce que le système modélisé est trop complexe ou mal connu, soit parce qu'il fait intervenir des grandeurs difficilement quantifiables. Il se peut aussi que le modèle constitue une description tellement simplifiée de la réalité que les coefficients de ce modèle ne possèdent plus aucun sens physique. Dans ce cas, il est possible d'utiliser un ensemble de méthodes, essentiellement de natures statistiques aptes à réaliser l'estimation des valeurs des paramètres des modèles.

Ces méthodes ont, de plus, l'avantage de résorber les imperfections de la modélisation et de produire une solution reliée de près à la réalité expérimentale. Elles présentent toutefois des risques liés essentiellement à la précision des mesures disponibles aux algorithmes numériques utilisés et au choix de la structure des modèles choisis.

II.4- OBJECTIF DE L'ETUDE

On se propose d'adapter les recherches développées depuis plus d'une décennie sur la modélisation dynamique du bilan d'énergie d'un bâtiment pour élaborer des modèles mathématiques du système serre cultivée. Cette modélisation complétée par des séquences d'enregistrement des sollicitations $U(t)$ (R_g : rayonnement global, T_e : température extérieure, Q_{sol} , Q_{air} : chauffage du sol et d'air, V : vitesse du vent, s : surface ouverte des ouvrants, ϕ_l : énergie extraite par brumisation, p_e : pression de la vapeur d'eau de l'air extérieur, T_r : flux de transpiration de la culture) et des réponses ou sorties filtrées par le système étudié $Y(t)$ (T_i : température de l'air intérieur, p_i : pression de la vapeur d'eau de l'air intérieur), doit permettre l'identification des principaux paramètres qui déterminent son comportement.

L'expression mathématique décrivant le système est alors, constituée de deux équations (3) et (4) qui empruntent la forme matricielle. Les matrices dynamiques F , B , H du système seront identifiées selon les techniques développées dans le cadre du bâtiment (Neveu et al. [64]; Neirac [65] et [35]) et le degré d'accord entre le modèle de comportement « serre » et le modèle de connaissance « équation physique » qui sera évalué à travers le critère de minimisation (notée ϵ) qui mesure l'écart quadratique moyen des valeurs mesurées et estimées des sorties $Y(t)$ du système pendant l'intervalle de temps étudié. La méthode de minimisation du critère qui conduit à l'obtention des paramètres optimaux est basée sur l'algorithme de Marquardt. Elle a été développée par L.A.S.H. (Laboratoire des sciences de l'habitat) de l'ENTPE et l'E.M.P (Ecole des Mines de Paris) : rapport final AFME, 1991.

Le logiciel qui permet d'identifier les paramètres de modèles dynamiques de comportement énergétiques de bâtiment a été adapté par l'INRA aux particularités de la serre. Les séquences d'entrées - sorties caractérisées par des échantillons de données mesurées sur site ont été établies avec un pas d'acquisition horaire.

II.5 PRINCIPE DE L'IDENTIFICATION

L'identification est un procédé inductif qui élabore un modèle mathématique à partir des faits constitués d'expériences et de connaissances a priori sur le système. Le modèle identifié peut avoir un rôle explicatif (c'est le cas pour la recherche du coefficient de déperdition thermique d'un bâtiment) ou un rôle prédictif (calcul du climat à venir, destiné à un algorithme de commande) (Neuveu et al. [64]).

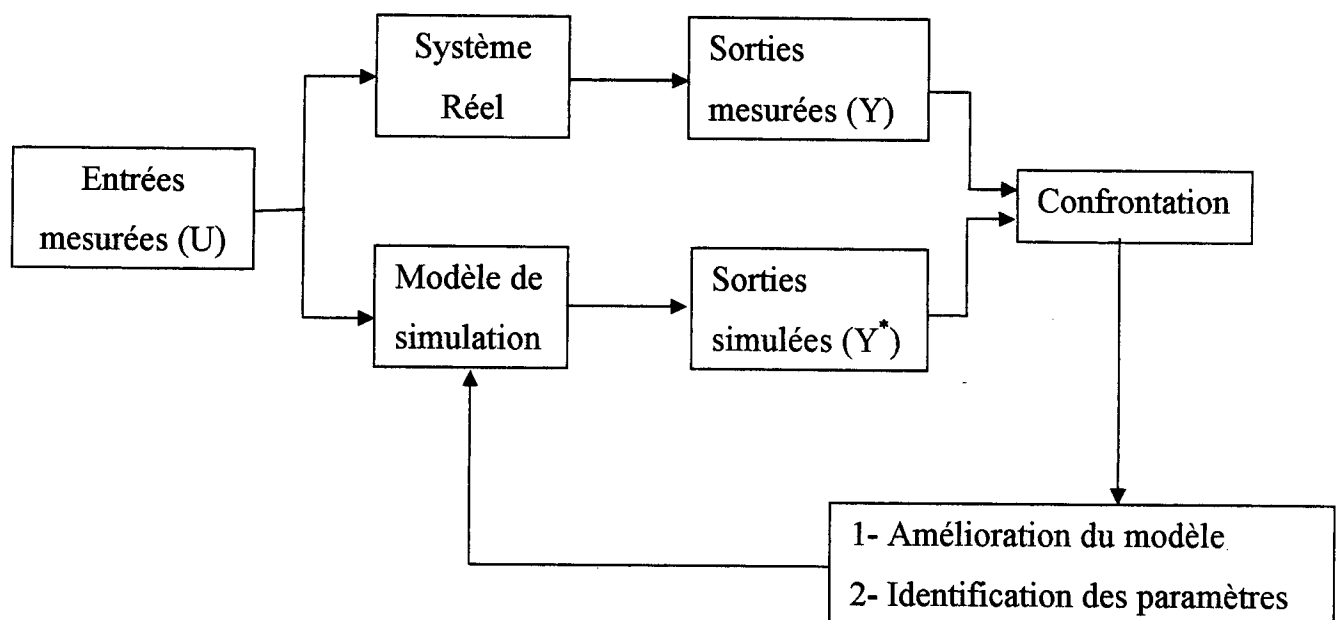


Figure. 14 : Schéma général de l'identification des paramètres.

Après modélisation du système étudié, nous disposons d'un modèle paramétrique du type :

$$Y^* = F(\psi, U) \quad (5)$$

Où ψ désigne un vecteur contenant tous les paramètres du modèle. Afin d'évaluer le degré d'accord entre le système et le modèle, nous essayons de trouver une valeur de Ψ qui minimise l'écart quadratique J (écart de reconstruction) entre, Y valeur mesurée et Y^* , sortie calculée du modèle :

$$J = \frac{1}{\Delta} \int_0^{\Delta} \|Y^*(t) - Y(t)\|^2 dt \quad (6)$$

Pour établir le degré de fiabilité du modèle, le critère adopté (éq.6) est indépendant des conditions de l'identification.

Les mesures de $U(t)$ et de $Y(t)$ sont des valeurs échantillonnées avec un pas de temps Δt , ce qui nous conduit à identifier les paramètres d'un modèle « discret » :

$$X_{n+1} = Fa X_n + Ba U_{n+1} \quad (7)$$

$$Y_{n+1}^* = H X_{n+1} + D U_{n+1} \quad (8)$$

Les équations (7) et (8) sont le résultat sous forme récursive de l'intégration des équations (3) et (4) où n est le pas du temps.

On peut aboutir à une solution qui est bien adaptée aux problèmes de commande si le modèle de comportement (éq.5) est suffisamment réaliste.

Le problème revient donc alors à identifier les coefficients des matrices du modèle discret.

II.6- METHODES D'IDENTIFICATION

II-6-1- Eléments nécessaires à l'identification

Les mesures suivantes des variables d'entrée (U) et de sortie (Y) sont nécessaires :

a) une suite de valeurs U_1, \dots, U_N , N : nombre de mesures des entrées, correspondant à un échantillonnage au pas de temps Δt .

b) Une suite de valeurs Y_0, Y_1, \dots, Y_N , de mesures de la sortie, effectuées simultanément.

Etant donné que nous ne mesurons pas $U(t)$ continûment, mais uniquement les valeurs à des pas de temps Δt , nous supposons une évolution linéaire de U entre deux pas d'échantillonnage. Pour la simulation, on aura besoin au départ des

valeurs initiales des différents paramètres (vecteur Ψ_0). Pour un vecteur Ψ donné, on calcule la suite $(Y^*_0, Y^*_1, \dots, Y^*_n)$, des valeurs de sortie, ce qui permet de déterminer l'écart quadratique J :

$$J = \sum_{i=1}^n (Y_i^* - Y_i)^2 \quad (9)$$

Le problème à résoudre consiste à trouver la valeur de Ψ qui minimise $J(\Psi)$. Dans la majorité des cas une solution directe sous la forme :

$$\frac{\partial J}{\partial \Psi} = 0 \quad (10)$$

n'est pas possible car la sortie du modèle (Y^*_i) n'est pas une fonction analytique de Ψ .

Il faut donc se tourner vers des méthodes itératives, où nous allons chercher la valeur de Ψ par approximations successives.

Nous utiliserons pour cela une méthode « locale », dont le principe est le suivant :

- On choisit une valeur initiale arbitraire Ψ_0 des paramètres ;
- On cherche à partir de cette valeur une nouvelle valeur Ψ_1 telle que $J(\Psi_1) < J(\Psi_0)$;
- On poursuit le même calcul en repartant de Ψ_1 ;
- On arrête la procédure à un rang n telle que $J(\Psi_n)$ soit suffisamment petit.

II-6-2- Méthodes locales et globales

Une méthode est dite locale lorsque à chaque itération la direction de descente :

$$d\Psi = \Psi_{n+1} - \Psi_n \quad (11)$$

est calculée en fonction de Ψ_n uniquement.

Les méthodes locales présentent deux inconvénients :

a) Etant locales, elles ne peuvent suivre des directions suivant lesquelles $J(\Psi)$ diminue. Or il peut exister des minimums locaux, c'est-à-dire des points Ψ tels que :

$$J(\Psi) < J(\Psi') \quad \forall \Psi' \text{ vérifiant } \|\Psi - \Psi'\| < \varepsilon$$

Mais qui ne représentent pas le minimum absolu. Lorsque l'algorithme converge vers une solution, il est alors impossible de savoir s'il s'agit d'une solution locale ou d'une solution absolue.

b) Lorsqu'on est proche d'une solution, les directions de descente sur chacun

des paramètres ne sont pas déterminées avec la même précision. Il peut arriver que le critère soit presque insensible à la variation d'un paramètre particulier. Dans ce cas, il conviendra de rester vigilant quant à l'interprétation des résultats, les valeurs de certains paramètres n'ont pas toujours de sens physique.

Les méthodes qui pallient ces inconvénients sont les méthodes dites « globales », plus intéressantes du point de vue de la qualité des résultats, elles sont néanmoins beaucoup plus complexes et difficiles à mettre en œuvre.

Pour tous nos calculs, l'écart moyen entre la sortie modélisée et la sortie mesurée est alors donné par :

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{J}{N}}$$

CHAPITRE III

MODELISATION PHYSIQUE DES SERRES CHOIX D'UN MODELE SIMPLIFIE

Dans ce chapitre, nous allons établir les équations générales régissant le système « serre cultivée en régime dynamique. A partir des modèles disponibles dans la littérature et en fonction de la finalité, le choix d'un modèle simplifié et assez réaliste sera choisi comme modèle de comportement de l'ensemble « serre cultivée ». C'est le modèle qui sera utilisé comme base pour appliquer la technique d'identification des paramètres présentée dans le chapitre II.

III.1- PRINCIPES DE BASE

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

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

$$\text{ENERGIE RECUE} - \text{ENERGIE PERDUE} = \text{VARIATION D'ENERGIE INTERNE}$$

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

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

III.1.1- Les différents types de modèle physique de serres

Nous allons tout d'abord passer en revue les principaux types de modèles déjà publiés dans la littérature. Il existe de nombreux modèles qui permettent de simuler le comportement thermique et énergétique d'une serre agricole. Le principe de calcul, fondé sur la notion de bilan, est toujours le même, mais l'approche du problème est différente selon les objectifs recherchés par les auteurs : modélisation statique ou dynamique du bilan de chaleur sensible seule, du bilan radiatif des serres, etc...

a) Modèles statiques

Il s'agit là des premiers modèles mis en œuvre dans les années 60 à 80. Ce sont surtout des modèles énergétiques approximatifs par les seules pertes thermiques (Brundrett et al. [29]; Chiapale et al. [31]). Le calcul des pertes est réalisé à partir de la connaissance de l'écart de température intérieur et extérieur, du rapport de la surface de l'enveloppe à la surface du sol de la serre et d'un coefficient global de déperditions thermiques qui dépend de la vitesse du vent et des pertes par ventilation dynamique ou statique, selon le type de serre.

b) Modèles dynamiques

Ces modèles considèrent que la serre est composée de plusieurs éléments (la couverture, l'air, la végétation et le sol) pour lesquels les variables d'état sont supposées homogènes et posent les équations du bilan thermique (transfert de chaleur et parfois de masse) qui sont écrites pour chacun d'eux, sans négliger les termes différentiels liés à l'inertie thermique du système. Le système d'équations est ensuite résolu pas à pas au moyen de méthodes analytiques ou numériques. Businder [30] et Walker [87] furent parmi les premiers à réaliser des analyses exhaustives du bilan thermique d'une serre. Ces études ont préparé le terrain à la création des premiers modèles dynamiques (Selcuk [73]; Takakura et al. [76]; Kimball [53]; Maher et O'Flaherty [60]) qui ont été suivis par de nombreux auteurs (Takami et Uchijima [78]; Kindelan [55]; Van Bavel et al. [82]; Avissar et Mahrer [4]; Von Elsner [85]; Deltour et al. [36]; Takarura et al. [77]; Kimball [54]; Monteil [63]; Issanchou [48] et Jolliet [52]). Si les modèles dynamiques offrent de multiples possibilités, ainsi qu'une bonne précision, ils sont par contre complexes et d'un maniement peu aisé, notamment dans les applications au contrôle des serres. Ceci a conduit différents auteurs à élaborer des modèles de simulation présentant un nombre réduit de paramètres, susceptibles d'être identifiés *in situ* (Okano et al. [66]; Tantau [79]; Udink Ten Cate [80]; Boulard et Baille [17, 22]; Seginer et al. [72]). Généralement les analyses qui ont conduit à ces réductions étaient le plus souvent empiriques et fortement liées à l'expérience.

III-1-2- Spécificité de la thermique des serres par rapport à celle des bâtiments d'habitation

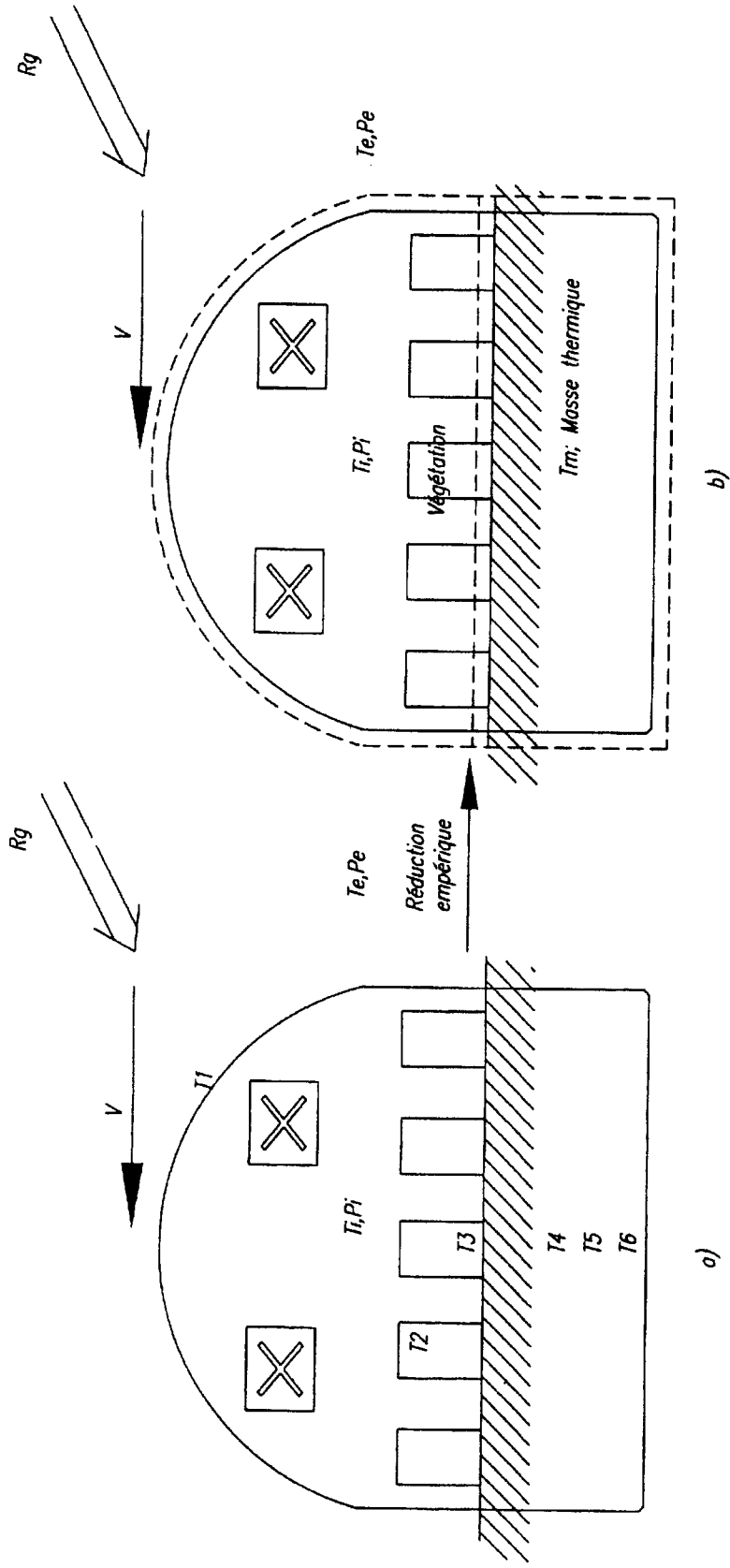
La serre peut être considérée comme un milieu très confiné où plusieurs composants s'échangent entre eux. Tous les modèles de serres sont basés sur l'hypothèse tel que les compartiments constitutifs (parois, air, sol, végétation...) sont homogènes du point de vue des variables d'état (température, humidité...) qui les caractérisent.

La serre présente un comportement thermique assez différent des bâtiments d'habitation, du fait de ses caractéristiques particulières :

- Une structure légère supportant une enveloppe transparente qui transmet une très grande partie du rayonnement solaire ;

- Une culture, qui capte la majorité (jusqu'à 80 % pour une culture bien développée) de ce rayonnement solaire et le transforme en grande partie en chaleur latente de vaporisation (transpiration des plantes) et de chaleur sensible : elle participe donc d'une façon ou d'une autre aux échanges d'énergie et de masse.

- Un sol qui absorbe le rayonnement incident et en transforme une partie en chaleur latente (évaporation du sol) ; le sol constitue l'essentiel de la masse thermique de la serre, contrairement aux bâtiments où les murs et la toiture sont



a) Modèle réel

b) Modèle réduit

Figure. 15 : Schéma des différents compartiments et termes du bilan thermo-énergétique d'une serre

III.2- LES BASES DU MODELE SIMPLIFIE

III-2-1- Hypothèses simplificatrices et équations de base

En utilisant une approche similaire à celle utilisée pour les collecteurs solaires Duffie et Beckman [37] et Boulard et Baille [17], on considère que la serre est composée de deux compartiments (Fig.15) :

-Le sol et les autres éléments lourds de la serre (substrats de culture...) dont le temps caractéristique est supérieur au pas du temps de scrutation qui est d'une heure, nous considérons le cas où le sol est recouvert d'une bâche plastique (culture hors sol) qui est uniquement le siège d'échanges de chaleur sensible. Nous les regroupons sous l'appellation de « masse thermique » virtuelle, caractérisée par sa température T_m et sa capacité calorifique C_m ;

-L'air et la végétation, de temps caractéristique réduit ($\tau_a = 200s$; $\tau_v = 1000s$) par rapport au temps de scrutation (3600s) et qui sont le siège d'échanges de chaleur sensible et latente. On considère que ces deux éléments sont regroupés en un seul, assimilable à l'air de la serre, dont on néglige la capacité calorifique. Il sera caractérisé par sa température T_i et sa pression.

Le modèle mathématique du système est obtenu en écrivant le bilan d'énergie des deux compartiments. Sa représentation selon la symbolique R.C est représentée sur la Figure 16

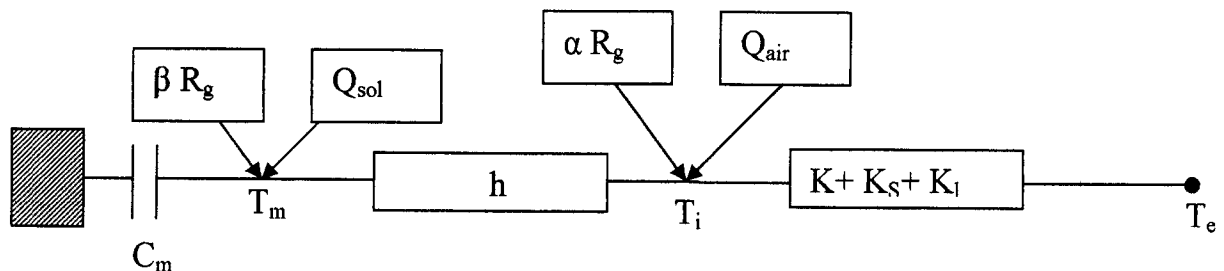


Figure. 16 : Modèle de serre R.C. d'ordre 1 du bilan thermique

- Masse thermique virtuelle
- Air

$$C_m \cdot T_m = h(T_i - T_m) + Q_{sol} + \beta R_g$$

$$0 = \alpha R_g + Q_{air} + h(T_m - T_i) + K(T_e - T_i) + K_s(T_e - T_i) + K_l(p_e - p_i)$$

1- Le bilan d'énergie de la masse thermique

Ce bilan s'écrit d'après la Figure. 17

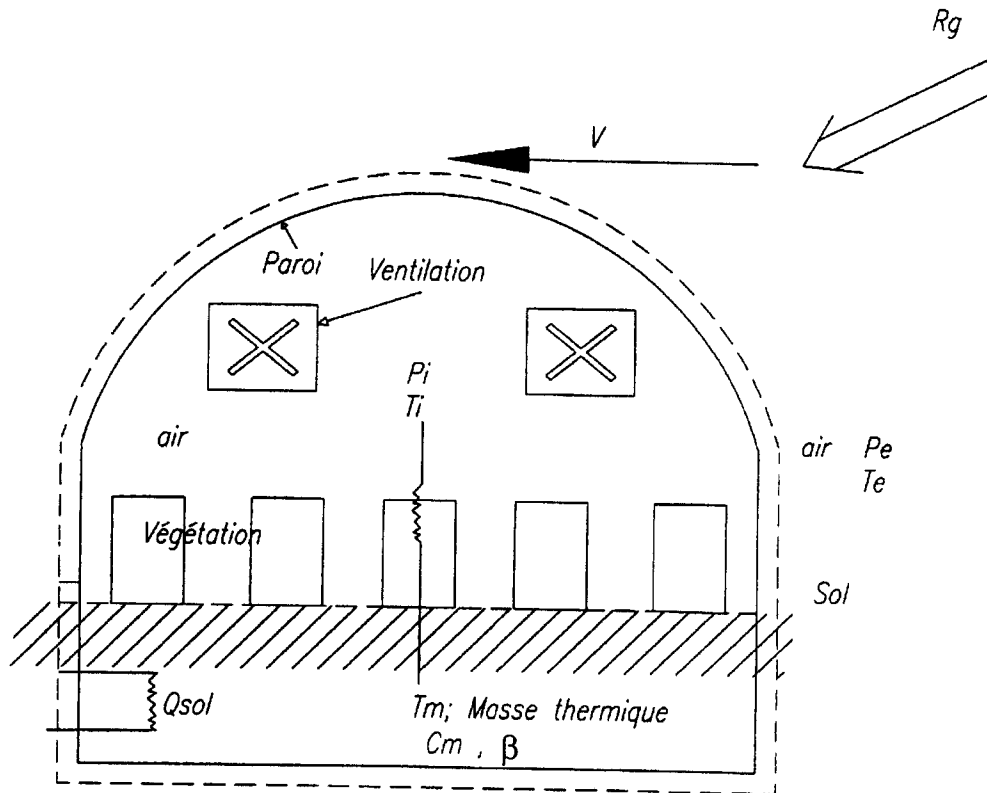


Figure. 17

$$C_m \frac{dT_m}{dt} = h(T_i - T_m) + Q_{sol} + \beta R_g \quad (12)$$

Où

T_m : température de la masse thermique (°C)

$\frac{dT_m}{dt}$: dérivée première par rapport au temps de T_m (K s⁻¹)

T_i : température intérieure de la serre (°C)

C_m : capacité calorifique de la masse thermique (J m⁻² K⁻¹)

h : coefficient d'échange convectif entre l'air et la masse thermique (W m⁻² K⁻¹)

Q_{sol} : quantité d'énergie apportée par le système de chauffage du sol (W m⁻²)

R_g : rayonnement global extérieur (W m⁻²)

β : taux d'absorption du rayonnement global extérieur par la masse thermique

2- Le bilan d'énergie de l'air de la serre

Ce bilan s'écrit d'après la Figure.18

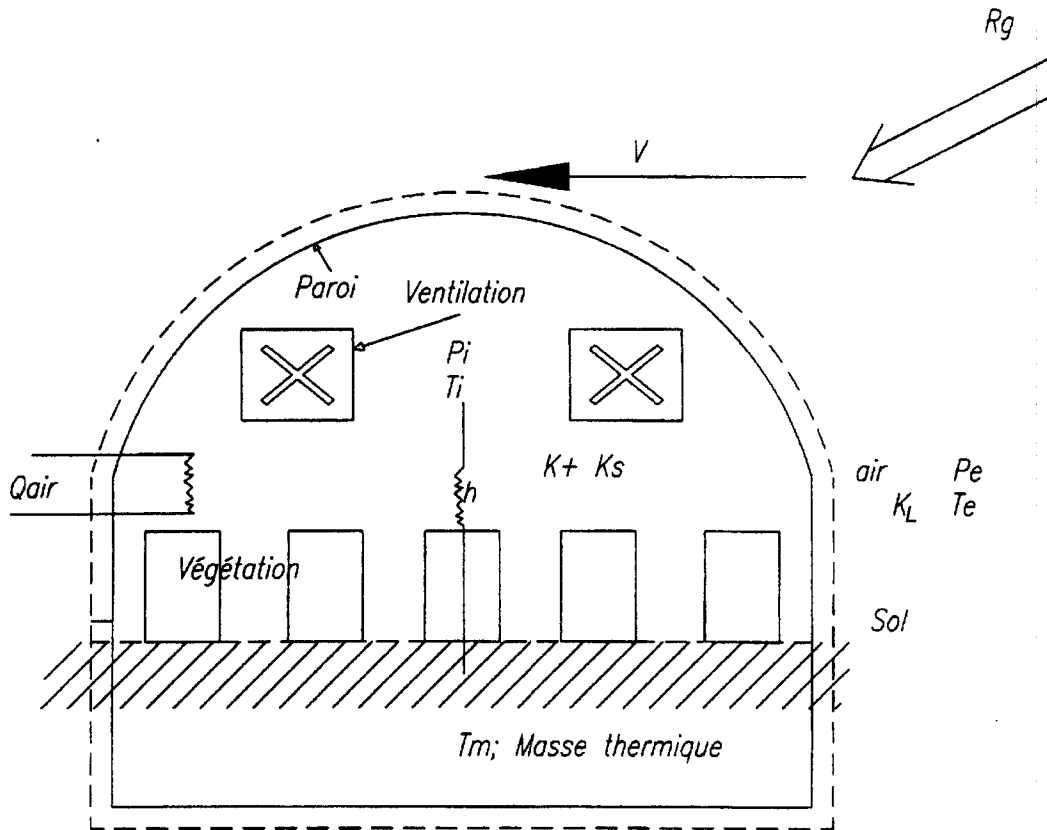


Figure. 18

$$\alpha R_g + Q_{air} + h(T_m - T_i) + K(T_e - T_i) + K_s(T_e - T_i) + K_L(p_e - p_i) = 0 \quad (13)$$

où :

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

p_i, p_e : pressions partielles de vapeur d'eau de l'air intérieur et de l'air extérieur (hPa)

K : ($K = a + b V$) : coefficient de déperdition global à travers les parois ($W m^{-2} K^{-1}$)

K_L : coefficient de transfert de chaleur latente par ventilation ($W m^{-2} hPa^{-1}$)

K_s : coefficient de transfert de chaleur sensible par ventilation ($W m^{-2} K^{-1}$)

Q_{air} : quantité d'énergie apportée par le système de chauffage de l'air ($W m^{-2}$)

α : coefficient d'absorption du rayonnement solaire par l'ensemble air / végétation.

3- Le bilan de vapeur d'eau de l'air de la serre

Ce bilan est décrit par la relation :

$$C_1 \frac{dp_i}{dt} = T_r - K_i(p_i - p_e) + \varphi_1 \quad (14)$$

Où :

C_1 : capacité thermique équivalente à la vapeur d'eau de l'air ($J h pa^{-1} m^2$)

T_r : flux de transpiration de la culture ($W m^{-2}$)

φ_1 : vaporisation de l'eau apportée par le système de brumisation ($W m^{-2}$)

III.2.2- Explication des paramètres et des flux

Le système d'équations (12) à (14) comprend donc :

A part la pression intérieure de la vapeur d'eau déterminée par le système, deux inconnues sont les variables d'état internes et que l'on cherche à prédire : T_m et T_i .

- Des entrées que l'on suppose connues : soit des perturbations externes non contrôlables ($R_g, T_e, P_e, V \dots$), soit des flux d'entrée commandables (Q_{air}, Q_{sol}, S).

- Des paramètres dont : certains caractérisent les propriétés physiques de masse thermique (C_m, β) ou du rayonnement air/culture (α). D'autres correspondent à des coefficients de transfert (h, K, K_s, K_l) qui peuvent dépendre eux-mêmes de variables extérieures (K, K_s, K_l dépendant de la vitesse du vent) ou intérieures (h de l'écart de température, $T_m - T_i$). De plus K_s et K_l qui caractérisent les flux de ventilation, dépendent également de l'angle d'ouverture du système d'aération (ventilation). Ils sont contrôlables par le serriste.

III.2.2.1- Les coefficients de transfert

La modélisation des échanges thermiques au sein d'une serre fait intervenir plusieurs coefficients intrinsèques à la serre. Ces coefficients sont des conductivités thermiques, des masses volumiques, des débits, des émissivités, des coefficients d'absorption, de transmission et de réflexion, des caractéristiques dimensionnelles, etc.... Or, la caractérisation de la serre, telle qu'elle a été proposée, se réfère à des coefficients de performances globaux (ou agrégés) qui ne correspondent pas à cette description. Il faut en fait synthétiser une partie de l'information relative à la serre à travers son comportement stationnaire, comme

cela a été réalisé par exemple pour les parois de bâtiments avec la mesure des coefficients de déperdition thermique (Girard [41]; Baudier [10]). Le régime stationnaire suppose que les conditions extérieures sont constantes sur la période considérée.

Plus précisément, il faut parler de coefficient « moyen » se rapportant à la séquence climatique considérée. Les paramètres caractéristiques de la serre tel que le coefficient de déperdition global K , peuvent varier d'une période à l'autre du fait des variations des sollicitations climatiques.

a) Le coefficient global de déperdition (K)

Le vent joue un rôle très important dans les pertes thermiques d'une serre (Bailey et Cotton [5]; Baille et al. [8]). Ceci nous amène à considérer un coefficient d'échange global en fonction de la vitesse du vent, noté $K = a + b V$. Vu le nombre important des paramètres à identifier, on peut être amené à fixer la valeur de certains d'entre eux, dont on peut estimer a priori leurs valeurs comme le coefficient K , estimé par l'INRA de Montflavet à :

$$K = 7,6 + 0,42 V \quad (15)$$

b) Coefficients K_s et K_l

La ventilation naturelle ou mécanique est le mode le plus répandu, mais est aussi le plus difficile à modéliser. Les phénomènes qui la régissent sont encore mal connus. Elle intervient dans les bilans d'énergie et de vapeur sous la forme de K_s et K_l .

K_s et K_l seront considérés comme proportionnels au flux d'air G_v ($m^3 s^{-1}$) extraite par ventilation (fuites naturelles, ouverture des ouvrants, extraction mécanique).

Les relations liant K_s et K_l à G_v sont les suivantes :

$$K_s = \rho C_p G_v / s ;$$

$$K_l = \rho C_p G_v / \gamma s .$$

Où :

C_p : capacité thermique massique de l'air ($J Kg^{-1} K^{-1}$)

G_v : débit d'air volumique ($m^3 s^{-1}$)

γ : constante psychrométrique ($h Pa K^{-1}$)

ρ : masse volumique de l'air ($Kg m^{-3}$)

s : surface ouverte des ouvrants (m^2)

c) Coefficient d'échange convectif h

Ce coefficient caractérise les échanges convectifs entre la masse thermique (sol) et l'air. En considérant, qu'à l'intérieur de la serre une vitesse du vent nulle, le régime de convection peut être assimilé à la convection libre. Le flux convectif sera donc considéré comme une fonction de la différence de température entre l'air et la masse thermique ($T_m - T_i$).

d) Coefficient exprimant la capacité calorifique de la masse thermique C_m

Le coefficient C_m est caractérisé par l'inertie de la masse thermique, exprimé en terme de capacité calorifique équivalente ($J m^{-2} K^{-1}$)

e) Coefficients α et β

Les différents composants de la serre ne captent qu'une partie de l'énergie solaire incidente. Comme mentionné plus haut, nous avons divisé la serre en deux compartiments :

- L'énergie solaire captée par l'air et la végétation est caractérisée par le coefficient α . Ce dernier varie entre 0,25 et 0,6 selon les auteurs Seginer et Albright [71] et Boulard et baïlle [17] et selon l'état du couvert, souvent de l'ordre de 0.8 d'après A. Morisot.

- La masse thermique (sol, substrat...) est couverte d'un plastique blanc qui réfléchit la majorité du rayonnement reçu : le coefficient qui caractérise la proportion d'énergie captée, est β qui sera donc considéré comme très faible voir même nul ($\beta = 0$ à $0,1$).

III.2.2.2- Formulation simplifiée du flux de transpiration

Les transferts de vapeur d'eau entre la plante et l'atmosphère sont supposés régis par une loi classique de diffusion analogue à celle de la chaleur (Loi de Fick), où le flux de vapeur d'eau est considéré comme proportionnel au gradient de concentration en vapeur d'eau entre la surface des feuilles (à la température T_f) et l'air (à la température T_i), d'une façon générale, on a (PENMAN, 1948) :

$$T_r = \frac{\rho C_p LAI D_f}{\gamma r_t} \quad (16)$$

Où :

T_r : flux d'eau transpiré par un couvert ($W m^{-2} sol$)

ρ : masse volumique de l'air ($kg m^{-3}$)

C_p : chaleur spécifique de l'air ($J K^{-1} kg^{-1}$)

γ : constante psychrométrique ($h Pa ^\circ C^{-1}$)

LAI : indice foliaire du couvert ($m^2 feuilles m^{-2} sol$)

r_t : résistance totale du couvert au transfert de vapeur d'eau ($s m^{-1}$)

D_f : déficit de saturation air / feuille ($h Pa$).

La résistance totale du couvert est généralement considérée comme la somme de deux résistances en série :

- la résistance aérodynamique de feuille, r_a
- la résistance stomatique interne de feuille (r_s)

III.2.2.3- Modélisation du taux de renouvellement de la serre

Les études et les modèles qui ont été déjà publiés ne sont pas généralisables à l'ensemble des serres d'après De Jong [33] et Fernandez et Bailey [39]. Les serres actuelles possèdent des hauteurs de plus en plus importantes et des ouvrants, soient continus ou mécanisés.

Les études présentés par Boulard et al.[22] ont permis d'établir une relation simplifiée d'ordre 1 en considérant des champs de vitesses et de températures homogènes et négligeant l'effet du gradient de température ($T_i - T_e$). Les résultats étaient suffisamment précis pour estimer le flux volumique G_v ($m^3 s^{-1}$) pour des vitesses de vent supérieures à $1 m s^{-1}$.

$$G_v = \left\{ \frac{(s+s_0)}{2} \right\} AL \sqrt{CV} + d_0 \quad (17)$$

Où :

AL : est le coefficient de perte de charge des courants

C : coefficient de pression du vent

d_0 : le taux de fuite résiduel (serre fermée, vent nul) ($m^3 s^{-1}$)

V : vitesse du vent en ($m s^{-1}$)

s : la surface ouverte des ouvrants (m^2)

s_0 : la surface effective des fuites (m^2)

Le produit $AL\sqrt{C}$ reste relativement constant ($\approx 0,24$) quelle que soit la direction du vent.

III.3- FORMULATION ET INTEGRATION DU MODELE SIMPLIFIE : EQUATION DU BILAN D'ENERGIE

Le rapport de Bowen B_0

En micrométéorologie, l'équation du bilan fait souvent appel au rapport de Bowen qui représente le rapport du flux de chaleur sensible au flux de chaleur latente. Dans l'équation (13), le flux de chaleur sensible extrait par ventilation s'écrit :

$$K_s (T_i - T_e)$$

et le flux de chaleur latente extrait par ventilation :

$$K_l (p_i - p_e)$$

En posant :

$$B_0 = \frac{K_s(T_i - T_e)}{K_l(p_i - p_e)} \quad (18)$$

L'équation (13) devient alors :

$$\alpha R_g + Q_{air} - h(T_i - T_m) - K(T_i - T_e) - K_s(T_i - T_e) \left[\frac{(B_0 + 1)}{B_0} \right] = 0 \quad (19)$$

En utilisant le couple d'équation (12 et 19) et après intégration et mis sous forme récurrente entre les pas de temps n et $n+1$, on obtient (il ne s'agit pas d'une intégration rigoureuse, mais d'une approximation numérique, on utilise $B_0 = f(T_i, p_i)$ pour simplifier l'intégration) :

$$T_{m(n+1)} = T_{m(n)} \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) + \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right)\right) \left(1 \frac{\alpha h - \beta \mu}{h(\mu - h)} \frac{\mu}{h(\mu - h)} \frac{1}{\mu - h}\right) \begin{pmatrix} T_e \\ R_g \\ Q_{sol} \\ Q_{air} \end{pmatrix} \quad (20)$$

$$T_{i(n+1)} = \frac{h}{\mu} T_{m(n+1)} + \left(\frac{\mu - h}{\mu} \frac{\alpha}{\mu} \frac{1}{\mu}\right) \begin{pmatrix} T_e \\ R_g \\ Q_{air} \end{pmatrix} \quad (21)$$

Où τ est la constante de temps du système et μ un paramètre intermédiaire du système défini par :

$$\tau = \frac{C_m \mu}{h\mu - h^2} \quad \text{et} \quad \mu = h + K + K_s \left[\frac{(B_0 + 1)}{B_0} \right]$$

La solution issue de la résolution du système composé par les équations (19) et (21) (qui considère que la serre se comporte comme un système thermique d'ordre 1), permet de prédire la température d'air en régime dynamique, connaissant les sollicitations, les caractéristiques et l'état des commandes du système.

III.4- APPROCHE DU BILAN D'ENERGIE DE LA SERRE

L'intégration du bilan d'énergie (éq. 12 et 19) conduit à un système de deux équations à deux inconnues (T_m et T_i) exprimées en fonction :

- de leur valeur au pas de temps précédent,
- des conditions aux limites : R_g , T_e , p_e , p_i , V ,
- des variables de commande Q_{sol} et Q_{air} , s ,
- des paramètres physiobiologiques de l'ensemble serre-culture : h , K ,
 C_m , α , β , τ , s_0 , d_0 , $AL\sqrt{C}$

Ce sont ces paramètres que nous nous proposons d'identifier.

Le système suivant constitue, sous forme récurrente, le modèle thermo-énergétique d'une serre cultivée.

CHAPITRE IV

DISPOSITIF EXPERIMENTAL



L'objectif de ce chapitre est de présenter l'ensemble du dispositif expérimental mis en œuvre dans ce projet d'identification des paramètres du modèle thermo- énergétique de serre ainsi que les instruments qui y sont associés.

IV.1- DESCRIPTION DE LA SERRE ET SES EQUIPEMENTS

La serre dans laquelle les données expérimentales ont été recueillies est située dans le domaine de la Faculté des sciences agronomiques de l'université d'Alexandrie en Egypte.

La serre est composée de deux modules jumelés, dont les fermes de la toiture sont en forme d'anse de panier (type serre tunnel multiple). Elle est bien exposée aux rayonnements du soleil et occupe une surface couverte de 960 m². Les dimensions de chaque module sont : 12 m de largeur ; 40 m de profondeur et 4,5 m de hauteur. La structure est entièrement en tubes métalliques légers et galvanisés. La couverture est constituée d'une simple paroi en polyéthylène PE infrarouge. Les côtés de part et d'autre de la serre sont habillés en PVC ondulé et sont aussi aménagés de sas. Les portes d'accès glissantes de 3 m de large et 2,50 m de hauteur sont souples de manipulation et étanches. La serre est équipée d'un voilage (ombrage) situé à 3 m de hauteur, qui peut être actionné mécaniquement. Le renouvellement d'air (aération de la serre) est assuré par huit extracteurs (extraction d'air par ventilation) de 0,80 m de côté, disposés par paire et par pignon. En dehors et pas loin de la serre deux loges sont installées, l'une abrite les équipements de climatisation (chaudière à Mazout, pompes, thermométries, etc...) et l'autre l'ordinateur de contrôle et des commandes.

Le système de chauffage est constitué de deux sous – systèmes :

a) Un chauffage au niveau du sol par tubes PVC raccordés et posés sous forme de serpent. Cette technique met en jeu des équilibres de températures dans l'air et dans le sol.

b) Un chauffage aérien, assuré par quatre aérothermes répartis par paire dans chaque module et situés dans l'axe à 4 m de hauteur.

L'irrigation et la fertilisation sont réalisées simultanément par l'intermédiaire d'un système de goutte à goutte qui est géré par un automate de fertirrigation.

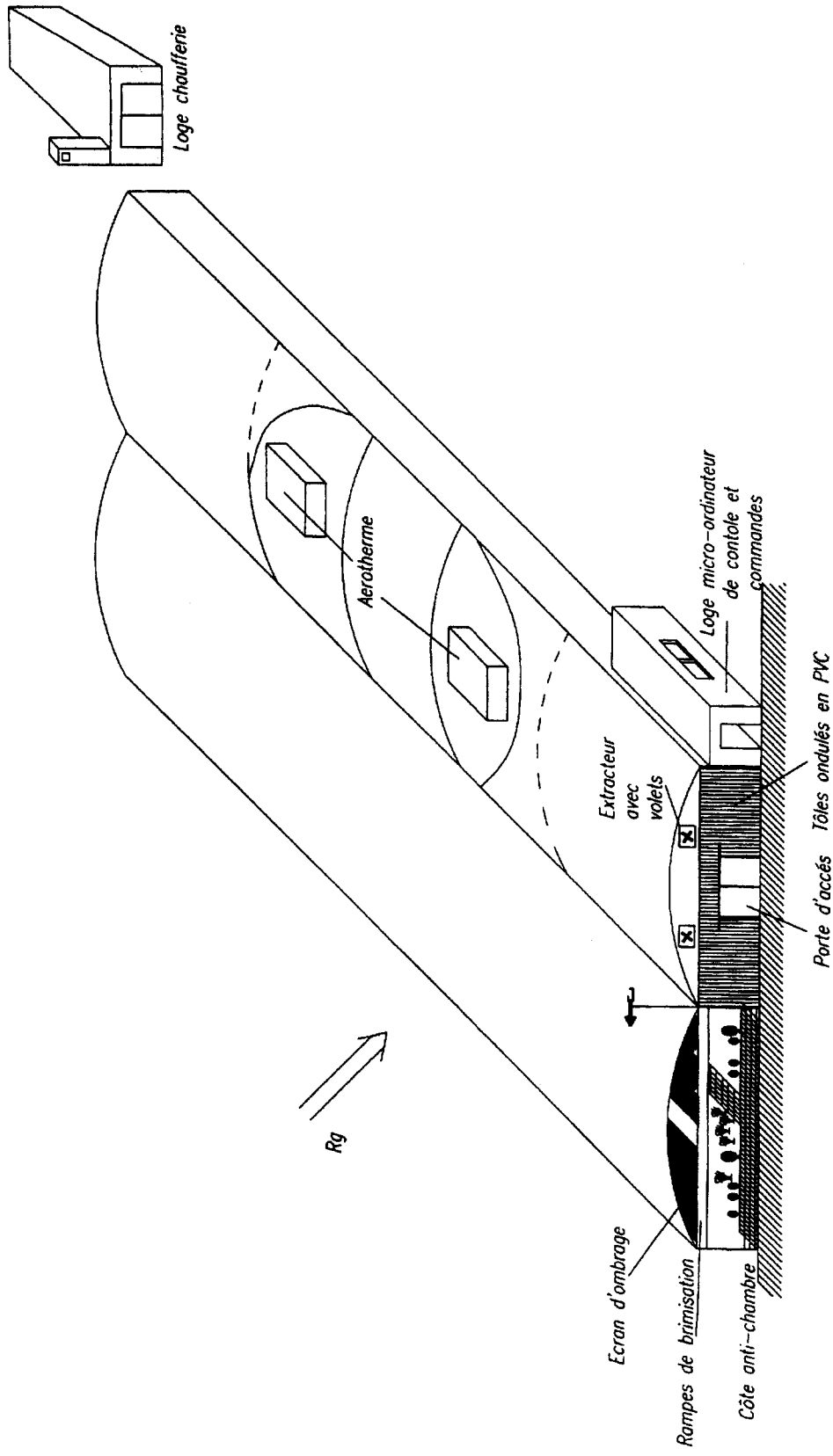


Figure.19 :Schéma de la serre expérimentale

Dans la loge de l'ordinateur de contrôle et des commandes sont installées des armoires électriques qui centralisent toutes les mesures, les dispositifs de commande et d'alarme ainsi que les relais.

IV.1.1- Microordinateur : Fig 21

Le microordinateur installé dans cette station de recherche agronomique date de 1994. Il est constitué de cartes reliées par un bus G 64. Il comporte une unité centrale 6809, une carte convertisseur A/D qui réalise l'acquisition périodique des données, une carte d'interface de puissance qui permet d'actionner les relais et les actionneurs.

Il a pour rôle d'affiner les lois d'évolution de conduite des cultures et d'améliorer le contrôle par un algorithme multivariable. Il permet de plus d'améliorer la sécurité par une surveillance permanente des données et un déclenchement éventuel d'alarme.

En fonctionnement normal, c'est l'algorithme de contrôle optimal qui assure le contrôle. En cas d'incident, on commute sur un algorithme de commande logique plus robuste.

La régulation et surveillance par tests logiques se font selon un algorithme multivariable basé sur des opérations de tests logiques.

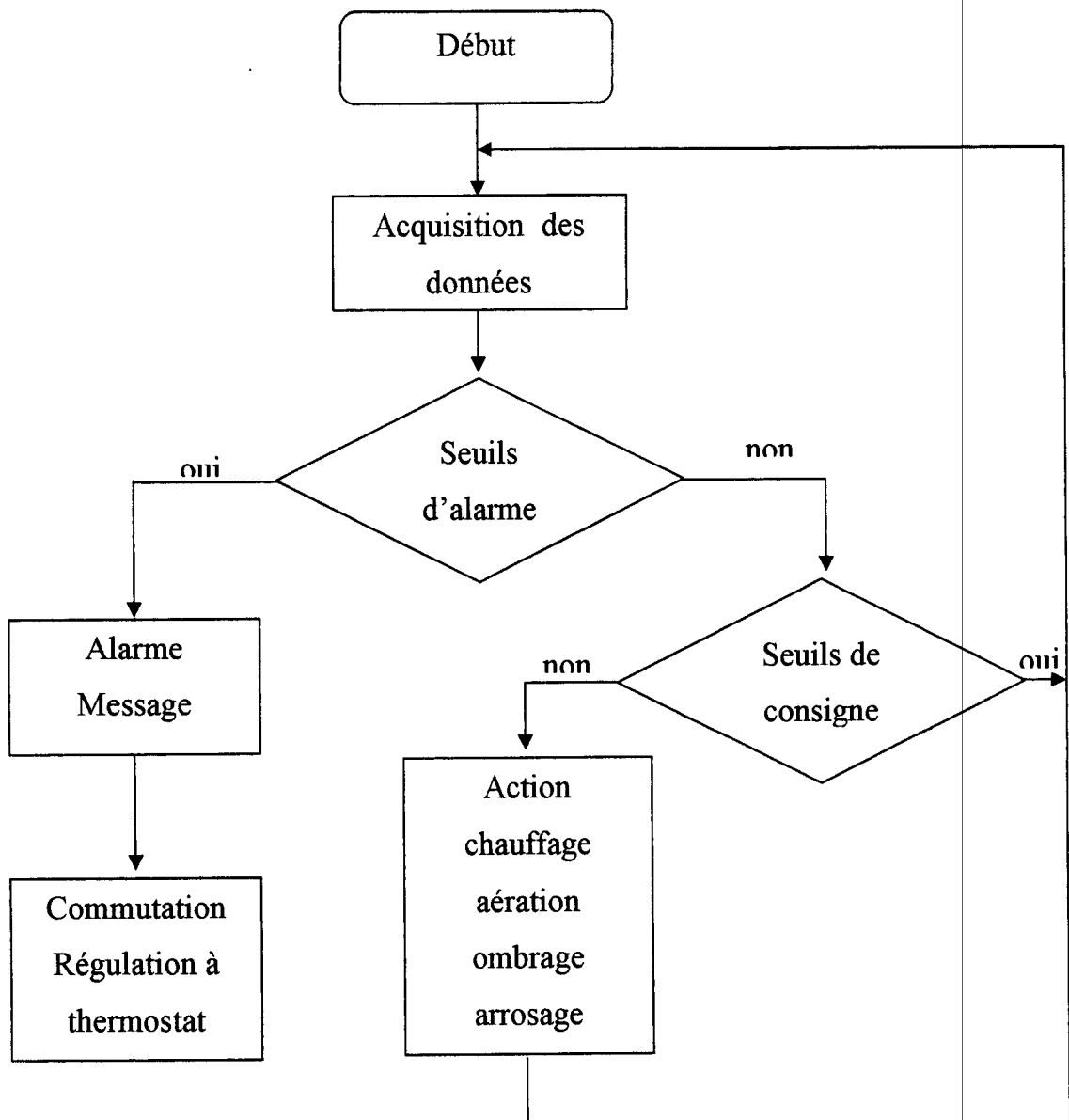


Figure. 20 : Algorithme de régulation.

Les actions (chauffage, aération, arrosage, ombrage, alarme) sont effectuées en fonction de seuils de consignes et d'alarmes par rapport aux variables internes (température, humidité) et à des variables de perturbations externes (température, hygrométrie, rayonnement global, vitesse du vent).

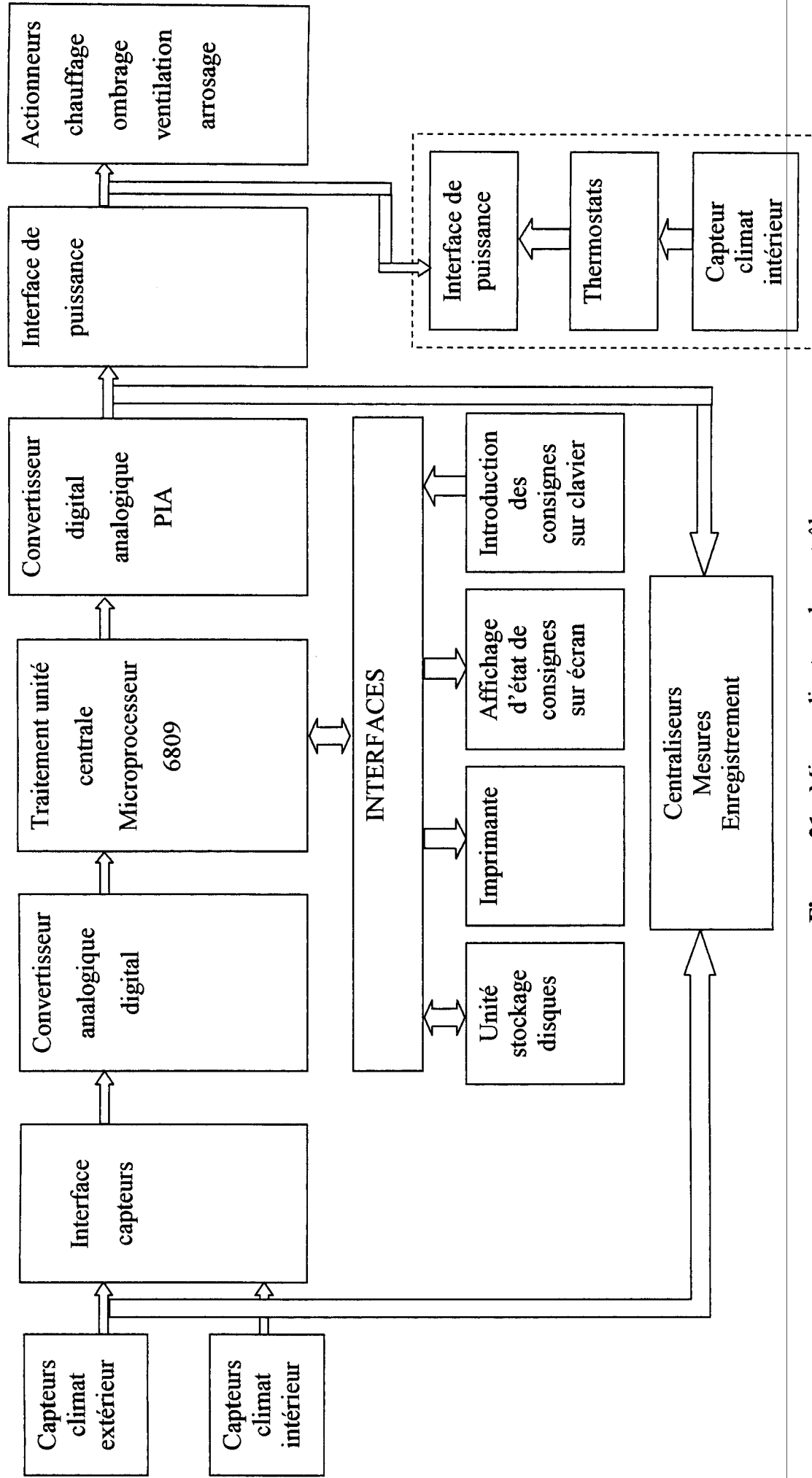


Figure. 21 : Microordinateur de contrôle.

IV.1.2- Les capteurs utilisés

- Mesure de la vitesse du vent

Les mesures de la vitesse du vent se font par un anémomètre à coupelles, dont la détection de rotation par électro-optique a une impulsion par tour. La résolution se fait à partir d'un mètre de vent passé avec une sensibilité de 0,2 m/s et dont la plage de mesure varie de 0,2 m/s à 64 m/s.

Une girouette potentiométrique installée au dessus de la serre, a une sensibilité de 0,2 m/s et dont la plage de mesure varie de 0° à 360°.

- Mesure de rayonnement global

Les capteurs utilisés sont des pyramomètres à thermocouple de type blanc et noir de marque ENERCO, effectuent la mesure des rayonnements globaux à l'extérieur et à l'intérieur avec une précision de 1 % et une sensibilité approximative de 100 mV/mw/ cm².

- Mesure de la pression partielle de vapeur d'eau de l'air

Des capteurs barométriques de précision (marque ERCO) effectuent les mesures à l'extérieur et à l'intérieur avec une linéarité de 0,1 hPa et une précision de 0,3 hPa.

- Mesure de la température et de l'humidité de l'air

La station est équipée de psychromètres de marque CIMEL Electronique, utilisant des sondes à résistance électrique (sonde à cuivre) qui présentent l'avantage d'un enregistrement permanent et fiable.

Le psychromètre est composé de deux sondes de températures placées côte à côte, isolées du rayonnement solaire et situé à 1,5 m du sol au milieu de la serre et à l'extérieur.

- La première, est une sonde sèche qui permet la mesure de la température sèche de l'air,

- La seconde est une sonde humide enrobée d'une mousseline qui la maintient mouillée grâce à un apport d'eau en provenance d'un réservoir situé à proximité. Cette température varie donc en fonction du pouvoir évaporant de l'air et de la ventilation. L'utilisation de la constante psychrométrique permet de

calculer l'humidité de l'air en connaissant les températures des bulbes secs et humides.

- **Mesure de la concentration du CO₂ de l'air**

La station est aussi équipée d'un analyseur de CO₂ à infrarouge (IRGA) de marque Leybold, qui permet de mesurer les concentrations en CO₂ avec une précision ± 5 ppm (partie par million).

- **Mesure de l'énergie consommée**

Le comptage de l'énergie consommée par le système de chauffage est effectué à l'aide de compteur de calorie avec une précision de ± 10 w/m².

Le récapitulatif des mesures enregistrées à l'extérieur de la serre ainsi que les variables de commandes, est le suivant :

- La température de l'air extérieur mesurée à 1,5 m du sol au milieu de la serre ;
- La pression partielle de la vapeur d'eau de l'air extérieur mesurée à 1,5 m du sol à côté de la serre ;
- Le rayonnement global mesuré à 4,5 m du sol (sur le toit de la serre) ;
- La vitesse du vent mesurée à 4,5 m du sol (sur le toit de la serre) ;
- Le chauffage d'air et du sol mesuré à l'aide de compteur de calorie.

IV.2- CONCEPTION DU LOGICIEL SERRISTE

L'approche retenue est une méthode d'intelligence artificielle dite de résolution par satisfaction de contraintes. Toutes les connaissances sont exprimées sous forme de contraintes. Pour chaque variable, le domaine des valeurs souhaitables, plus ou moins acceptables ou exclues est défini. Pour élaborer des consignes, le système examine, pour l'ensemble des variables, toutes les combinaisons de valeurs qui satisfont toutes les contraintes. Le mécanisme de résolution est basé sur les algorithmes de filtrage et de recherche arborescente, utilisés classiquement en intelligence artificielle. Une fois toutes les combinaisons acceptables de valeurs identifiées, SERRISTE détermine la meilleure selon une

hiérarchie de critères dépendants du contexte. L'élaboration du système comprend deux phases distinctes :

- La première consiste à inventorier et analyser les connaissances (biologiques, physiques et empiriques) nécessaires, à identifier les paramètres pertinents pour décrire les situations et les valeurs qu'ils prennent. L'objectif est de constituer un corps complet de connaissances, formalisées en modules indépendants. Les connaissances sont exprimées soit sous forme de modèles simples de fonctionnement de la culture et de la serre, soit sous forme de relations empiriques, déduites de l'analyse des pratiques des serristes et de l'expertise des recherches.

- La seconde phase est la constitution du réseau de contraintes, qui relie et hiérarchise les différentes variables considérées dans la base de connaissances. C'est à ce niveau d'intégration et d'organisation de l'ensemble des connaissances et des informations qu'est prise en compte la complexité liée à la multiplicité des objectifs et des contraintes à satisfaire.

IV.3- LA CULTURE

La culture pratiquée pendant cette période est la tomate, semée dans une serre d'élevage, repiquée un mois après. Le repiquage en paquet de contenu d'un godet dans le sol de culture définitive sous serre paraît comme la meilleure solution. Il assure un démarrage très rapide dès que les racelles ont de l'espace à leur disposition et un sol riche, et bien travaillé.

Les conditions bioclimatologiques sont tracées avec rigueur par les spécialistes de l'agronomie.

CHAPITRE V

RESULTATS

EXPERIMENTAUX ET VALIDATION

Nous présentons dans ce chapitre les résultats expérimentaux portant sur la caractérisation dynamique de la serre et correspondant aussi à l'étude du problème « inverse ». Nous montrons comment, à partir des mesures expérimentales obtenues sur la serre, on peut accéder par identification à un certain nombre de paramètres du système « serre et culture ».

Les principales étapes dans ce chapitre sont rappelées sur le schéma de la figure 22 :

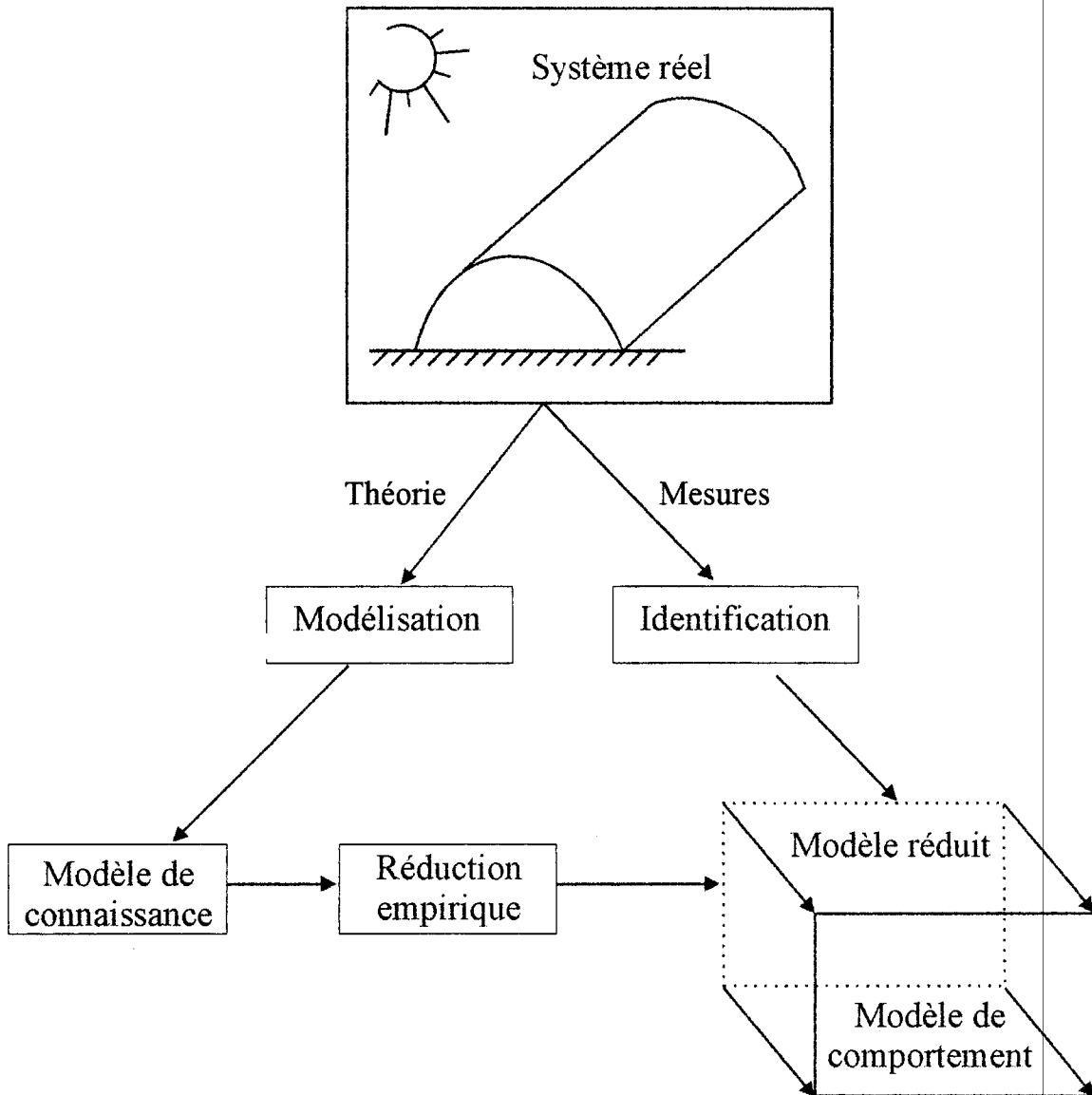


Figure. 22 : Schéma des étapes de l'identification et de la validation

La recherche d'une solution identifiée doit être la moins dépendante possible des erreurs et dysfonctionnements inhérents aux conditions expérimentales ; Pour cela nous avons été amenés à définir une méthodologie rigoureuse tant au niveau de la définition des entrées et des sorties qu'à celui de la conduite des expérimentations.

V.1- VALIDATION DE LA THEORIE

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté les fondements théoriques de l'approche utilisée. L'étape suivante consiste à confronter cette approche théorique à la réalité, celle du comportement dynamique d'une serre réelle.

L'identification d'un modèle de comportement dynamique d'une serre fournit deux genres de résultats :

- Une estimation des sorties de la température intérieure que l'on désire ;
- La valeur des paramètres liés au modèle utilisé.

Les résultats concernant le modèle dynamique peuvent difficilement faire l'objet d'une confrontation avec des résultats connus : personne pour le moment ne peut prétendre construire un modèle de connaissance qui puisse être pris comme référence absolue, encore moins un modèle réduit tel que celui que nous allons identifier. Dans ce cas, il y a nécessité de justifier expérimentalement qu'un modèle identifié à partir d'une séquence donnée peut constituer un bon modèle de comportement pour des séquences différentes : **c'est l'étape de validation.**

La connaissance préalable de certaines caractéristiques statiques du modèle de la serre telles que :

- ✓ Le coefficient d'échange global K estimé à partir de calcul des déperditions en régime permanent,
- ✓ Le coefficient de captation solaire α ,
- ✓ Le coefficient de débit $AL\sqrt{C}$ obtenu par mesure de l'aération en utilisant des gaz traceurs en régime stationnaire [19, 22, 24, 33, 37].

Toutefois, nous devons conserver à l'esprit une particularité du problème qui fait partie de l'étude : nous essayons de déterminer expérimentalement le paramètre α qui se réfère à un état stationnaire de la serre, état qui ne peut être atteint en pratique en raison de la variation des conditions climatiques.

Pour réaliser cette comparaison, il faut donc se ramener à des conditions expérimentales voisines de celle du régime permanent. Nous pouvons y parvenir en remplaçant l'obtention d'un état stationnaire par l'analyse de valeurs moyennes sur des périodes suffisamment longues.

La dispersion inévitable que nous allons rencontrer dans nos résultats aura différentes causes, de nature bien distincte :

- d'une part, la variation de sollicitations (conditions météorologiques) entraîne une variation des paramètres statiques ;

- d'autre part, la technique d'identification comporte des imprécisions liées aux principes mathématiques mis en œuvre et aux conditions de réalisation des essais.

Les résultats que nous allons présenter sont donc marqués par une certaine marge d'incertitude, comme c'est le cas de toute étude expérimentale. Cette incertitude est due, d'une part à l'inadéquation des modèles adoptés et, d'autre part, à l'imprécision des techniques de mesure mise en œuvre.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats des différents tests sous forme de tableaux du bilan thermo- énergétique. Les valeurs sont présentées avec leurs intervalles de confiance, ce qui permettra, par comparaison, avec les valeurs obtenues, de juger de leur pertinence et de leur sens physique.

Enfin, devant le nombre élevé des entrées et des paramètres, nous avons été amenés à figer certains paramètres dont-on peut estimer à priori la valeur.

V.2- LES DIFFICULTES EXPERIMENTALES RENCONTREES

Une autre difficulté inhérente au problème d'identification réside dans la qualité des données expérimentales. Les résultats de simulation engendrés par identification sont précis en conditions de laboratoire, mais dès que l'on aborde le

problème réel, c'est-à-dire l'utilisation des données in situ, le problème se complique. En effet :

- Pour effectuer des mesures (entrées – sorties), il faut une chaîne d'acquisition qui, quelle que soit sa qualité, cumule à tous les niveaux des erreurs dont nous n'avons pas la maîtrise ;
- Le système (serre) n'est pas linéaire, alors que les modèles utilisés pour simuler son fonctionnement sont linéaires, cela représente une source d'erreur dont l'importance est difficile à évaluer ;
- Enfin, les phénomènes de bruitage que nous avons négligé au niveau théorique, jouent dans la réalité un rôle non négligeable. Ces bruits sont de deux sortes :
 - Les bruits liés aux mesures,
 - Les bruits liés au système étudié.

Nous allons passer en revue ces différents aspects dans ce qui suit :

V.2.1- Problèmes posés par la qualité et la nature des mesures d'entrée et de sortie

Un système d'acquisition est constitué de plusieurs éléments dont chacun occasionne une source d'imprécision. Parmi les causes d'imprécision les plus importantes qui influent sur les mesures, on peut citer :

- La qualité de l'étalonnage des différents capteurs (sondes de température, d'hygrométrie et de rayonnement et compteurs de calories) ;
- La précision du système conversion analogique / numérique.

Il y a en outre le pas d'échantillonnage qui, d'après la théorie des signaux, doit être au moins supérieur au double de la plus grande fréquence du phénomène que l'on souhaite observer (théorème de Shanon). Il ne faut pas oublier non plus l'inertie des sondes de mesures qui doit être prise en compte au niveau du choix du pas d'échantillonnage.

Dans notre cas un pas horaire semble représenter un bon compromis entre les dynamiques lentes et rapides. Comme il a été évoqué, quelle que soit la séquence d'entrée, l'algorithme converge nécessairement vers une solution. Pour

que cette solution puisse être considérée comme une solution acceptable, il faut que les signaux d'entrée satisfassent aux conditions supplémentaires suivantes :

-éviter ou minimiser les corrélations entre variables d'entrée ; une forte corrélation entre deux entrées ne permet pas à l'algorithme de distinguer l'effet de chacune des entrées sur les sorties et l'empêche quelquefois de converger vers une solution unique ;

-de plus, nos variables de sortie (température et humidité intérieures) ne font pas à proprement parler l'objet d'une « mesure », mais plutôt d'une estimation, du fait des fortes hétérogénéités spatiales rencontrées sous serre.

V.2.2- Problèmes inhérents au comportement du système

La serre peut être considérée comme un système biotechnique constitué d'un ensemble de compartiments. Elle est aussi le siège de phénomènes biologiques et physiques complexes dont la modélisation ne peut donner qu'une représentation approximative.

Les déformations du système (non connues et négligées dans l'établissement des modèles de connaissance) sont une difficulté supplémentaire pour l'identification d'un modèle de comportement à partir de mesures sur site. Elles sont dues:

➤ d'une part, à la présence des plantes (Identifier les paramètres d'une serre vide et d'une serre cultivée donnera des résultats très différents, du fait que la plante est elle-même un système biophysique complexe et évoluant constamment) ;

➤ d'autre part, à la présence de personnes travaillant à l'intérieur de la serre (intervention sur la culture, ouverture et fermeture des portes ...) et pouvant influencer sur la mesure et le comportement thermique de la serre.

Du point de vue thermique, une serre cultivée n'est donc pas un système statique :

✓ Les échanges convectifs de la couverture et l'air environnant varient avec la vitesse et la direction frontale ou tangentielle, car c'est toujours un écoulement turbulent, qui ne dépend que de Reynolds, donc de la vitesse du vent et de l'échelle dimensionnelle de la paroi concernée.

✓ L'absorption de l'énergie solaire dépend de la saison, de la proportion entre rayonnement direct et diffus, de l'état des films de couverture de la toiture et du sol, du développement de la culture, etc...

✓ Les échanges convectifs à l'intérieur dépendent du niveau de la température et de l'humidité intérieure, du brassage d'air...

✓ Les échanges par renouvellement d'air dépendent en plus du niveau d'ouverture des ouvrants, et de la ventilation, de l'étanchéité de ceux-ci ainsi que de l'étanchéité globale de la serre, sans parler des portes qui pouvant être laissées ouvertes par inadvertance.

Nous savons en outre, qu'un certain nombre de transferts (rayonnement infrarouge, convection naturelle,...) correspondent à des phénomènes non linéaire qui ont été simplifiés dans l'approche théorique.

V.3- RESULTATS

Dans cette étape de validation, nous allons tester expérimentalement la méthode, en déterminant le critère ϵ servant à évaluer la précision des résultats obtenus à partir de l'équation du bilan d'énergie.

V.3.1- Identification des paramètres de l'équation du bilan d'énergie utilisant le rapport de Bowen (eq. 12, 20 et 21)

Le grand nombre de paramètres à identifier nous a conduit à en fixer certains, ceux dont les valeurs peuvent être estimées connues a priori avec une bonne précision :

K , le coefficient de déperdition global (pris égal à $K = 7,6 + 0,42 V$) ;

$AL\sqrt{C}$: coefficient relatif au flux de ventilation, déterminé à partir de l'étude de la modélisation de la ventilation naturelle et dont la valeur sera prise égale à 0,2 ;

β : coefficient d'absorption solaire au niveau du sol de la serre, fixé à $\beta = 0$ du fait de la présence d'un plastique blanc de fort albédo recouvrant la totalité du sol.

S_0 : surface de fuite, estimé à $0,7 \text{ m}^2$ à partir des mesures de renouvellement d'air.

d_0 : débit de fuite, fixé à $0,6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ à partir des même mesures de renouvellement de l'air.

Ces paramètres étant fixés, les paramètres de l'équation du bilan d'énergie (équations 20 et 21) à identifier sont alors :

- ✓ T_{m0} : température initiale de la masse thermique ($^{\circ}\text{C}$) ;
- ✓ C_m : capacité calorifique de la masse thermique ($\text{J m}^{-2} \text{K}^{-1}$) ;
- ✓ h : coefficient d'échange convectif entre l'air et la masse thermique ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) ;
- ✓ α : taux d'absorption du rayonnement global extérieur par l'air et la végétation ;
- ✓ τ : constante de temps du système (h) qui est en fonction des autres paramètres.

Le tableau 3 présente les valeurs de ces paramètres pour neuf séquences de mesures des variables d'entrée et de sortie du système (les séquences sont des périodes d'une semaine, avec scrutation horaire).

La valeur du critère de minimisation $\varepsilon = \sqrt{\frac{J}{N}}$ est également donnée dans ce tableau. La variable de sortie prédite est la température.

Tableau 3 : Valeurs identifiées des paramètres T_{m0} , C_m , α , h , et τ durant les séquences d'une semaine entre octobre 2001 et juin 2002. Les paramètres fixés à priori $K= 7,2 + 0,42 V$; $AL\sqrt{C}= 0,2$; $\beta=0$; $s_0= 0,7 \text{ m}^2$; $d_0= 0,6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ et ε est le critère d'optimisation.

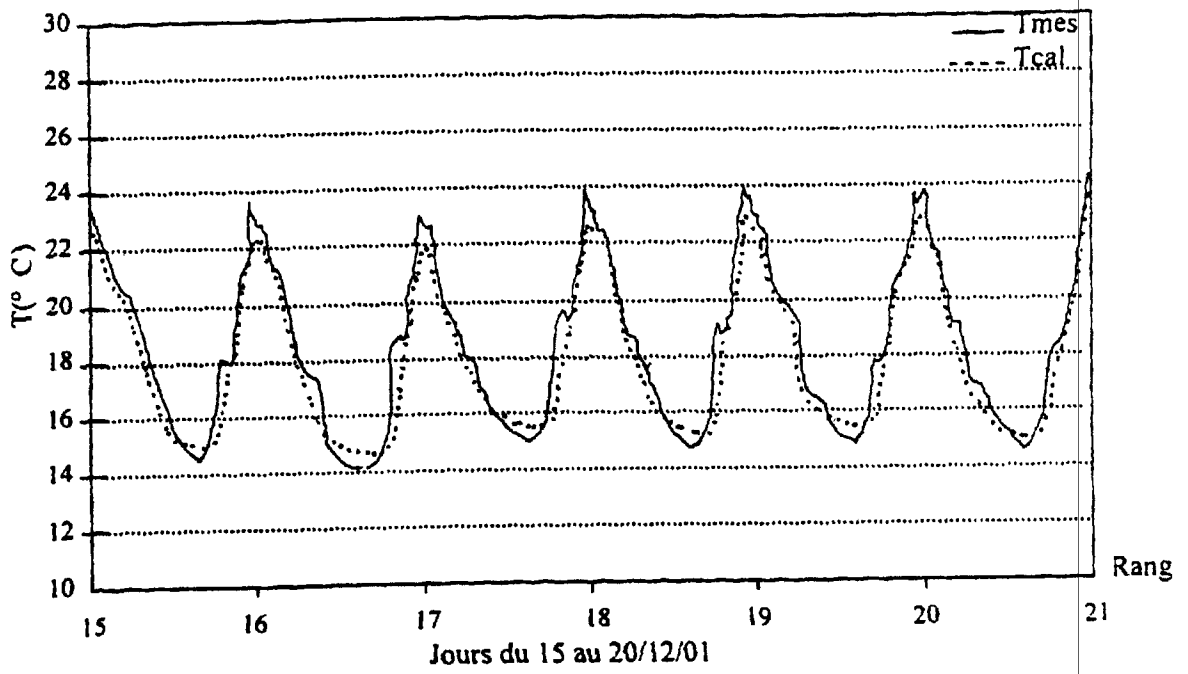
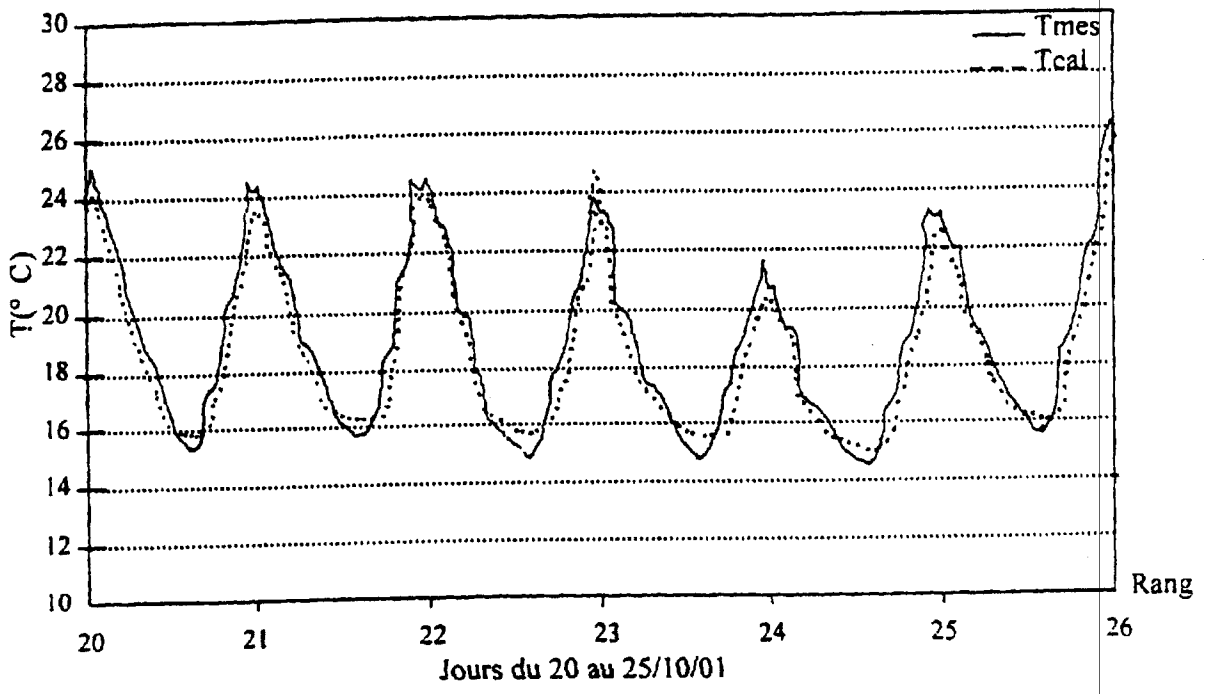
Séquences par mois	$T_{m0}(\text{°C})$	C_m ($\text{KJm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	α	h ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	τ (h)	ε (°C)
Octobre 20 au 25-01	$14,2 \pm 7,2$	327 ± 354	$0,49 \pm 0,090$	$22,3 \pm 4,1$	23,43	1,34
Novembre 10 au 15-01	$17,5 \pm 1,2$	213 ± 235	$0,38 \pm 0,029$	$15,1 \pm 2,0$	18,84	1,05
Décembre 15 au 20-01	$15,4 \pm 1,5$	244 ± 251	$0,41 \pm 0,042$	$18,1 \pm 3,7$	19,40	1,03
Janvier 26 au 31-02	$15,1 \pm 1,4$	250 ± 274	$0,40 \pm 0,034$	$19,2 \pm 4,1$	19,14	1,11
Février 16 au 21-02	$16,1 \pm 1,1$	237 ± 211	$0,39 \pm 0,037$	$17,2 \pm 1,9$	19,31	1,14
Mars 09 au 14-02	$18,4 \pm 1,2$	201 ± 161	$0,33 \pm 0,08$	$14,4 \pm 2,1$	18,27	0,99
Avril 20 au 25-02	$18,7 \pm 1,8$	191 ± 143	$0,35 \pm 0,075$	$12,5 \pm 1,7$	19,30	1,09
Mai 11 au 16-02	$19,2 \pm 2,1$	177 ± 127	$0,32 \pm 0,01$	$11,6 \pm 1,4$	18,90	0,95
Juin 8 au 13-02	$23,1 \pm 2,4$	109 ± 76	$0,36 \pm 0,04$	$7,9 \pm 2,5$	15,45	0,47
Valeurs citées dans la littérature		80 à 300	0,3 à 0,4	10 à 20		

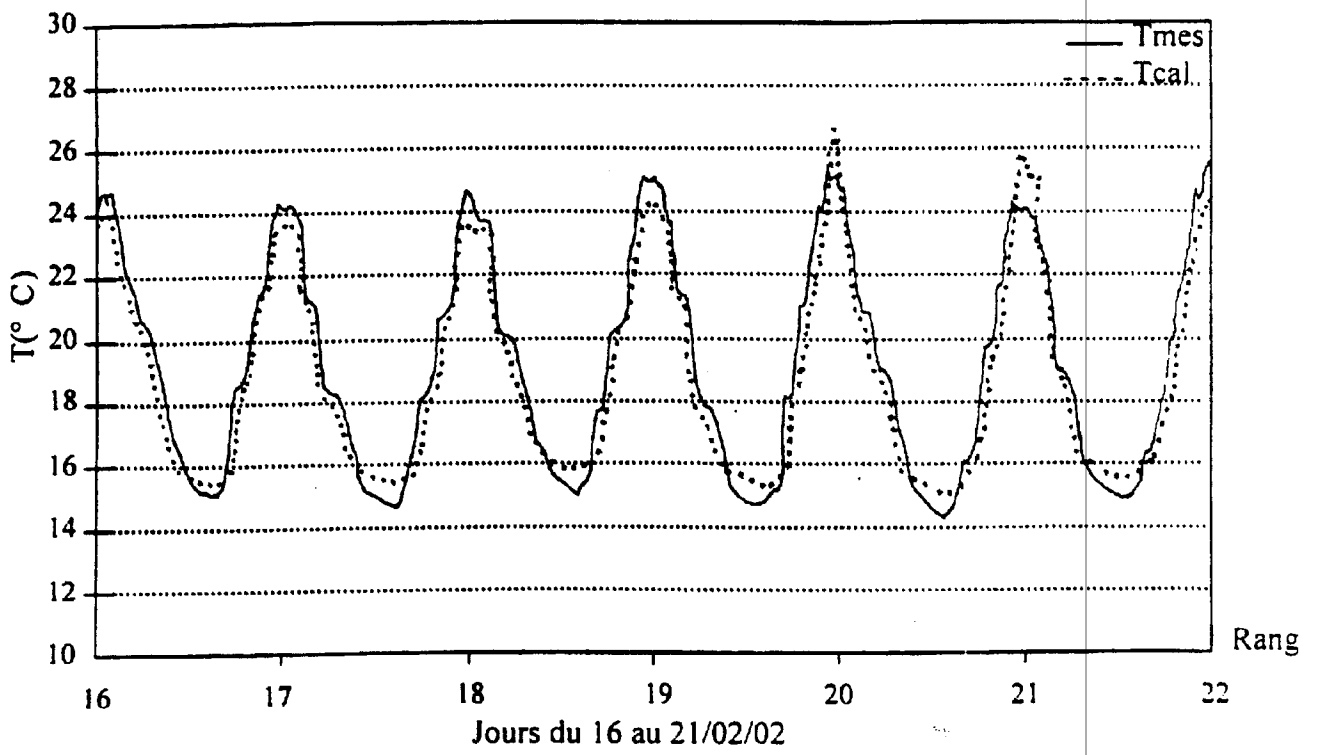
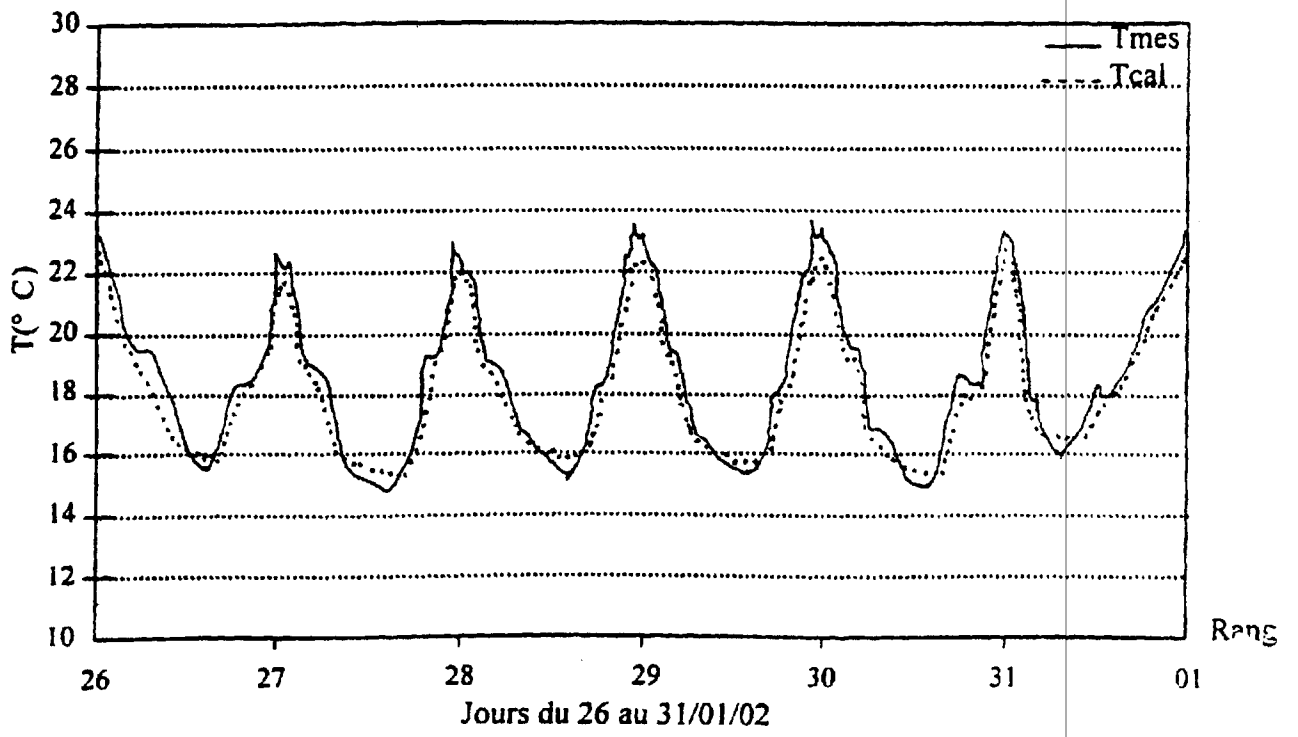
Commentaires sur le tableau 3 :

On constate que la séquence du mois d'octobre présente des valeurs peu réalistes, notamment :

- pour T_{m0} , la valeur de $14,2\text{°C}$ avec un intervalle de confiance de $7,2\text{°C}$ est largement indéterminée ;

- pour C_m , les valeurs varient de 109 à 327 $\text{KJm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Celle du mois d'octobre se démarque nettement des valeurs obtenues dans les autres séquences qui sont proches des valeurs citées dans la littérature (80 à 300 $\text{KJm}^{-2}\text{K}^{-1}$) ;





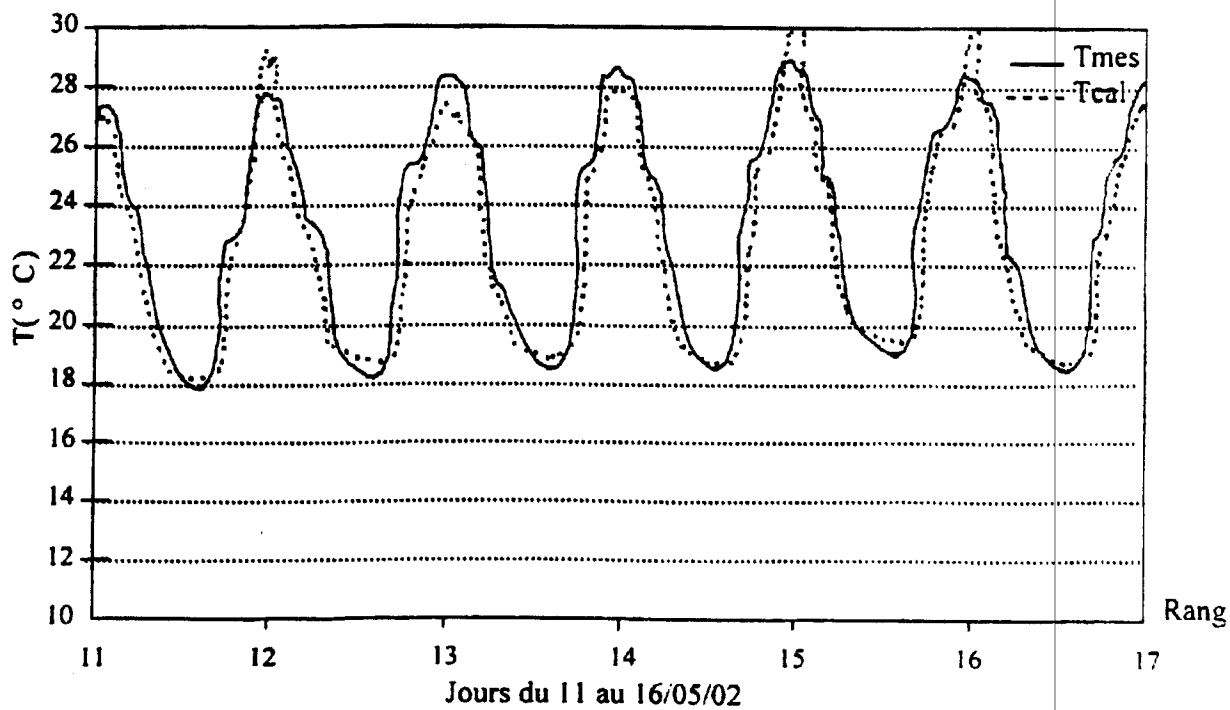
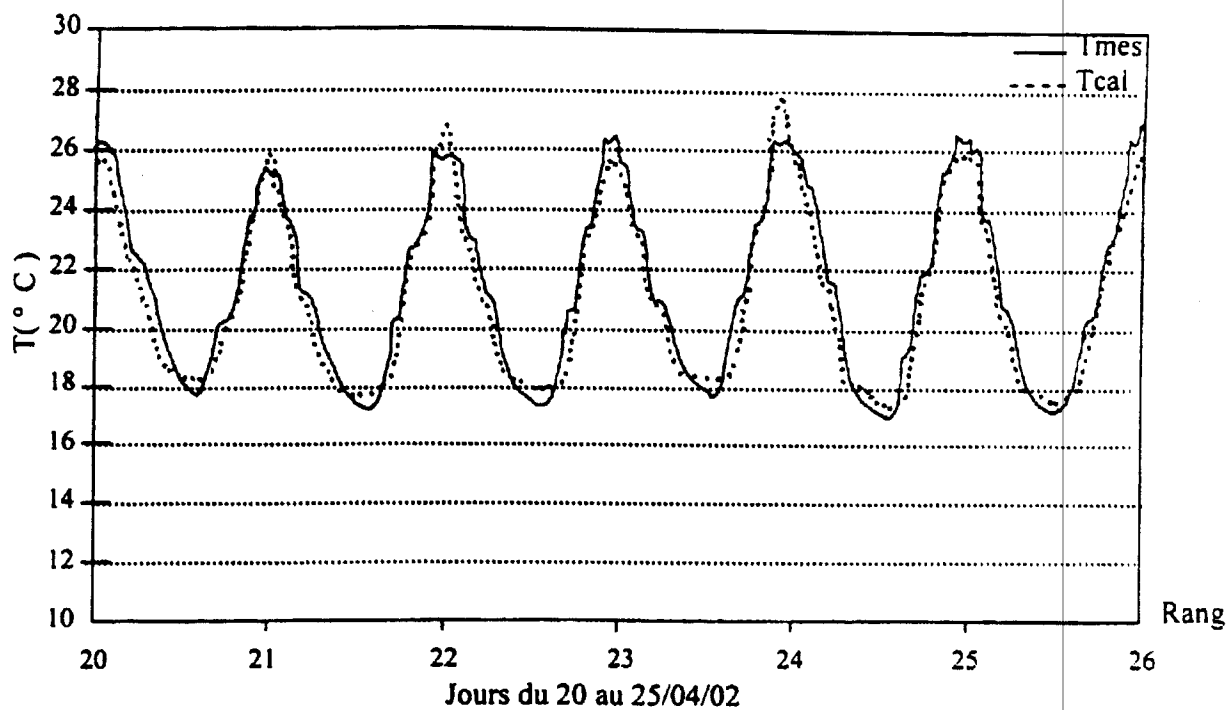


Figure. 23 : Valeurs de la température d'air de la serre, mesurées (T_{mes}) et calculées (T_{calc}) à l'aide des paramètres identifiés

- pour α , les valeurs restent en général dans un intervalle relativement étroit, celle du mois de décembre est légèrement au dessus de la limite supérieure de α théorique, et reste tout à fait plausible, alors que celle du mois d'octobre est assez élevée mais dans la limite de l'acceptable ;

- pour h , la valeur supérieure à $20 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ (séquence du mois d'octobre) est probablement assez élevée, alors que la valeur h du mois de juin légèrement au-dessous de la limite inférieure, reste dans l'acceptable ;

- pour τ , les valeurs obtenues restent raisonnables, excepté pour le mois d'Octobre où la valeur est élevée. Il faut noter que les valeurs normales de τ pour une serre se situent autour de 12 h. A titre de comparaison avec la constante de temps dans le bâtiment, les travaux de l'INSA de Lyon, ont permis de définir six classes de bâtiment, dont la constante de temps τ varie de 5 à 100 h, selon le type et les matériaux utilisés ;

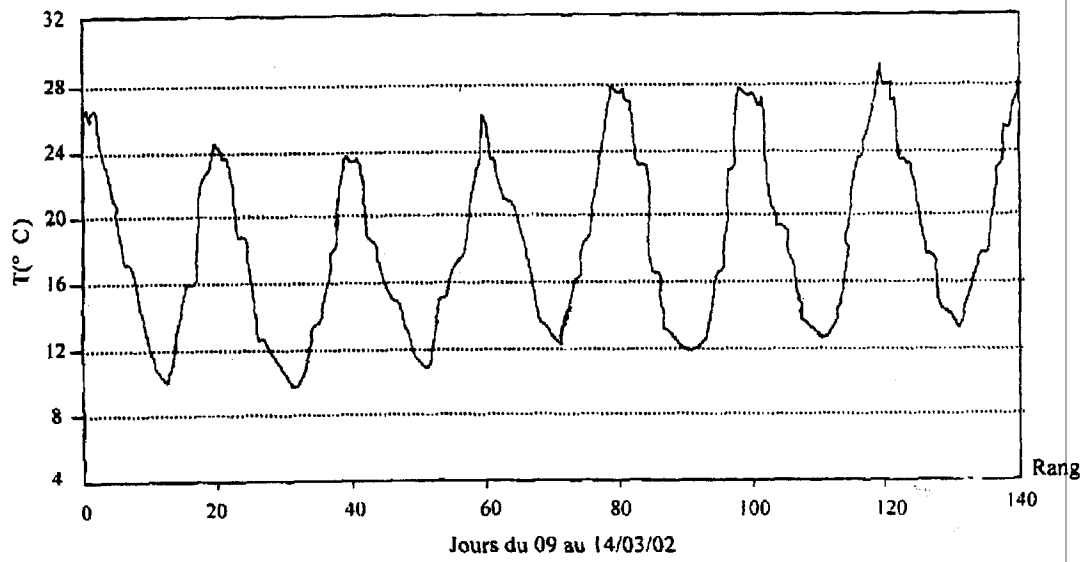
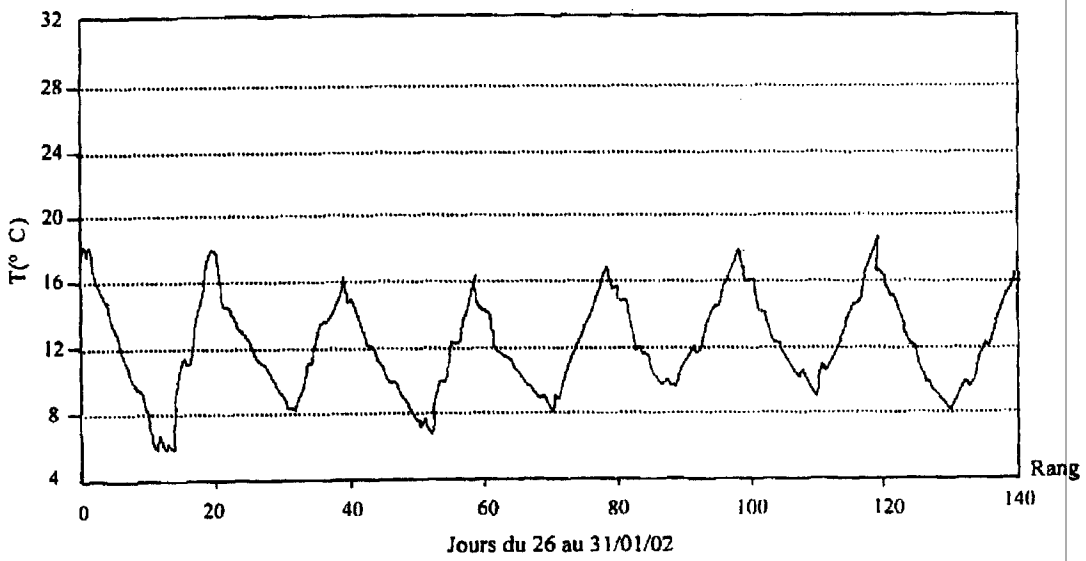
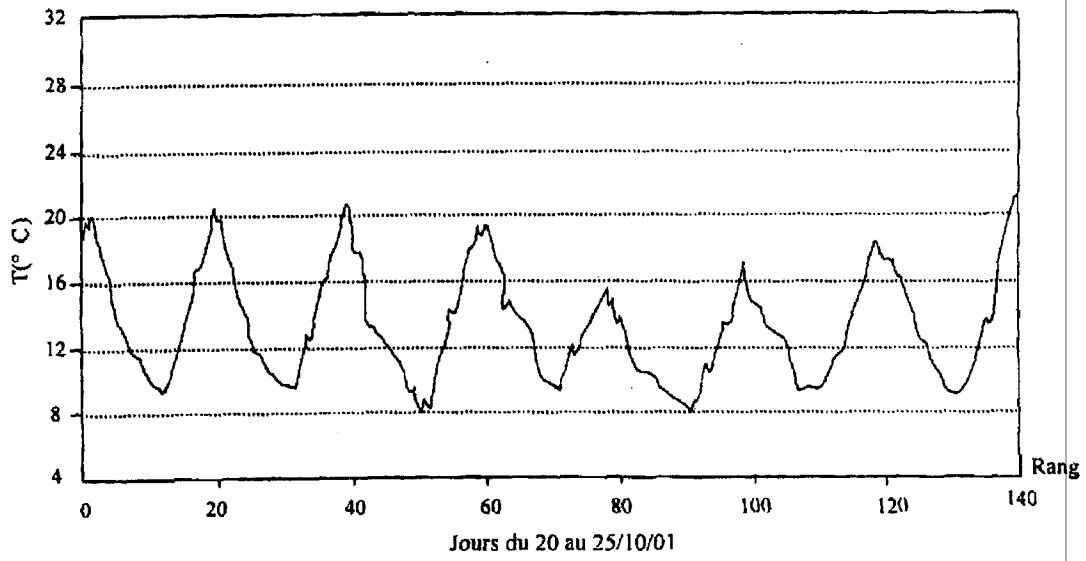
- le critère de minimisation ε est relativement satisfaisant (0,47 à 1,34).

Une deuxième tentative d'identification a été entamée en fixant a priori les valeurs de T_{m0} , avec le maintien de tous les paramètres fixés précédemment. Les résultats obtenus sont cités sur le tableau 4.

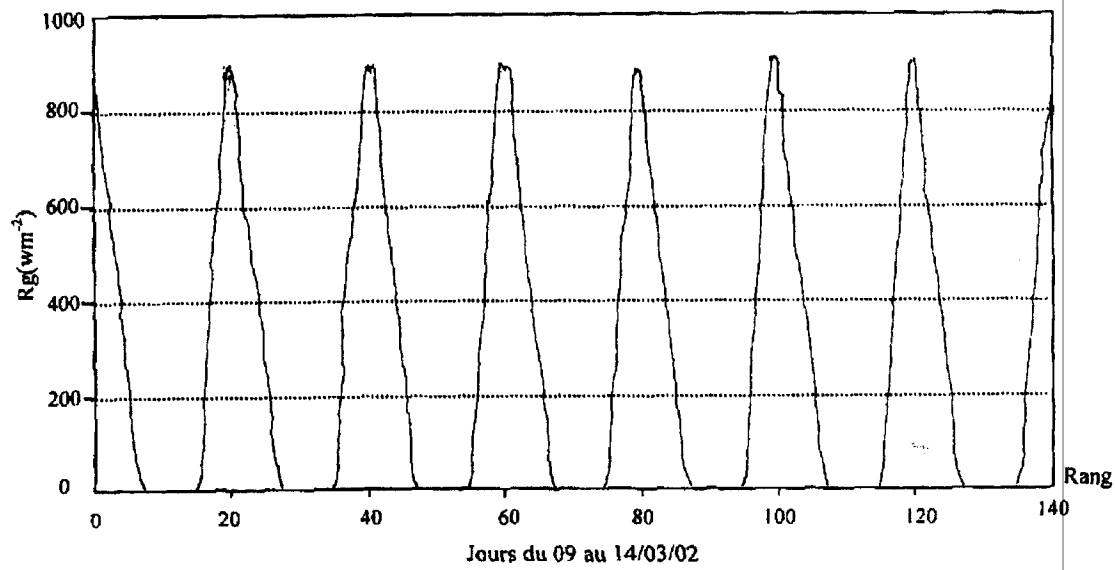
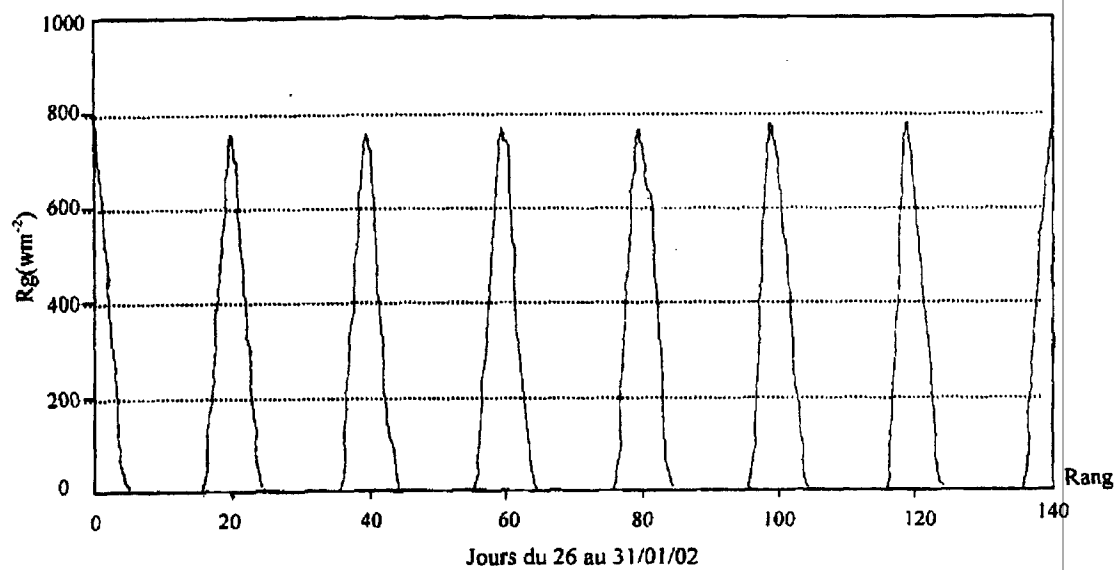
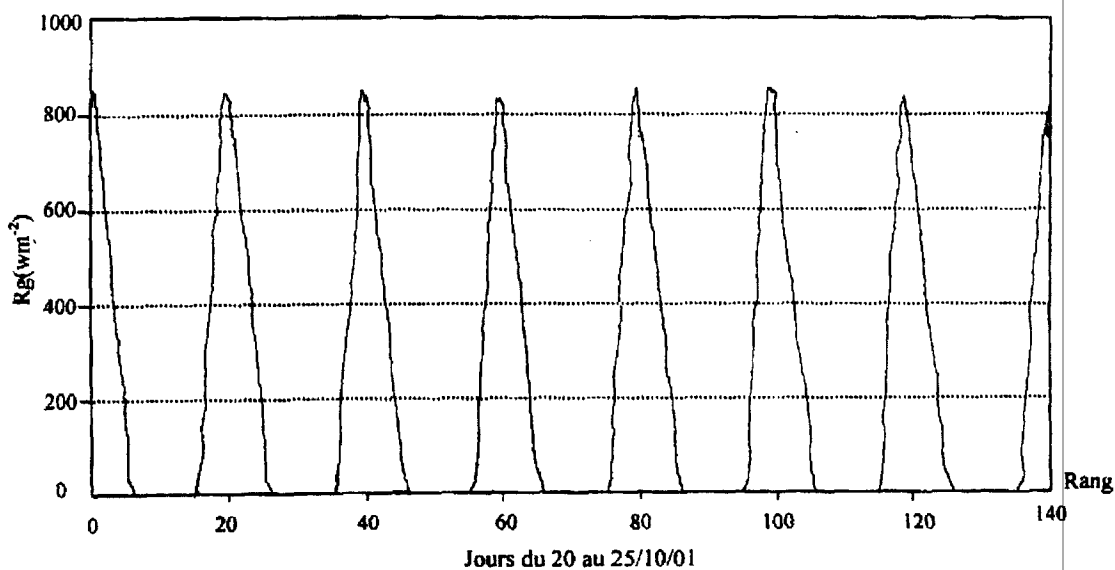
Tableau 4 : Valeurs identifiées des paramètres C_m , α , h , et τ durant les séquences d'une semaine entre octobre 2001 et juin 2002. Les paramètres fixés sont : $K= 7,2 + 0,42 V$, $AL\sqrt{C} = 0,2$, $\beta=0$, $s_0= 0,7 \text{ m}^2$, $d_0= 0,6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ et ε est le critère d'optimisation. Les valeurs obtenues sont pour T_{m0} fixée de $14 \text{ }^\circ\text{C}$ à $22 \text{ }^\circ\text{C}$ avec le pas d'un degré celsius. Ces températures sont matérialisées par (*).

Séquences par mois	$T_{m0}(\text{ }^\circ\text{C})$	C_m ($\text{KJm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	α	h ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	τ (h)	critère ε ($^\circ\text{C}$)
Octobre	14*	295 ± 237	$0,46 \pm 0,07$	$19,2 \pm 3,4$	19,40	1,07
Novembre	15*	254 ± 194	$0,40 \pm 0,03$	$18,3 \pm 1,9$	19,10	1,11
Décembre	16*	240 ± 175	$0,37 \pm 0,049$	$16,9 \pm 2,7$	18,91	1,14
Janvier	17*	214 ± 167	$0,38 \pm 0,051$	$15,1 \pm 2,9$	18,74	1,24
Février	18*	203 ± 196	$0,35 \pm 0,044$	$12,7 \pm 2,4$	18,17	1,15
Mars	19*	180 ± 149	$0,36 \pm 0,04$	$10,4 \pm 1,7$	17,74	1,03
Avril	20*	153 ± 127	$0,34 \pm 0,037$	$10,1 \pm 2,8$	15,91	0,95
Mai	21*	145 ± 104	$0,39 \pm 0,029$	$9,1 \pm 3,1$	14,54	0,91
Juin	22*	127 ± 97	$0,35 \pm 0,044$	$6,7 \pm 2,9$	11,20	0,77
Valeurs citées dans la littérature		80 à 300	0,3 à 0,4	10 à 20		

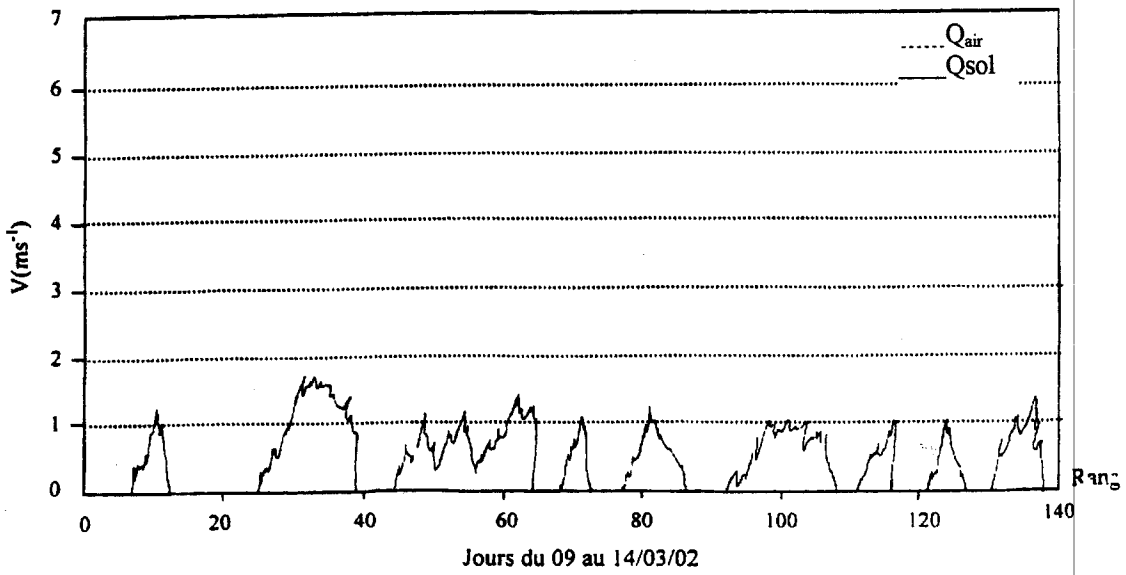
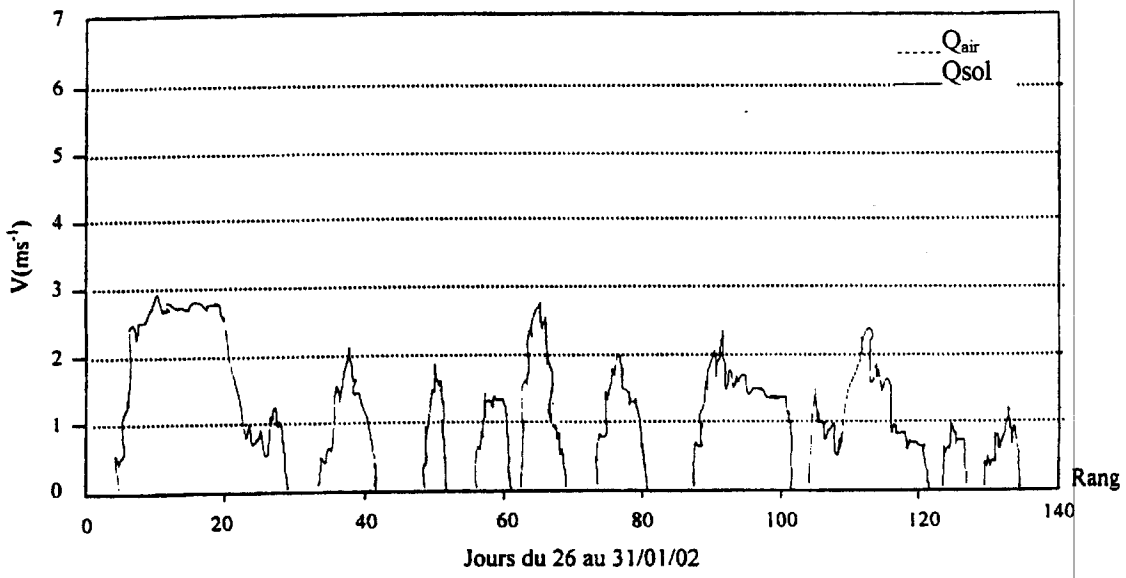
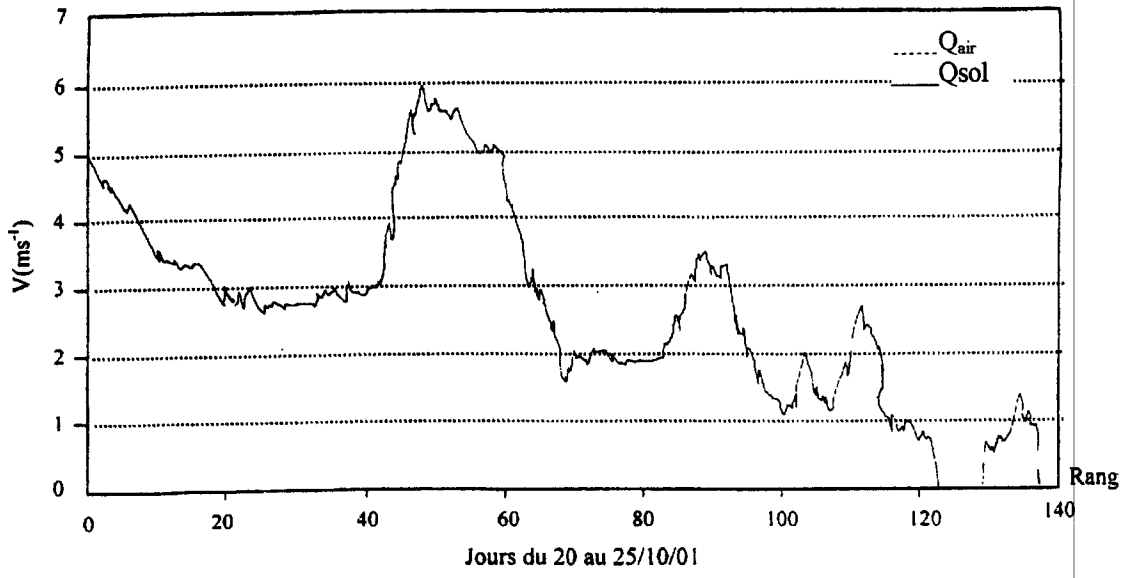
La température extérieure



Le rayonnement global extérieure



La vitesse du vent



Le chauffage

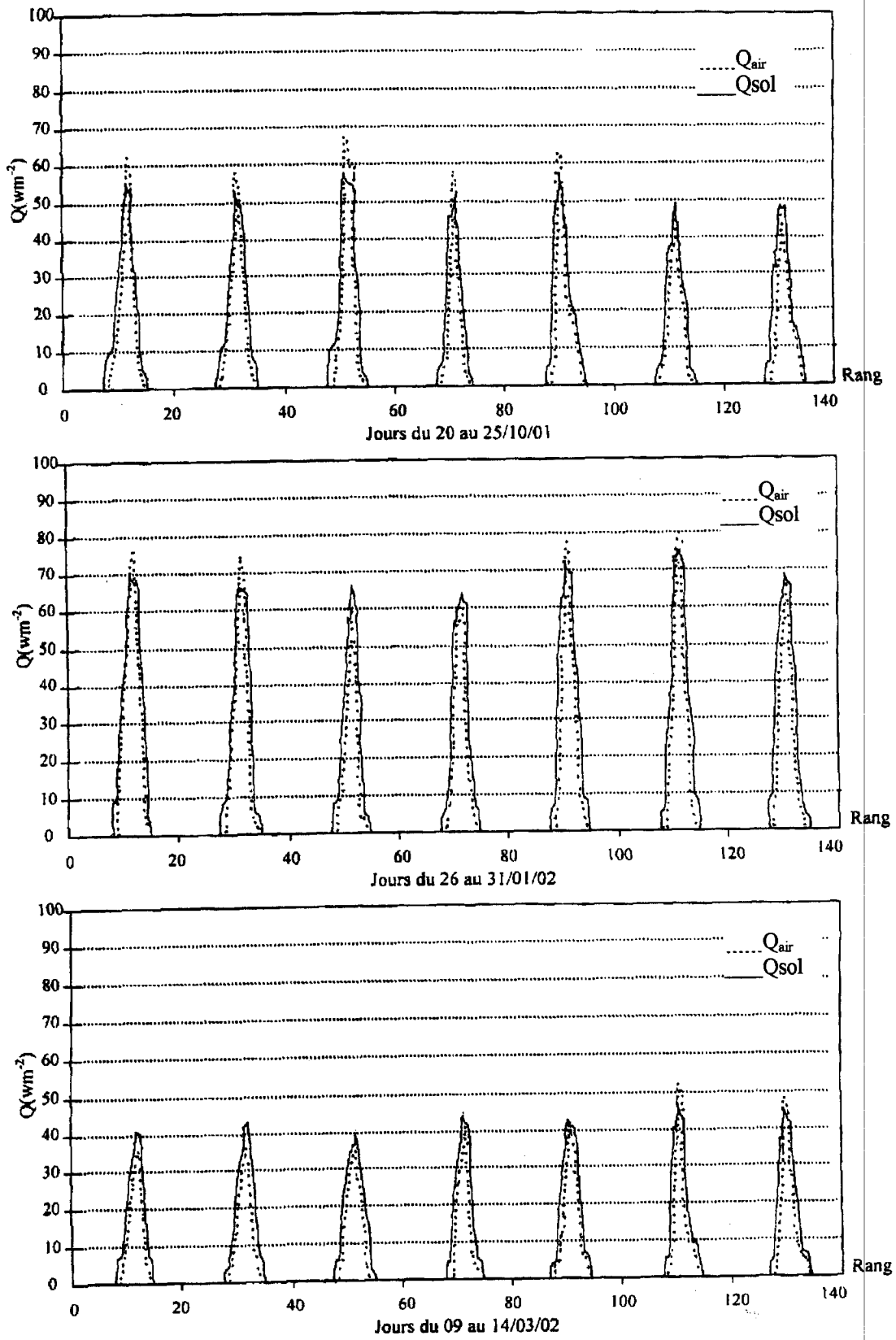


Figure. 24 : Evolution des différents paramètres climatiques en fonction du temps

Commentaire sur le tableau 4

On constate une légère amélioration des paramètres en comparaison avec ceux du tableau 3 :

- C_m varie de 127 à 295 $\text{KJm}^{-2}\text{K}^{-1}$, en sens décroissant des valeurs de la température de masse fixées a priori entre 14 et 22°C ;

- τ varie de 11,2 à 19,40, l'amélioration est significative en particulier, celle du mois d'octobre ;

- h varie de 6,7 à 19,2 $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Une amélioration sensible est enregistrée au mois d'octobre, alors que celle du mois de juin reste quand même relativement faible (6,7 $\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$) ;

- α varie de 0,34 à 0,46. Les valeurs de α , différent peu de celles du tableau 3, elles restent très cohérentes et conformes à ce que donne la littérature.

Les valeurs du critère de performance ϵ , s'améliorent progressivement du mois de mars ($\epsilon= 1,03^\circ\text{C}$), au mois de juin ($\epsilon= 0,77$). Cela est sans doute dû à l'importance croissante des flux radiatifs et de la ventilation dans le comportement thermo- énergétique de la serre. Ces flux que le modèle réduit simule correctement deviennent déterminants. L'amélioration de la précision du modèle de comportement thermique de la serre est marquée par l'amélioration du critère de performance au fur et à mesure que l'on avance vers la saison chaude.

Une troisième identification a été lancée en gardant les valeurs de T_{m0} de 14°C à 22°C, en négligeant les paramètres de fuite ($s_0=0$ et $d_0=0$) et le maintient de tous les paramètres restants. Les résultats sont cités sur le tableau 5.

Tableau 5 : Les valeurs identifiées sont pour les paramètres C_m , α , h , et τ durant les séquences d'une semaine allant du mois d'octobre au mois de juin. Les valeurs des paramètres fixés sont identiques à celles du tableau 4, sauf que $s_0=0$ et $d_0=0$.
 (*) paramètre fixe, les constantes de temps sont calculées pour un vent nul.

Séquences par mois	$T_{m0}(\text{°C})$	C_m ($\text{KJm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	α	h ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	τ (h)	critère ε (°C)
Octobre	14*	206 ± 177	$0,42 \pm 0,041$	$14,4 \pm 3,1$	15,2	1,10
Novembre	15*	170 ± 95	$0,39 \pm 0,032$	$13,5 \pm 2,8$	14,7	1,14
Décembre	16*	156 ± 83	$0,35 \pm 0,037$	$12,2 \pm 1,9$	14,5	1,12
Janvier	17*	135 ± 77	$0,34 \pm 0,028$	$11 \pm 2,7$	14,4	1,06
Février	18*	125 ± 71	$0,34 \pm 0,039$	$10,1 \pm 2,4$	13,9	1,11
Mars	19*	117 ± 65	$0,32 \pm 0,027$	$9,40 \pm 1,7$	13,3	1,09
Avril	20*	107 ± 52	$0,31 \pm 0,038$	$8,9 \pm 1,6$	12	0,99
Mai	21*	90 ± 49	$0,37 \pm 0,044$	$7,7 \pm 2,9$	10,7	0,97
Juin	22*	84 ± 37	$0,30 \pm 0,042$	$6,4 \pm 1,5$	8,9	0,89
Valeurs citées dans la littérature		80 à 300	0,3 à 0,4	10 à 20		

Commentaire sur le tableau 5

- les paramètres h (varie de 6,4 à 14,4) et la constante de temps τ (de 8,9 à 15,2) décroissent lorsque les fuites sont négligées ;

- C_m varie de 84 à 206 $\text{KJm}^{-2}\text{K}^{-1}$ et les valeurs de α diminuent sensiblement (de 0,3 à 0,42) ;

A première vue, l'ensemble des tests montre que la méthode d'identification est sensible aux choix des paramètres fixés à l'avance.

Le fait de fixer T_{m0} , améliore les valeurs des paramètres identifiables C_m, α, τ et h , aussi de négliger les pertes par fuite, soit ($s_0=0$ et $d_0=0$), les valeurs des paramètres sont alors différentes de celles, où les pertes par fuite sont prises en charge. Ce qui explique l'intérêt particulier et l'importance de l'amélioration autant que possible de l'étanchéité de la serre, dans le but de garantir une gestion rationnelle et efficace de tout ce potentiel thermique et énergétique.

L'ensemble de ces valeurs correspond bien à ce que l'on connaît ou que l'on peut estimer, par ailleurs pour les paramètres considérés.

En conclusion, ces tests d'identification et de sensibilité montrent que les résultats sont cohérents en ce qui concerne la sensibilité des paramètres identifiés, du moins pour la majorité des séquences choisies. De plus, les valeurs trouvées

restent dans des gammes de variations qui correspondent à une vraisemblance physique.

V.3.2- Etude de la sensibilité des paramètres identifiés

Dans cette partie expérimentale, nous allons savoir dans quelle mesure les valeurs des paramètres libres à identifier peuvent être affectées en fixant un ou plus de paramètres déjà identifiés. La séquence expérimentale a été choisie dans la période allant du 27 avril au 2 mai 2002.

Sensibilité à T_{m0}

Nous avons fait varier T_{m0} , par pas de 2°C entre 12 et 24°C , et identifier pour chacune de ces valeurs C_m , α , h et τ . Les paramètres K , $AL\sqrt{C}$, β , s_0 , d_0 sont fixés à une valeur connue. Les résultats sont présentés sur le tableau 6.

Tableau 6 : Sensibilité des paramètres identifiés C_m , α , h , et τ lorsqu'on fait varier la valeur de T_{m0} , paramètre imposé. Les valeurs choisies des autres paramètres sont $K=7,20 + 0,42 V$, $AL\sqrt{C}=0,2$, $\beta=0$, $s_0= 0,7 \text{ m}^2$, $d_0=0,6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, ϵ le critère de performance.

Valeurs fixées de $T_{m0} (^{\circ}\text{C})$	Valeurs des paramètres identifiés				
	C_m ($\text{KJm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	α	h ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	τ (h)	ϵ
12	371 ± 191	$0,41 \pm 0,03$	$20,2 \pm 3,1$	23,9	1,79
14	291 ± 154	$0,36 \pm 0,02$	$18,1 \pm 2,7$	19,70	1,65
16	254 ± 131	$0,34 \pm 0,02$	$15,5 \pm 2,1$	19,1	1,64
18	195 ± 101	$0,34 \pm 0,02$	$15,4 \pm 1,9$	17,9	1,34
20	165 ± 97	$0,37 \pm 0,01$	$13,7 \pm 1,5$	16,4	1,68
22	149 ± 74	$0,37 \pm 0,02$	$10,4 \pm 0,9$	13,5	1,68
24	117 ± 47	$0,32 \pm 0,02$	$9,2 \pm 1,1$	10,5	1,67
Valeurs citées dans la littérature	80 à 300	0,3 à 0,4	10 à 20		

On constate d'une manière générale que les paramètres identifiés sont cohérents et acceptables, il faut noter que seul la valeur de C_m pour $T_{m0}= 12^{\circ}\text{C}$ reste en dehors des valeurs théoriques recommandées, et celle de h pour $T_{m0}= 24^{\circ}\text{C}$ légèrement au-dessous de la norme, et qui reste quand même acceptable, quant au coefficient de performance ϵ varie également de très peu de 1,34 à 1,79.

Sensibilité au coefficient d'échange convectif entre l'air et la masse thermique :

Dans cette séquence d'identification, nous avons fixé T_{m0} à 20°C et fait varier le paramètre d'échange convectif h par pas de deux de 10 à $20 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Les paramètres identifiés sont alors C_m , α , et τ . Les autres valeurs des paramètres fixées sont les mêmes que dans le test précédent. Les résultats sont présentés sur le tableau 7.

Tableau 7: Sensibilité des paramètres identifiés C_m , α , et τ , lorsqu'on fait varier le paramètre h de 10 à $20 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ avec la valeur de T_{m0} fixée à 20°C . Le reste des paramètres fixés sont identiques au test précédent.

Valeurs fixées de h ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	Valeurs des paramètres identifiés			
	C_m ($\text{KJm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	α	τ (h)	ε
10	150 ± 87	$0,35 \pm 0,07$	9,1	1,65
12	125 ± 64	$0,34 \pm 0,02$	12,7	1,67
14	165 ± 72	$0,37 \pm 0,04$	15,4	1,70
16	177 ± 94	$0,36 \pm 0,04$	17,5	1,68
18	187 ± 99	$0,37 \pm 0,03$	19,2	1,68
20	194 ± 147	$0,36 \pm 0,05$	21,4	1,74
Valeurs citées dans la littérature	80 à 300	0,3 à 0,4		

Les valeurs des paramètres identifiés C_m , α , et τ , sont cohérents et acceptables. Elles deviennent plus sensibles à la variation des valeurs du paramètre h (valeurs imposées), et en particulier, à celles du paramètre C_m qui se rapprochent et se précisent par rapport aux valeurs de h . Le critère de performance varie de très peu et reste satisfaisant.

En conclusion, ces tests de sensibilité montrent des résultats cohérents en ce qui concerne la sensibilité des paramètres identifiés, du moins pour la séquence choisie. De plus, les valeurs trouvées restent dans une marge de variation qui correspondent néanmoins à une vraisemblance physique.

V.4- VALIDATION

Dans un objectif d'application au contrôle en temps réel du microclimat des serres, nous abordons dans ce paragraphe la question de validation et contrôle du modèle établi et étudié plus haut.

Le principe de validation consiste à prendre les valeurs des paramètres d'une séquence, déjà identifiés et de les introduire dans les autres séquences en tant que paramètres connus. Seul le paramètre T_{m0} reste libre et demande à être identifié.

La séquence du mois de février située en plein milieu des autres séquences paraît favorable au test de validation. Les paramètres de la séquence du mois de février vont être utilisés comme valeurs connues dans les autres séquences de l'année, excepté T_{m0} qui reste libre et à identifier.

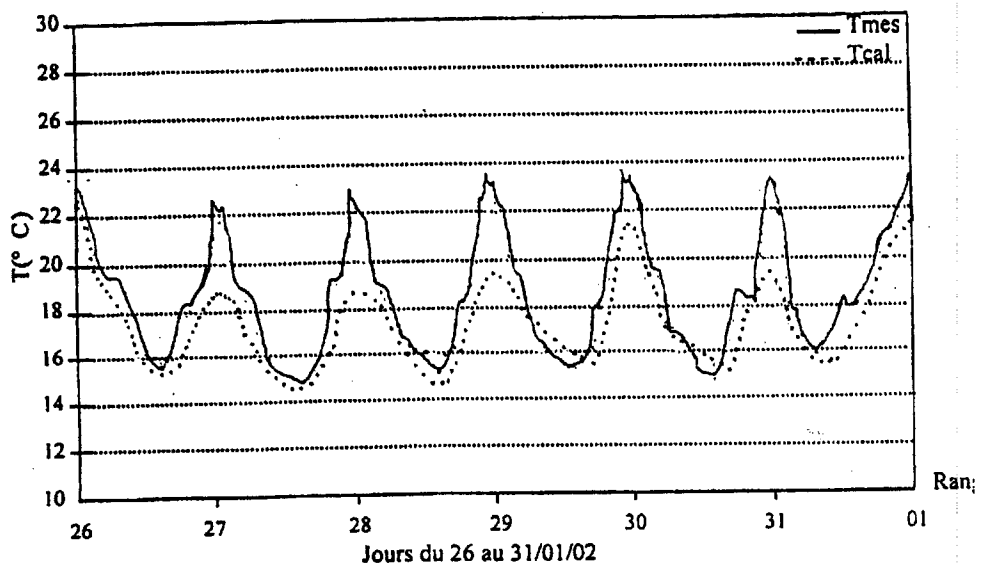
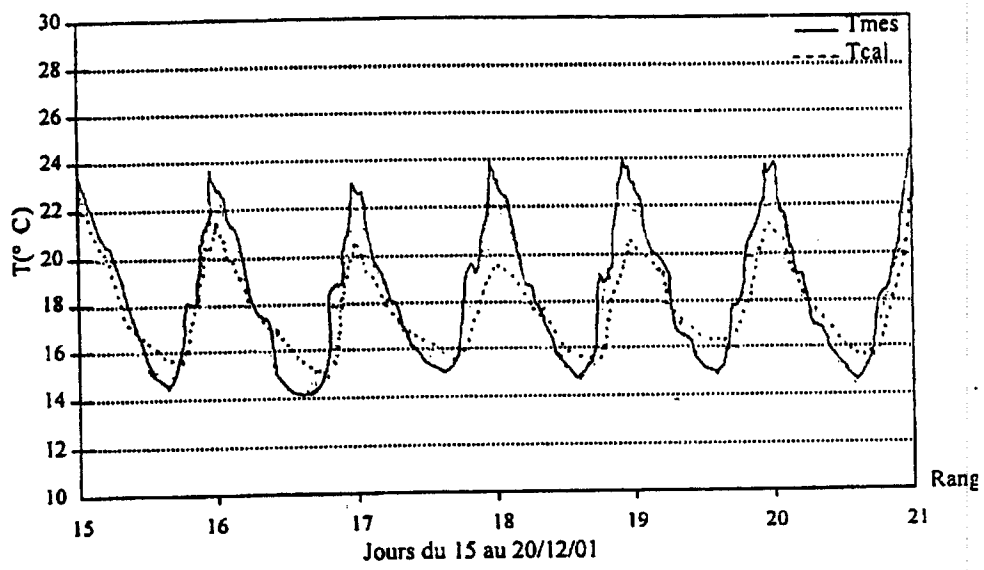
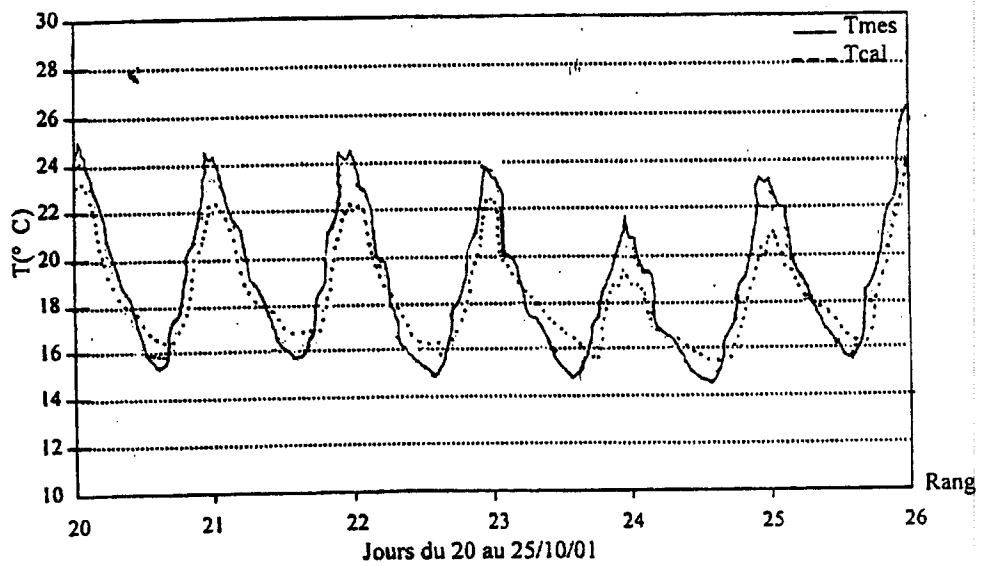
Pour la validation nous avons fixé : $C_m = 237 \text{ Kjm}^{-2}\text{K}^{-1}$; $\alpha = 0,39$; $h = 17,2 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$; $\tau = 19,31 \text{ h}$; $AL\sqrt{C} = 0,2$; $\beta = 0$; $s_0 = 0,7 \text{ m}^2$ et $d_0 = 0,6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Il reste à identifier T_{m0} pour toutes les séquences restantes. Les valeurs de T_{m0} obtenues pour les autres séquences sont présentées sur le tableau 8.

Tableau 8 : Valeurs identifiées du paramètre T_{m0} pour le reste des séquences du mois d'octobre au mois de juin, en fixant les valeurs des paramètres identifiés de la séquence test de février. ε est le critère de performance.

Séquence	T_{m0} (°C)	ε (°C)	Corrélations ente T_{cal} et T_{mes}
Séquence test Février	$16,1 \pm 1,1$	1,14	$T_{cal} = 0,91 T_{mes} + 1,71$ $R^2 = 0,92$
Séquences validées			
Octobre	$17,7 \pm 2,57$	1,89	$T_{cal} = 0,90 T_{mes} + 1,87$ $R^2 = 0,77$
Novembre	$19,5 \pm 1,54$	1,54	$T_{cal} = 0,92 T_{mes} + 1,63$ $R^2 = 0,79$
Décembre	$17,5 \pm 2,1$	1,27	$T_{cal} = 0,9 T_{mes} + 1,98$ $R^2 = 0,84$
Janvier	$17,9 \pm 2,8$	1,31	$T_{cal} = 0,9 T_{mes} + 1,83$ $R^2 = 0,85$
Mars	$19,1 \pm 1,9$	1,11	$T_{cal} = 0,87 T_{mes} + 2,5$ $R^2 = 0,86$
Avril	$17,5 \pm 2,1$	1,02	$T_{cal} = 0,86 T_{mes} + 2,91$ $R^2 = 0,90$
Mai	$18,1 \pm 2,4$	0,99	$T_{cal} = 0,87 T_{mes} + 3,1$ $R^2 = 0,91$
Juin	$20,9 \pm 1,9$	0,77	$T_{cal} = 0,87 T_{mes} + 3,7$ $R^2 = 0,91$

La température de la serre



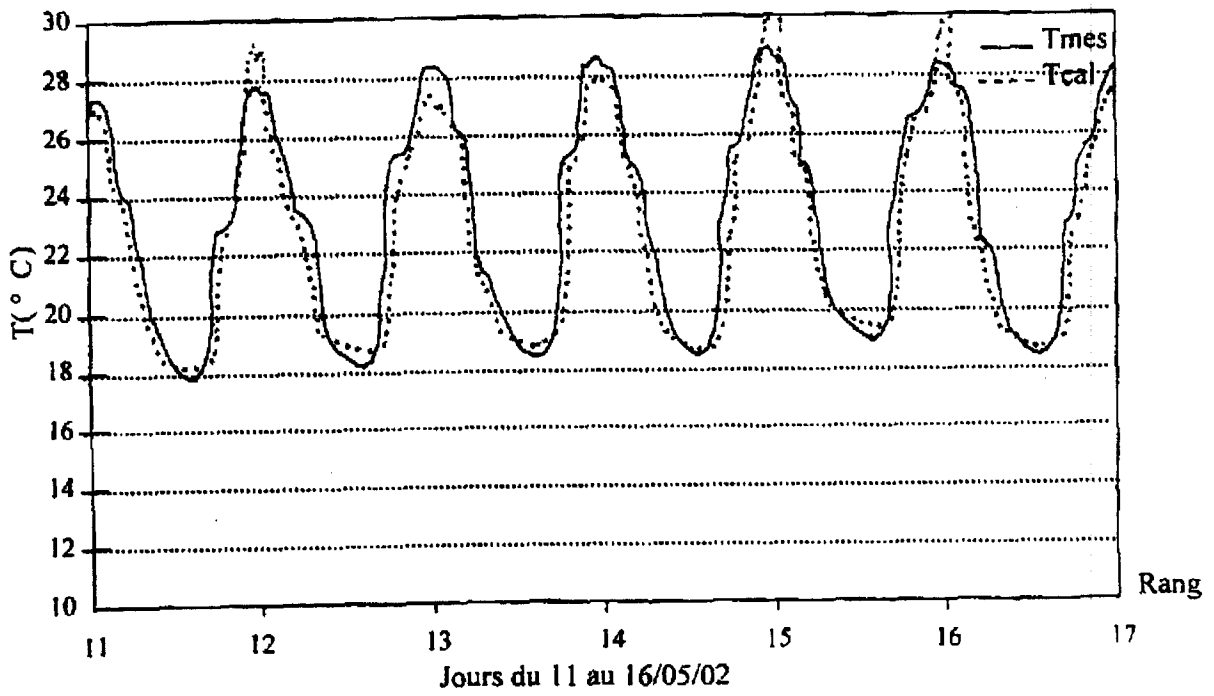
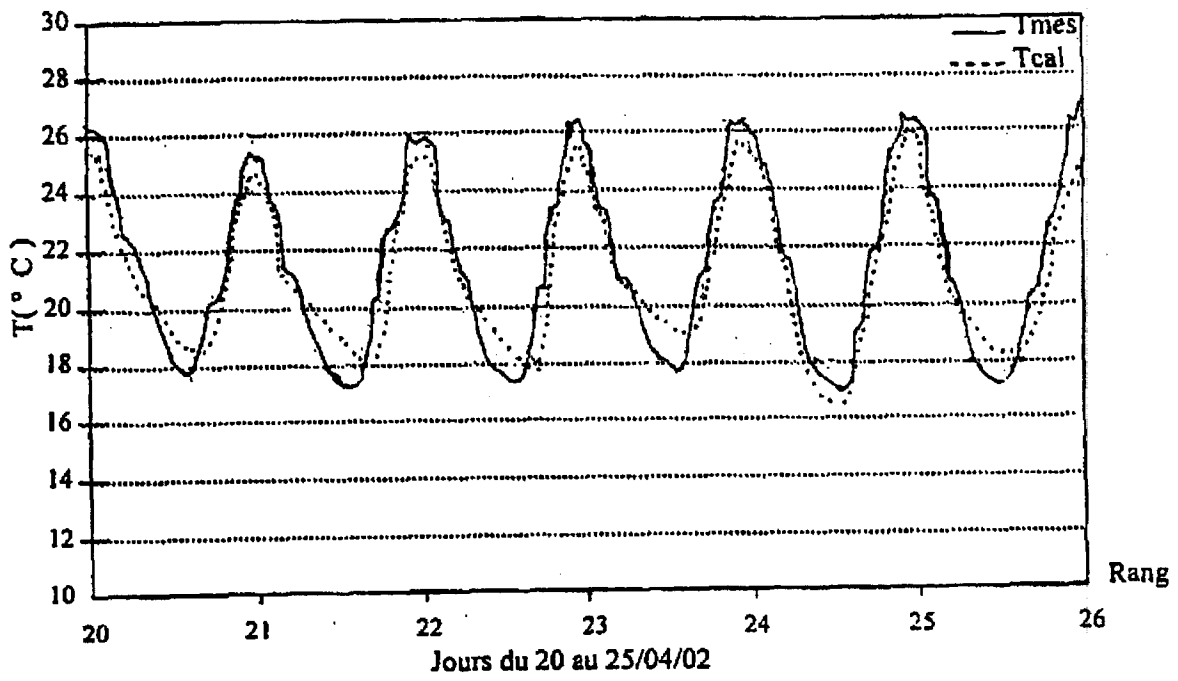


Figure. 25 : Valeurs de la température d'air de la serre T_{mes} et calculée T_{cal} à l'aide des paramètres obtenus par identification sur une séquence de testes (mois de février), sauf le paramètre T_{m_0} étant libre

Le tableau 8 montre que l'ensemble des valeurs obtenues pour T_{m0} est plausible. Le critère de performance est dans une marge acceptable (0,77 à 1,89). La corrélation entre T_{cal} et T_{mes} liée par une relation linéaire dont la pente varie de 0,86 à 0,91 est matérialisée par des écarts de confiance admissibles. Le coefficient de détermination R^2 est élevé pour toutes les séquences et varie de (0,79 à 0,91).

Nous avons répété le même processus en laissant libre C_m et T_{m0} pour les séquences à valider. Le tableau 9 présente les résultats de ce test.

Tableau 9 : Valeurs identifiées des paramètres T_{m0} et C_m pour différentes séquences du mois d'octobre au mois de juin, en fixant les valeurs des paramètres restant, déjà identifiées dans la séquence test du mois de février. ϵ est le critère de performance.

Séquence	T_{m0} (°C)	C_m ($KJm^{-2}K^{-1}$)	ϵ (°C)	Corrélations ente T_{cal} et T_{mes}
Séquence test Février	$16,1 \pm 1,1$	237 ± 211	1,14	$T_{cal} = 0,92 T_{mes} + 1,52$ $R^2 = 0,94$
Séquences à valider				
Octobre	$15,1 \pm 2,4$	249 ± 184	1,27	$T_{cal} = 0,85 T_{mes} + 3$ $R^2 = 0,92$
Novembre	$16,2 \pm 1,35$	237 ± 171	1,19	$T_{cal} = 0,86 T_{mes} + 2,84$ $R^2 = 0,90$
Décembre	$14,5 \pm 1,9$	224 ± 201	1,14	$T_{cal} = 0,86 T_{mes} + 2,52$ $R^2 = 0,86$
Janvier	$15,2 \pm 1,4$	247 ± 177	1,17	$T_{cal} = 0,85 T_{mes} + 2,75$ $R^2 = 0,88$
Mars	$18,1 \pm 1,7$	199 ± 145	1,05	$T_{cal} = 0,90 T_{mes} + 1,93$ $R^2 = 0,92$
Avril	$19,3 \pm 2,5$	177 ± 141	1,01	$T_{cal} = 0,96 T_{mes} + 1,12$ $R^2 = 0,94$
Mai	$21,1 \pm 2,9$	142 ± 103	0,79	$T_{cal} = 0,97 T_{mes} + 0,78$ $R^2 = 0,96$
Juin	$23,2 \pm 2,1$	117 ± 85	0,75	$T_{cal} = 0,98 T_{mes} + 0,57$ $R^2 = 0,97$

Le tableau 9 montre que l'ensemble des valeurs obtenues pour T_{m0} , et C_m sont plausibles et restent dans la marge des valeurs citées en référence par la littérature scientifique. Le critère de performance ϵ varie de 0,75°C à 1,27°C, et se précise d'avantage. T_{mes} et T_{cal} sont liées par la relation linéaire, dont la pente varie

de 0,85 à 0,98. Le coefficient de détermination R^2 est significatif pour toutes les séquences et varie de 0,86 à 0,97.

Le critère de performance ε est nettement meilleur par rapport à celui du test précédent (tableau 8), car le modèle est à deux variables au lieu d'une seule variable considérée dans le cas précédent, et où la position des minimums change et se précise. Le nombre de degré de liberté influe considérablement dans l'identification et la validation des paramètres.

Conclusion des tests de validation :

Les deux tests utilisés pour la validation des résultats montrent que les paramètres obtenus pour une séquence test, s'adaptent aux séquences ultérieures, et permettent d'obtenir de bons critères de performance.

Il faut noter aussi, qu'il arrive parfois d'obtenir des résultats d'identification de paramètres, dont les valeurs sont en dehors de l'intervalle de tolérance cité par la littérature scientifique et technique.

CHAPITRE VI

APPORT ENERGETIQUE

VI.1- APPORT ENERGETIQUE D'UNE SERRE

Dans tous les secteurs de production, le besoin en énergie est capital, absolument indispensable et vital pour le fonctionnement, le développement et la prospérité économique. Le développement sans cesse des serres et leurs multiplications pour des raisons économiques et stratégiques fait parti de ce secteur, que j'appelle une vraie industrie agricole. Tout projet économique est conventionné d'une étude technico-économique qui tient compte de toutes les phases de réalisation et permet de valoriser l'intérêt d'un tel investissement. Pour pallier ce manque relatif à la quantification prévisionnelle de l'apport énergétique de complément des serres, il nous est apparu nécessaire d'entamer une étude dans ce domaine, qui a fait l'objet de travaux de recherche et de communication. La plante est sensible à la lumière, au gaz carbonique, à l'eau et à la température. Elle fait apparaître autant de facteurs à lier et à maîtriser pour assurer une production rentable des cultures sous serre.

L'estimation de l'apport énergétique de complément est nécessaire au bon fonctionnement de la serre. Celle-ci, revient à déterminer la puissance à fournir pour déplacer la température intérieure sous serre dans les conditions normales à une température de consigne désirée. Cette dernière constitue le facteur privilégié d'action sur la croissance et le développement optimal de la plante.

La serre tout en étant le moyen permettant de modifier le microclimat ambiant des cultures, elle reste étroitement liée aux facteurs du climat environnant.

Cette étude permet de mettre en évidence les paramètres qui contribuent à la modification du microclimat et d'en apprécier le poids. La notion de rentabilité de l'agriculture est étroitement liée aux facteurs climatologiques, au développement et à la modélisation des serres.

VI.2- HYPOTHESES

Les températures respectives de la paroi (T_p), du sol intérieur (T_{si}) et du sol extérieur (T_{se}) sont supposées uniformes. L'uniformité de la température de la paroi est particulièrement vérifiée la nuit. L'uniformité de la température du sol intérieur de la serre (T_{si}) de dimensions peu importantes est manifestement fautive. Dans ce cas, il est judicieux de prendre la moyenne pondérée des températures.

L'uniformité de la température de l'ambiance intérieure à la serre (T_i) est conditionnée par une turbulence suffisante de l'air. L'atmosphère externe est dotée d'une température (T_e) qui diffère peu à des niveaux compatibles avec les hauteurs de la serre. La voûte céleste, en tant que source et absorbante de radiations, est équivalente à un plan noir indéfini de température absolue (T_c), calculée ou déterminée à l'aide de dispositifs appropriés. La paroi, le sol extérieur et le sol intérieur sont considérés comme corps gris dont les émissivités respectives sont : ε_p , ε_e et ε_i .

La paroi en film de plastique (PE) est d'une inertie thermique négligeable au regard des vitesses de variation de températures atteintes par le milieu environnant. Ainsi à chaque instant le principe de conservation de l'énergie peut lui être appliqué.

VI.3- ECHANGES THERMIQUES AU NIVEAU DE LA PAROI DE NUIT

La somme des puissances échangées par conduction-convection (Q) et celles échangées par rayonnements (P) au niveau de la paroi de la serre est nulle (principe de la conservation de l'énergie).

$$\sum Q + \sum P = 0 \quad (22)$$

VI.3.1- Expression de la puissance d'échanges par rayonnements IR de nuit au niveau de la paroi

$$P_p = \sigma \left[\left(\frac{Y+1}{Y} \right) T_p^4 - \left(\frac{Y+1}{2Y} \right) \tau' T_c^4 - \left(\frac{Y-1}{2Y} \right) \tau' T_e^4 - \frac{1}{Y} T_i^4 \right] S_p \quad (23)$$

Les Quantités F_{ip} , F_{cp} , et F_{ep} désignent les facteurs d'angles respectifs et sont tel que :

$$F_{ip} \cdot S_p = F_{pi} S_i = S_i \quad \text{et} \quad F_{ip} = 1/Y$$

$$F_{cp} = (Y+1)/2Y$$

$$F_{ep} = (Y-1)/2Y$$

Sachant que les émissivités : ε_p , ε_e et ε_i sont proche de l'unité, nous pouvons alléger les calculs en supposant que $\varepsilon_p = \varepsilon_i = \varepsilon_e = 1$.

Modification des puissances d'échanges par rayonnements IR de nuit au niveau de la paroi

- a- Si la paroi est totalement transparente au rayonnement infrarouge, soit $\tau' = 1$, dans ce cas, l'équation (23) exprime la puissance d'échanges au niveau de la paroi de la serre, qui se traduit par un échange intense entre la paroi et le sol intérieur, la paroi et la voûte céleste et la paroi avec le sol extérieur. Cet état de fait conduit, quand les conditions atmosphériques environnant sont défavorables (particulièrement quand le ciel est claire et à des variations de température basses) à la situation de gel (inversion de la température intérieure).
- b- Si la paroi est totalement opaque au rayonnement infrarouge, soit $\tau' = 0$, l'équation (23) est réduite aux échanges par rayonnement IR entre la paroi et le sol intérieur de la serre. Dans ce cas l'effet de serre est maximum.

VI.3.2- Expression de l'équation d'échanges par conduction- convection au niveau de la paroi

Paroi / ambiance interne

$$Q_{P/ai} = h_{ai} S_p (T_p - T_i)$$

Paroi / ambiance extérieure

$$Q_{P/ae} = h_{ae} S_p (T_p - T_e)$$

L'équation d'échanges par conduction-convection au niveau de la paroi, aura pour expression :

$$Q_{cc} = S_p [T_p (h_{ai} + h_{ae}) - h_{ai} T_i - h_{ae} T_e] \quad (24)$$

VI.3.3- Le bilan thermique de nuit au niveau de la paroi aura pour expression

$$\sigma \left(\frac{Y+1}{Y} \right) T_p^4 + (h_{ai} + h_{ae}) T_p = h_{ai} T_i + h_{ae} T_e + \sigma \left[\left(\frac{Y+1}{2Y} \right) \tau' T_c^4 + \left(\frac{Y-1}{2Y} \right) \tau' T_e^4 + \frac{1}{Y} T_i^4 \right] \quad (25)$$

VI.4- ECHANGES THERMIQUES AU NIVEAU DE LA PAROI DE JOUR

La voûte céleste est supposée assimilable à une double source de radiation dans les domaines de l'infrarouge précédemment présenté et du visible dont l'émission obéit à la loi de Lambert.

La paroi p absorbe dans le visible

$$P'_p = k_p R_g \left[1 + r_e + (1 - k_p) \left(\frac{Y - 1 + r_i}{Y} \right) \right] S_p \quad (26)$$

Où : k_p : coefficient d'absorption de la paroi

L'équation générale d'équilibre sur la paroi devient :

$$\sigma \left(\frac{Y+1}{Y} \right) T_p^4 + (h_{ai} + h_{ae}) T_p = h_{ai} T_i + h_{ae} T_e + \sigma \left[\left(\frac{Y+1}{2Y} \right) \tau' T_c^4 + \left(\frac{Y-1}{2Y} \right) \tau' T_e^4 + \frac{1}{Y} T_i^4 \right] - k_p R_g \left[1 + r_e + (1 - k_p) \left(\frac{Y - 1 + r_i}{Y} \right) \right] \quad (27)$$

VI.5- METHODE D'ESTIMATION DES BESOINS ENERGETIQUE DE LA SERRE

Il est recommandé d'estimer les besoins de chauffage d'une serre à l'échelle régionale et sur une base de temps adéquate. Ces estimations permettent de mieux gérer les calendriers culturaux et d'orienter les besoins énergétiques, le terme d'évapotranspiration ou de condensation, ainsi que le terme d'échanges de chaleur avec le sol ont été négligés. Ce qui est particulièrement concevable la nuit [11].

Le chauffage est jugé indispensable généralement pendant la nuit où la température moyenne de l'air intérieur est inférieure à la température de consigne.

Le bilan de chauffage mensuel de la serre a pour expression :

$$E_{ch} = d_n d_m (Q_{rs} + Q_{ccs} + Q_{fs}) 10^{-3} \quad (KWh/mois/m^2.sol) \quad (28)$$

VI.5.1- Estimation du refroidissement nocturne par rayonnement infrarouge

Considérons l'équation (23) qui exprime la puissance d'échange par rayonnement IR par ciel clair. Il convient d'estimer la proportion d'heures de nuit à ciel clair à partir de la fraction d'insolation appréciée de jour.

$$f = \frac{\text{nombre d'heures d'inolation}}{\text{durée du jour}}$$

Il est admis que la température de la paroi (T_p) soit assez voisine de la température de l'air extérieur (T_e) et que : $(T_e - T_c) = (T_p - T_c) = 7 K$ par ciel couvert.

Les déperditions nocturnes par rayonnement IR de la serre, ont pour expression :

$$Q_{rs} = 4,7544 \cdot 10^{-8} \frac{S_p}{S_i} \left[2T_p^4 - \tau'(1-f)(T_p - T_e)^4 - \tau' f T_c^4 - 0,19\tau' T_e^4 - 0,81T_i^4 \right] \quad (29)$$

[Wm⁻²s]

VI.5.2- Estimation des déperditions par convection-conduction au niveau de la paroi de la serre (Q_{ccs})

Les déperditions par convection-conduction ont pour expression :

$$Q_{ccs} = \frac{S_p}{S_i} K(v)(T_i - T_e) \quad [Wm^{-2}s] \quad (30)$$

Où K(v) est le coefficient global d'échanges, lié à la vitesse du vent.

$$\frac{1}{K(v)} = \frac{1}{h_{ai}} + \frac{1}{h_{ae}} \quad [Wm^{-2}s]$$

L'INRA de MONTFAUET propose les expressions suivantes pour les coefficients de transfert de chaleur par convection.

$$h_{ai} = 4,28 (T_i - T_p)^{0,25} \quad [Wm^{-2}s]$$

$$h_{ae} = \sqrt{1,53 (T_p - T_e)^{0,5} + 9,38} \quad v_{1,6} \quad [Wm^{-2}s]$$

Remarque

Les services de la météorologie nationale mesurent la vitesse du vent (v₁₀) à 10 m de hauteur. Il est possible d'estimer la vitesse du vent à la hauteur des serres en utilisant les expressions suivantes.

$$v_{2m} = 0,77 v_{10} \quad \text{et} \quad v_{3,5} = 0,85 v_{10}$$

VI.5.3- Estimation des déperditions par fuite (Q_{fs})

$$Q_{fs} = R(v) \frac{V}{S_i} R_0 (H_{int} - H_{ext}) \quad [Wm^{-2}s] \quad (31)$$

Avec $R(v)$ le taux de renouvellement d'air estimé à l'aide des valeurs de Gac par :

$$R(v) = 0,6 + (0,022v + 0,008)v \quad [h^{-1}]$$

VI.6- RESULTATS

L'effet de serre dû à l'apport solaire est largement suffisant le jour et ne nécessite pas de chauffage. Le refroidissement est essentiellement nocturne et exige en général le chauffage d'appoint. L'échantillon d'enregistrement que nous présentons dans la figure ci-après, représente la température intérieure (T) de la serre et la courbe d'humidité relative qui sont accompagnées en bas de la figure (26) par l'apport énergétique réel consommé pour le chauffage de la serre pendant la période allant du 15 au 20 Décembre 2001. L'apport énergétique de complément estimé par notre méthode est représenté sur la figure en pointillé. Il accuse une surestimation d'environ de 17%. Cette erreur relative est tout à fait acceptable quand il s'agit d'une estimation prévisionnelle d'énergie.

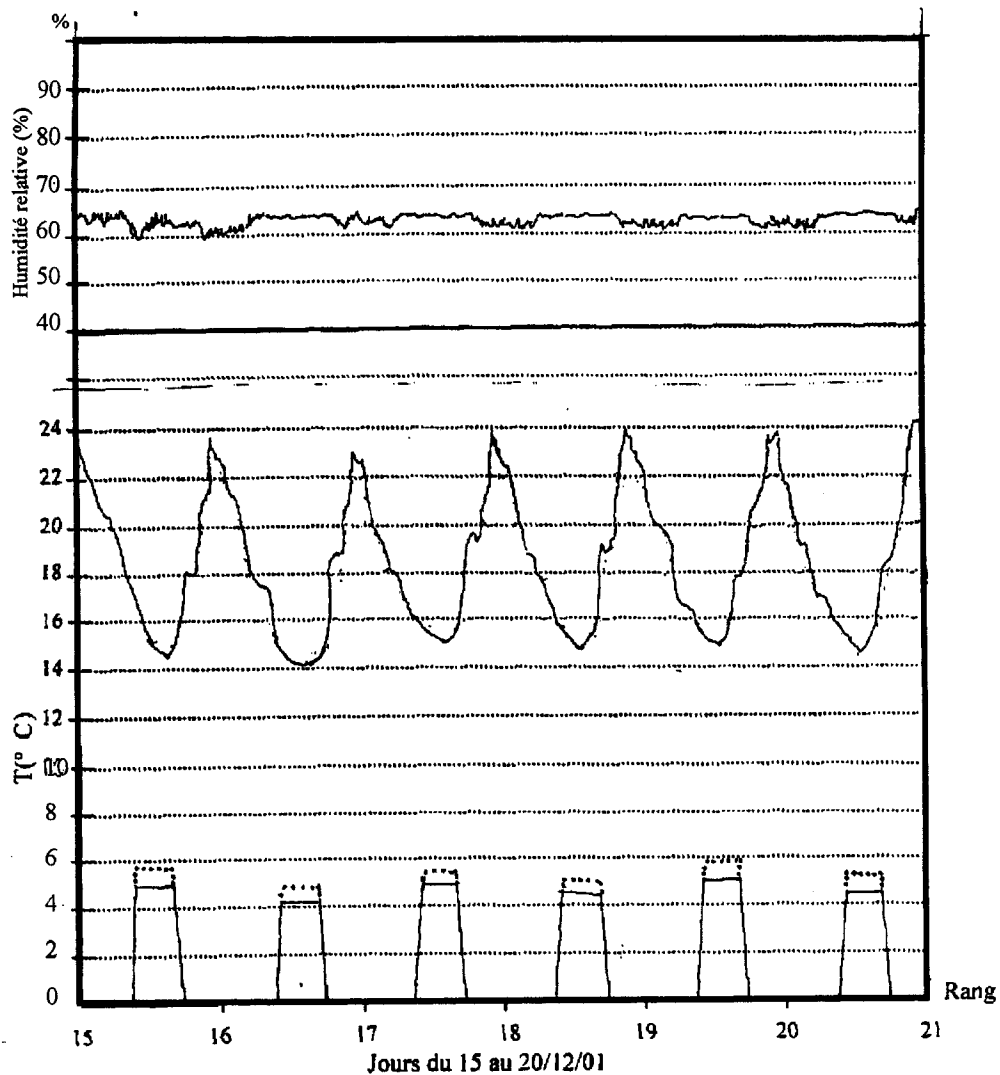


Figure. 26 : Apport énergétique de complément pour le chauffage de la serre du 15 au 20 décembre 2001

- Apport énergétique réel et consommé
- Apport énergétique calculé (méthode d'estimation)

La figure (27) qui suit présente deux courbes : la première présente l'énergie fournie pour le chauffage de la serre par mois et par mètre carré de sol entre octobre 2001 et mai 2002 ; la deuxième courbe formule les besoins énergétiques mensuels par mètre carré de sol de serre, calculés pour la même saison.

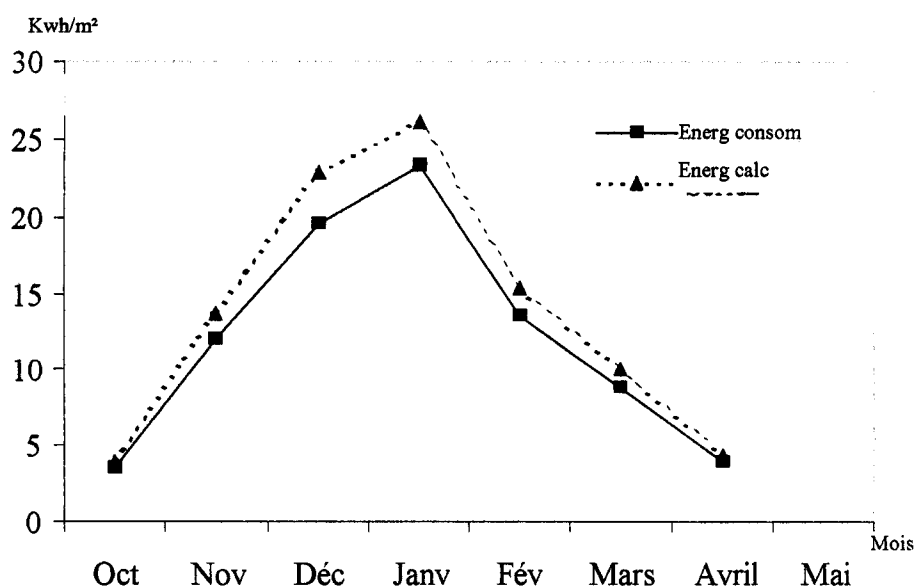


Figure. 27 : Courbes de l'apport énergétique par m² de sol consommé et calculé

Le tableau 10 présente un état chiffré de l'apport énergétique consommé et calculé, pour le chauffage de la serre entre octobre 2001 et mai 2002.

Tableau. 10: Etat chiffré de l'énergie de chauffage consommée et calculée.

Mois	Energie consommée chauffage	Energie calculée chauffage	Ecarte entre Energie cons et énergie calculée	Erreur d'estimation
	Kwh.m ⁻² .sol	Kwh.m ⁻² .sol		
Octobre 2001	3,5	3,92	0,42	12
Novembre 2001	12	13,68	1,68	14
Décembre 2001	19,53	22,85	3,32	16,99
Janvier 2002	23,25	26,04	2,79	12
Février 2002	13,5	15,39	1,89	14
Mars 2002	8,8	9,994	1,194	13,56
Avril 2002	3,85	4,389	0,539	14
Mai 2002	Pas de chauffage	Pas de chauffage		
TOTAUX	84,43	96,263	11,833	14

VI.7- RECOMMANDATIONS POUR L'ECONOMIE D'ENERGIE PAR REDUCTION DE PERTE DE CHALEUR

VI.7.1- Echanges par conduction-convection

Les échanges à partir de la surface de la paroi de la serre avec les atmosphères internes et externes peuvent être limités de façon significative.

A-En protégeant la serre des vents dominants, soit en choisissant un site naturellement abrité, soit en installant des brise-vent. Ces derniers peuvent être constitués de lignes d'arbres (solution économique et écologique), de murs en dure ou en plastique rigide. Ils sont efficaces à une distance égale en moyenne à 15 fois la hauteur de la serre (zone protégée). Ils doivent être aussi perméables, sinon des tourbillons défavorables se forment dans la zone à protéger. La porosité optimale est estimée à environ 50%. Les serres doivent être installées de sorte que leur grand axe soit parallèle aux brise-vent.

L'économie d'énergie qui pourra être réalisée dépend bien entendu de la vitesse du vent et du niveau du chauffage requis. Une réduction du vent de 1m/s représente un gain énergétique de 5 à 10%.

Tableau. 11: Economie de chauffage correspondant à une réduction de la vitesse du vent de 1m/s.

Ecart de T° entre l'intérieur et l'extérieur de la serre (°C)	Vitesse du vent (m/s)		
	2,5	5	10
5	7,2%	6,1%	4,7%
10	8,9%	7,3%	5,4%
15	9,4%	7,7%	5,6%

B- Par doublage des parois, qui en plus de son action sur les phénomènes convectifs pures, influe sur les échanges par conduction et par rayonnement.

VI.7.2- Echanges radiatifs

L'effet de serre dû à l'apport solaire est suffisant le jour. Il assure dans la serre les conditions prés requises à la production végétale. Le refroidissement est essentiellement nocturne dû aux pertes par rayonnement infrarouge émis par le sol et le couvert végétal. Pour diminuer ces pertes radiatives, il suffit de placer un écran réflecteur des I.R, orienté vers la culture. La face réfléchissante peut être constituée par un film d'aluminium non anodisé dont l'émissivité doit être de l'ordre de 0,05. Il est à noter que l'écran réflecteur ne doit pas être assimilé à une double paroi. En général, il n'intéresse pas les piédroits ni les pignons, il n'est mis que la nuit.

Il faut ajouter que les pertes radiatives peuvent être réduites dès la conception de la serre par un choix judicieux du matériau de la couverture de la serre.

VI.7.3- Echanges par renouvellement d'air (fuites)

L'état d'étanchéité d'une structure est d'un intérêt capital. Cependant il n'est pas toujours facile dans les serres de réaliser une étanchéité suffisante. La réduction des pertes par fuite est obtenue par :

L'entretien du revêtement et des joints.

L'application au niveau des jonctions des éléments constituant la structure de la serre, des mastics et des joints de bonne qualité (de forte adhérence).

L'étanchéité d'une serre est caractérisée par deux types d'isolation, la première est fixe, la deuxième est mobile.

L'utilisation d'un sas joue un double rôle, d'une part, c'est un espace tampon non chauffé qui sépare l'intérieur de la serre de l'ambiance extérieure, d'autre part, il limite les pertes par ventilation non contrôlée.

La meilleure isolation est celle qui est efficace thermiquement, de longue durée de vie sans perdre ses propriétés initiales dans le temps, se pose sans complication et de bon marché.

Comme on s'en doute qu'il existe un matériau universel possédant toutes ces qualités en même temps, on met l'accent sur les deux premiers critères qui sont l'efficacité et durée de vie.

En ce qui concerne l'isolation mobile, il est essentiel de fermer la serre pendant la nuit pour conserver jalousement sa chaleur. Les dispositifs utilisés sont des rideaux en fer qui peuvent être manœuvrés par une manivelle (pose problème d'encombrement), de grands panneaux d'isolants rigides posés avec une fixation magnétique (à stocker séparément et à manipuler deux fois par jour), des rideaux retenus par glissières étanches et en fin de grands rideaux souples guidés par câble largement utilisés aux états unis.

VI.7.4- Effets de chauffage par augmentation de gain de chaleur

Pratiquement le seul apport énergétique naturel gratuit est celui du soleil. Pour qu'il soit utilisé au mieux, il convient :

- d'adopter des revêtements à caractéristiques optiques appropriées.
- de favoriser l'effet de serre.
- de stocker la chaleur des périodes excédentaires et la transférer aux périodes où elle est déficitaire.

CHAPITRE VII

DISCUSSION GENERALE

Notre objectif de départ était l'établissement d'un modèle réduit d'une serre cultivée. Nous avons été conduit à manier différentes catégories de modèles, notamment les modèles mathématiques et physiques d'estimation des besoins énergétiques pour différents types de serres. Ces étapes successives nous ont amenés aux modèles correspondants aux différents stades de l'évolution de ce travail. Elles sont rappelées ci-dessous :

❖ *Le modèle thermo- énergétique de la serre* qui fait appel à un modèle de connaissance des phénomènes physiques et biologiques qui interviennent dans le système que nous voulons présenter,

❖ *Le modèle de comportement de la serre*, déduit de la mesure et dont l'ambition se borne à la prévision de la température intérieure de la serre en fonction des perturbations et de l'état des commandes du système et cela sans prétendre apporter d'explications aux phénomènes mis en jeu,

❖ *Le modèle réduit* qui est une représentation mathématique conciliant certaines exigences du modèle de connaissance à travers l'étape intermédiaire de la réduction (que nous avons poursuivi empiriquement) et les exigences du modèle de comportement à travers l'étape de l'identification.

Le modèle que nous avons établi et validé appartient à cette dernière catégorie de modèle réduit ou de représentation mathématique, qui intègre certaines caractéristiques des modèles de connaissance et de comportement, avec leurs qualités et défauts respectifs.

A l'issue de notre étude, la question qui se pose est donc la suivante : peut-on représenter le modèle de connaissance de la serre par un modèle réduit et son corollaire ? ; le modèle réduit décrit-il convenablement le comportement de la serre ?

1- Peut-on représenter le modèle de connaissance de la serre par un modèle réduit ?

La réduction est une étape théorique qui consiste à considérer tous les phénomènes biophysiques en interaction, puis à les transcrire sous une forme réduite (dans notre cas, d'une manière empirique par étude des temps

caractéristiques des différents composants de la serre) en ne considérant que les processus biologiques et physiques prépondérants et mettant en œuvre un nombre limité de paramètres. Nous avons été ainsi conduits à représenter la serre par un modèle réduit liant les sorties aux entrées par l'intermédiaire de paramètres caractéristiques du système. Ceux-ci sont sur le tableau 8.

Le bilan thermo- énergétique dénombre dix paramètres en comptant T_{m0} ; T_{m0} , C_m , h , α , τ , $k = a + bV$, β , $AL\sqrt{C}$, s_0 , et d_0 .

Nous cherchons alors à identifier dix paramètres, soit du point de vue de l'algorithme un espace vectoriel R^{10} tout entier. On est alors conduit à s'égarer plus fréquemment dans des minimums locaux. Pour éviter ce genre de problèmes, nous sommes amenés à fixer certains paramètres, ce qui permet de diminuer d'autant plus le nombre de degré de liberté du système. Nous avons, ainsi fixé 6 paramètres dont la valeur a été obtenue soit par estimation, soit par la mesure, soit déduite du calcul :

- ✓ La température initiale T_{m0} ,
- ✓ Le coefficient de captation solaire au niveau du sol β ,
- ✓ Le coefficient de déperdition globale $K = a + bV$,
- ✓ Les coefficients de transfert de masse $AL\sqrt{C}$, s_0 , et d_0 .

On se retrouve alors à devoir identifier trois paramètres, dont deux : C_m la capacité thermique équivalente de la masse thermique et h le coefficient d'échange thermique par convection entre l'air et la masse thermique qui caractérisent l'inertie du système. Le troisième est le coefficient de captation solaire au niveau de l'air et de la végétation (α) qui traduit les phénomènes de captation solaire. Ces paramètres sont difficiles à mesurer notamment ceux qui sont liés à l'inertie, ils sont virtuels et n'ont pas de valeur physique estimable par ailleurs.

Les valeurs trouvées sont donc directement liées aux conditions de l'identification et aux séquences expérimentales utilisées. La représentation du modèle thermo-énergétique de la serre par un modèle réduit, est donc clairement subordonnée à la pratique expérimentale et à celle de l'identification.

Tableau 12 : Modèle thermo-énergétique avec le nombre total de paramètres, dont certains pouvant être fixés a priori et le reste à identifier.

Modèle	Nombre total de paramètres à identifier	Paramètres pouvant être fixés a priori	Paramètres absolument nécessaires à identifier
Bilan thermo-énergétique	$T_{m0}, C_m, h, \alpha, k=a+bV, \beta, \tau, AL\sqrt{C}, s_0, \text{ et } d_0$	$k=a+bV, \beta, AL\sqrt{C}, s_0, \text{ et } d_0$	$C_m, h, \alpha,$

2- Le modèle décrit-il convenablement le comportement thermo-énergétique de la serre ?

D'après les résultats (tableaux 3, 4 et 5) obtenus dans le chapitre V et selon que nous fixons ou que nous laissons libre la température initiale (T_{m0} , tableau 3), les critères obtenus paraissent tout à fait plausibles. Ils varient dans une marge allant de $0,47^\circ\text{C}$ à $1,34^\circ\text{C}$, ce qui est peu en regard de la précision de la chaîne de mesure de la température qui est de $0,5^\circ\text{C}$. Mis à part une séquence où certains paramètres sont relativement élevés, notamment ceux liés à l'inertie et dont on peut supposer que les bruits engendrés par les instruments de mesure et les perturbations extérieures non commandables que subit le système de serre pendant cette séquence sont responsables de cette situation. Les autres séquences donnent des résultats cohérents. On peut donc répondre favorablement à la question portant sur la représentation du comportement de la serre par un modèle réduit. Les courbes de la Fig. 23 portant sur les valeurs mesurables et prédites, illustrent bien l'intérêt et la compatibilité de ce modèle.

3- Sens physique des paramètres identifiés :

Malgré un comportement prédictif globalement satisfaisant, nous avons constaté qu'il arrive couramment que le meilleur critère corresponde à des paramètres dont le sens physique est inexpliqué.

Comme nous l'avons expliqué, l'algorithme converge toujours vers une solution, qui du point de vue mathématique correspond au minimum du critère, mais qui du point de vue physique n'est pas toujours la bonne. Pour cette raison, il faut prendre des valeurs initiales des paramètres qui correspondent physiquement à

un modèle réaliste, on se trouve ainsi près de la solution dès le début de la convergence. Il faut d'autre part figer absolument quelques paramètres afin de réduire l'espace vectoriel ; dans ce cas l'algorithme converge vers une solution mais souvent avec une grande imprécision.

Enfin, lorsque les données d'entrée sont fortement corrélées, le critère devient peu sensible à leurs variations, nous avons pu ainsi observer des variations sensibles des valeurs identifiées lorsque le système était soumis à des perturbations extérieures plus ou moins corrélées.

4- Utilisation du modèle pour la prédiction de la température de l'air de la serre :

L'étape ultime, décrite dans le paragraphe V.4 concerne l'utilisation du modèle avec des paramètres obtenus antérieurement. Nous avons pu au cours de la validation des modèles, utiliser les valeurs des paramètres identifiés pour une séquence test et de les adapter aux séquences ultérieures. Ces résultats nous ont permis de recalculer la température de l'air avec de bons critères de performance. Les résultats présentés dans les tableaux 6, et 7 et la figure 25 sont tout à fait cohérents. On observe que pour les séquences d'identification les critères obtenus varient de 0,5 et 1,35, alors que dans la séquence qui a servi pour la validation ils varient dans la marge de 0,77 à 1,89. L'intervalle d'erreur augmente donc de 2 à 14% seulement. En tenant compte des précisions de nos mesures, nous pouvons donc considérer que le modèle est adapté au contrôle et à la gestion du microclimat de la serre.

5- Energie

L'application et la confrontation de la méthode d'estimation des besoins de chauffage au programme énergétique appliqué à la serre expérimentale sont réalisées à partir des valeurs moyennes des températures de consigne internes qui y sont programmées et en fonction des données météorologiques extérieures. Les résultats de quantification énergétique obtenus sont relativement proches à la consommation réelle.

CONCLUSION



Ce travail a été structuré en cinq étapes, d'abord une étude bibliographique portant sur la hiérarchie de la gestion du microclimat de la serre et les bilans d'énergie en régime statique et dynamique, puis une étude de modalité des techniques d'identification, suivie de l'établissement d'un modèle dynamique réduit à partir du bilan thermo énergétique de la serre. Ces trois étapes ont été suivies par deux autres et qui consistaient à confronter la théorie à la pratique. La première a pour mission d'identifier les paramètres d'un modèle dynamique de comportement thermo-énergétique de la serre à partir des données et mesures enregistrées sur site. La deuxième a pour objectif l'application et la confrontation du modèle d'estimation de l'apport énergétique prévisionnel du poste de chauffage (climatisation) aux données énergétiques réelles de notre serre.

En effet, il s'agit d'adapter aux cas des serres la méthodologie d'identification déjà utilisée dans le bâtiment.

On obtient ainsi un modèle simplifié décrivant de façon réaliste, le comportement dynamique d'une serre cultivée et permettant d'identifier les paramètres physiques de la serre. Les valeurs de ces paramètres sont cohérentes sur les plans physiques et biologiques et permettent de recalculer la température interne de la serre avec une bonne précision.

On peut relever à cet égard la sensibilité du bilan d'énergie par rapport aux fuites de la serre dont l'importance peut paraître à première vue sans intérêt. Ces dernières ont une influence assez marquée sur l'effet de serre ainsi que sur la variation des facteurs thermiques évoluant dans le système serre. Le fait de négliger les fuites lorsque la serre est fermée, le taux d'absorption (α) du rayonnement global par l'air et la végétation diminue sensiblement ainsi que le coefficient d'échange convectif entre l'air et la masse thermique, qui a tendance à diminuer, ce qui explique une réduction de l'effet thermique dans la serre. Ce phénomène est concrétisé par la détérioration sensible du critère d'optimisation. Au fait, il faut retenir que le flux d'aération naturel ou forcé, y compris les fuites, sont des paramètres difficiles à maîtriser tant par la mesure que par le calcul, comme

cela a été déjà analysé dans le cadre du bâtiment où, la constante de temps (τ) varie de plus de 10 heures lorsque le taux de renouvellement d'air passe de 0 à 2 volumes/heure, il convient d'être prudent quand on parle de la constante de temps. Cette valeur n'est pas définie avec précision en théorie (fixée approximativement autour de 12H).

En ce qui concerne les caractéristiques dynamiques, nous observons une variation intéressante pour les valeurs identifiées C_m et h ainsi que la constante de temps qui en dépend.

Ceci dit, cette variation des valeurs des paramètres décrivant l'inertie de la serre (C_m , h et τ), est encore mal expliquée. L'amélioration de la forme du modèle, notamment au niveau du traitement de l'inertie pourrait être envisagée avec l'écriture d'un modèle d'ordre 2 (avec deux masses thermiques). Cependant, cette proposition, dans la mesure où elle augmente le nombre de paramètres à identifier et donc l'imprécision sur la valeur des paramètres à identifier, n'est pas forcément la meilleure.

L'estimation des paramètres caractéristiques de l'inertie de la serre (C_m et h) doit être étudiée plus en détail dans le dessein d'une utilisation du modèle à des fins de commande.

L'approche retenue conduit à des résultats satisfaisants du point de vue de la détermination des caractéristiques thermo-énergétiques de la serre, ce qui était l'une de nos préoccupations au début de cette étude. En réalité, l'analyse des grands intervalles de confiance qui leur sont associés montre qu'il s'agit d'un problème d'indétermination : les valeurs identifiées sont fortement intercorrélées, phénomène fréquent observé en identification. Les solutions obtenues dans chaque essai ne sont pas des solutions différentes au sens de l'identification, mais des solutions présentant une très faible sensibilité à l'encontre de ces deux paramètres. La notion de masse thermique fictive introduite dans notre modèle n'est qu'une notion arbitraire que l'algorithme d'identification utilise pour reproduire le comportement entrée – sortie.

Dans ce travail, nous n'avons pas eu l'opportunité de traiter le bilan hydrique dû essentiellement à l'évaporation et la transpiration de la plante, qui est elle-même une source d'énergie à ne pas négliger.

En ce qui concerne l'application de la méthode d'estimation des besoins énergétiques de la serre et sa confrontation avec la pratique en termes chiffrés des données mesurées et calculées montrent qu'elle est en mesure de quantifier et de valoriser l'utilisation de l'énergie avec une précision relativement intéressante.

Les résultats obtenus malgré la présence de cette indétermination sont relativement satisfaisants. Il faut noter qu'avec tous les travaux menés et réalisés sur les transferts thermiques, hydriques, biologiques et technologiques des serres, ce domaine reste un milieu de curiosité sans cesse et demande plus d'attention et une recherche rigoureuse afin d'approcher plus précisément son comportement.

BIBLIOGRAPHIE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **ANDRE Ph. et NICOLAS J.**,1998., Application de la théorie des systèmes à la thermique du bâtiment. Problème de modélisation, d'identification et de contrôle. Revue générale de thermique, 600-615 pp.
- [2] **ATHIENTIS , A.K.,M. SANTAMOURIS, A.KYPRIANO**, Application of ground cooling/heating for HVAC air precooling for the university of Cyprus, in: Architecture, city, environment, proceedings of PLEA 2000, Cambridge, UK, London, James &James, 2000,pp.94-99.
- [3] **ATTALAGE R. A.**, 1998., Etude théorique et expérimentale du comportement dynamique des émetteurs de chaleur à circulation d'eau, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des mines de Paris, 172 pp.
- [4] **AVSSAR R. et MAHER M. J.**,1982., Verification study of a numerical greenhouse microclimate model, Tans. ASAE, 25 1711-1720 pp.
- [5] **BAILEY B et COTTON.**, 1990., Glasshouse thermal screen: influence of single and double screens on heat loss and crop environment, 15-20 pp.
- [6] **BAILLE A., BOULARD T.**, 1989., Les fortes hygrométries sous serre. conséquences sur les cultures et solution techniques pour leurs contrôle. Rapport, I.N.R.A.
- [7] **BAILLE A., BOULARD T., GARY C.**, 1990., Les critères d'optimisation dans la gestion du climat et de la production sous serre. C.R. Acad. Fr., 76, N°5, 25-36 pp.
- [8] **BAILLE M., LAURY J. P., et BAILLE A.**, 1993., Influence du matériau de couverture sur les échanges énergétiques d'une serre. Agronomie, 3 (3) / 197-206 pp.
- [9] **BAILLE M., LAURY J. C., MOREL P et BAILLE A.**,1990., Mesure et estimation de l'évapotranspiration sous serre des plantes ornementales en pot. Cahier C.N.I.H., 15, 33-37 pp.
- [10] **BAUDIER M. et MARCHIO D.**,1997., Dynamic model identification applied to the measuring of thermal static characteristics of buildings, Energy and Buildings, N°17, 21-34
- [11] **BIBI-TRIKI N, BENYAROU. F, BENYOUCEF. B et M.A.R. EL-SAYED.**, Bilan thermique d'estimation des besoins énergétiques de la serre agricole tunnel à double paroi constituée dans sa face Nord d'un mur en panneau sandwich. Rev. Energ Ren : Valorisation ISSN 1112-2242 (1999) 77-82

- [12] BIENFAIT D., MOUNAJED R., RIBERON J. et VILLAIN J., 1997., Air flow patterns in building, chapter 4 :single sided ventilation. Natural ventilation and wind turbulence. IEA-ECR, Annexe 20. énergétiques, Université de POITIER
- [13] BOIS J M., BLAY D., PENOT F et TUHAULT J L., 1998., Ventilation naturelle entre deux pièces d'habitation. Note interne, Lab d'étude des systèmes thermiques et énergétiques, Université de POITIER.
- [14] BOJIC, M., N. TRIFUNOVIC, G. PAPADAKIS and S. KYRITSIS, Numerical simulation, technical and economic evaluation of air-to-earth heat exchanger coupled to a building, *Energy*, 1997, 22 (12), pp.1151-1158.
- [15] BOSSOKEN, E., Energy efficiency of room air conditioners: EERAC Group, Study for the DG XVIICEC, 1999.
- [16] BOT G.P.A., 1993., Greenhouse climate: from physical processus to a dynamic model. Thesis PH6D Dissertation Agric. Univ. Wageningen, The Netherlands.
- [17] BOULARD T. et BAILLE A., 1987., Analysis of thermal performance of greenhouse as a solar collector. *Energy in Agriculture*, 6, 17-26 pp.
- [18] BOULARD T., E. RAZAFINJOHANY and A. BAILLE, Heat and water vapour transfer in agricultural greenhouse with an underground heat storage system, part 1 and 2, *Agricultural and Forest Meteorology*, 1989, 45, pp. 175-194.
- [19] BOULARD T., BAILLE A., LE GALL F., 1990., Etude de différentes méthodes de refroidissement sur le climat et la transpiration de tomates de serre. *Agronomie*, 11, 543-553 pp.
- [20] BOULARD T., BAILLE A., MENIER M. et VILLETTE F., 1991., Mesure et modélisation de la résistance stomatique foliaire et de la transpiration d'un couvert de tomate. *Agronomie*, 11, 259-274 pp.
- [21] BOULARD T., et JEMAA R., 1993., Greenhouse tomato crop transpiration model application to irrigation control. *Acta Horticultural*, 335, 381-387 pp. climate control, model incorporating effects of ventilaenhouse natural measurements and modelling. *Agricultural and*
- [22] BOULARD T., BAILLE A., 1993., A simple Greenhouse climate control, model incorporating effects of ventilaenhouse natural ventilation measurements and modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 65, 145-157 pp.

- [23] **BOULARD T., REICH P., MENIER M. ET MARTIN-CLOUAIRE M.**, 1993., Determination of daily climatic set points for greenhouse tomato crop. Commission of the European communities, directorate general for energy DGXVII, European seminar, business opportunities in the field of greenhouse horticulture in the southern Europe. A Thermie Programm Action. Heraklion, Crete Island-Greece 12-13-14 November Center for energy sources GR.19009 PIKERMI.
- [24] **BOULARD T.**, 1993., Etude expérimentale et modélisation de l'aération naturelle des serres. Récapitulatif des résultats des études conduites de 1988 à 1992. Note Interne INRA de Montfavet.
- [25] **BOULARD T.**1996. Caractérisation et modélisation du climat des serres : application à la climatisation estivale, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, 122p.
- [26] **BOULARD T.**, 2003. Evapotranspiration in greenhouse Marcel Dekker. New York (USA). STEWART B.A. et HOWELL T.A). Encyclopaedia of water science, 258-263.
- [27] **BOULARD T., FARGUES J., PONCET C., RIDRAY G., TCHAMITCHIAN M.** 2003. PIC SERRE G., and IPM research program for greenhouse tomato crops." PIC SERRE " un programme de recherches sur la protection intégrée de cultures de tomates de serre. Colloque international, Avignon (FRP), 2003/09/17. CTIFL, Paris (FRA).
- [28] **BOULARD T., FATNASSI H., LAGIER J., SMITE N., ROUGIET M., FARGUES J.**, 2003. Effect of confinement on an humidity in tunnels and in the leaf boundary layer. Implications for greenhouse crops biological control. Colloque international, Avignon (FRA), 2003/09/17.
- [29] **BRUNDEET E.**, et al., 1978., Energy conservation and solar heating system for new and existing greenhouse, Report N^o ISSN # 705/7393 Dept. Mech. Eng., University of the Waterloo, Ontario, Canada.
- [30] **BUSINGER J. A.**, 1963., The glasshouse (greenhouse) climate, Physics of plant Environment (ed. by W. R. van Wijk), North -Hold Pubi. Co., Amsterdam, 277-3 I 8 pp.
- [31] **CHIAPALE J. p, KITTAS C. et de VILLELE O.**, 1981., Estimation régionale des besoins de chauffage des serres, Acta Horticultural 115, 493-502 pp.
- [32] **COOLS C., GICQUEL R., NEIRAC F.**, 1989., Identification of building reduced models. Application to the characterization of passive solar components. International Journal of Solar Energy, Vol. 7, N^o3, 127-1 58 pp.

- [33] **DE JONG T.**, 1990., Natural ventilation of large multi-span greenhouses. Thesis, Agricolt, University Wageningen, 115 pp.
- [34] **DE LARMINAT P. et THOMAS Y.**, 1975., Automatique des systèmes linéaires. Flammarion Sciences.
- [35] **DE PAEPE, M.**, Three dimensional time accurate unstructural finite volume technique for modelling ground-coupled heat exchangers, in / Proceedings of HEFA2002, 1st International Conference on Heat
- [36] **DELTOUR. et al.**, 1985., Dynamic Modelling of heat and mass transfer in greenhouse, Acta Horticultural 174, 119-126 pp.
- [37] **DUFFIE J. A. et BECKMAN W. A.**, 1974., Solar energy thermal processes. Wileyinter science, New-York, 366 pp.
- [38] **ESP:**A building and plant energy simulation environment, User guide Version 9 Series, ESRU, University of Strathclyde, Glasgow, 2002.
- [39] **FERNANDEZ J. E. et BAILEY B. J.** 1992., Measurement and prediction of greenhouse ventilation rates. Agric. For. Meteorol. 58: 229-245 pp.
- [40] **GAUTHIER, C., M. LACROIX and H. BERNIER**, Numerical simulation of soil heat exchanger-storage systems for greenhouses, *Solar Energy*, 1997, 30(6), pp. 333-346
- [41] **GIRARD J. D.**, 1989.,, *Système d'Analyse de Transfert Thermique*, Thèse de l'institut National Polytechnique de Grenoble.
- [42] **GU, S., D. HUI, H. MO**, 1998, The Optimal Fitting of the Nonlinear Equation with Contraction-Expansion Algorithm, Acta Bio Mathematica, (in English with Chinese abstract)
- [43] **GU, S., D. HUI, H. Mo**, 1998, the optimal Fitting of the Nonlinear Equation with Contraction-expansion Algorithm, Acta Agronomical Sinica, 24(5): 513-519.
- [44] **HOLLMULLER, P., B. LACHAL, C. SOUTTER**, Serre 15W Waedenswil avec stockage de chaleur par tubes enterrés: Analyse énergétique, Rapport interne, Centre Universitaire d'étude des Problèmes de l'énergie, Université de Genève, 1999.
- [45] **HOLLMULLER, P., B. LACHAL, P. JABOYEDOFFE, A. REIST, J. GiL, L. DANLOY**, Geoser : Stockage solaire à court terme en serres horticoles, Rapport final, Centre Universitaire d'Etude des Problèmes de l'Energie, Université de Genève, (parution prévue en 2002).

- [46] **HOLLMULLER, P., B.LACHAL, O.JOLLIET.**, Projet COSTEAU, Rapport Final, Centre Universitaire d'Etude des Problèmes de l'Energie, Université de Genève, (parution prévue en 2002).
- [47] **HOXEY R. P. et RICYIARDSON G. M.**, 1993., Measurements of wind loads on full-scale plastic dad greenhouse. *Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 16, 227-288 pp.
- [48] **ISSANCHOU G.**, 1991., Modélisation énergétique des serres. Contribution à la mise au point d'un logiciel de thermique appliqué à l'ingénierie des serres. Thèse de Doctorat, Université de Perpignan, 250p.
- [49] **JANSSON, P-E & KARLBERG, L.**2001/ Coup Model Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere system, Rotal Instutue of Land and mater resources, TRITA-AMIREPORT 3087.
- [50] **JANSSON, P-E and MOON,D.** 2001.Acoupled model of water, heat mass transfer using object orientation to improve flexibility and functionality *Environmental Modelling & Solware* 16 (1), 37-46
- [51] **JEANNERET, C.**, Comportement et efficacité énergétique : Quelle marge de manœuvre pour le consommateur et quel potentiel pour le pays ? Travail de diplôme post grade en énergie, Ecole polytechnique de Lausanne, 2000.
- [52] **JOLLIET O.**, 1988., Modélisation du comportement thermique d'une serre horticole thèse de Doctorat, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 247p.
- [53] **KIMBALL B. A.**, 1973., Simulation of the energy balance greenhouse. *Agric. Meteor.* 11, 243-260 pp.
- [54] **KIMBALL B. A.**, 1986., A modular energy balance program including subroutines for greenhouse and the other latent devices. U.S.D.A., Agricultural Research Service, ARS-33, 360p.
- [55] **KINDELAN NI.**, 1990., Dynamic modelling of greenhouse environment, *Trans. ASAE* 23, 1232-1239 pp.
- [56] **KIRPATRICK A. T. et HILL D. D.**, 1998., Mixed convection heat transfer in a passive solar building. *Solar Energy* Vol. 40, N° 1, 25-34 pp.
- [57] **LACHAL, B. et W. WEBER**, Les besoins d'énergie thermique des bâtiments, in *Quels systèmes énergétiques pour le XXIème siècle ?*, édités par J.-L. Bertholet, M. Garbely, B. Lachal, F. Romerio et W.Weber, Série « Energie, environnement et société », CUEPE, Université de Genève, 2000.
- [58] **LAGIER J.**, 2002 Film plastique, les pesticides ont une incidence sur la durabilité des matériaux. *Réussir fruits et légumes (FRA)*, (208), 38-40.

- [59] **LEVIT, H.J., R. GASPAR and R.D. PIACENTINI et al.**, Simulation of greenhouse microclimate by earthtube heat exchangers, *Agricultural and Forest Meteorology*, 1989, vol. 47, pp. 31-47.
- [60] **MAHER M. J. et O'FLAHERTY O.**, 1973., An analysis of greenhouse-climate, *J. Agric. Enging. Res.* 18, 197-203 pp.
- [61] **MARQUARDT D. W.**, 1963., An algorithm for least-squares estimation of non linear parameters. *J. Soc. Indust. Appl. Math.*
- [62] **MIHALAKAROU, G., SANTAMOURIS and D.ASIMAKOPOULOS**, Modelling the thermal performance of earch-to-air heat exchangers, *Solar Energy*, 1994, 53(3), pp. 301-305.
- [63] **MONTEIL C.**, 1985., Contribution informatique à l'analyse énergétique des serres agricoles. Thèse de Doctorat; Institut National Polytechnique de Toulouse, 168 pp.
- [64] **NEVEU A., BACOT P. et REGAS.**, 1996., Modèles d'évolution thermique des bâtiments conditions pratiques d'identification, *Revue générale de thermique*, 413-420 pp.
- [65] **NEIRAC F'. P.**, 1989., Approche théorique et expérimentale des modèles réduits du comportement thermique des bâtiments, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 267p.
- [66] **OKANO J., ALBRIGHT L. D., PAN J. Q. et MARSH L. S.**, 1985., Greenhouse parameter estimation by recursive least squares. *Acta Horticultural*, 174,433-441 pp.
- [67] **PETIT D.**, 1993., Système thermique diffus. Modélisation de leur comportement par identification de modes dominants. *Revue générale de Thermique*, 302-3 11 pp.
- [68] **RIBERON J., BARNAUD G., VILLAIN J. BIENFAIT D. et MOUNAJED D.**, 1989.,Turbulence du vent et ventilation. Colloque AFME Sophia Antipolis.
- [69] **RICHALET J.**, 1991., Pratique de l'identification. Edition Hermès, 222 pp.
- [70] **RICHALET V.**, 1991., Caractérisation énergétique des bâtiments sur site. Identification de modèles dynamiques, Méthodes de signature énergétique, Thèse de doctorat de l'institut National Polytechnique de Grenoble, 305 pp.
- [71] **SEGINER I. et ALBRIGHT L. D.**, 1993., Greenhouse operation for best aerial environment Final Research Report, BARD. Project I. 117 - 79 Technics, Israel Institute of Technology

- [72] **SEGINER I. et KANTZ D.**, 1996., , In situ determination of transfer coefficients for heat and water vapour in a small greenhouse. *J. agric. Engng Res*, 35, 39-54 pp.
- [73] **SELCUK M. K.**, 1971., Analysis, design and performance evaluation of controlled environment greenhouses, *Am. Soc. Heating Refrig. Aircond Eng. Trans.* 77, 72-78 pp.
- [74] **SERRES, L., A. TROMBE, J.H. CONILH**, Study of coupled energy saving systems sensitivity factor analysis, *Building and Environment*, 1997, vol. 32(2), pp. 137-148.
- [75] **SIA 382/2**, 1992 : Puissance de réfrigération à installer dans le bâtiment, Zürich, Société suisse des ingénieurs et des architectes, 1992.
- [76] **TAKAKURA T., JORDAN K. A. et BOYD L. L.**, 1971., Dynamic simulation of plant growth and environment in the greenhouse, *Tans. ASAE* 14, 964 pp.
- [77] **TAKAKURA T., KURATA K. et HONJO T.**, 1985 Physical models and the greenhouse climate, *Acta Horticultural* 174, 97-104 pp.
- [78] **TAKAMI S. et UCHIJIMA Z.**, 1987., A Model for the greenhouse environment as affected by the mass and energy exchange of a crop, *J. Agric. Meteorology* , Tokyo, Japan.
- [79] **TANTAU H. J.**, 1995., Greenhouse climate control using mathematical models. *Acta Horticultural*, 174, 449-459 pp. TEN
- [80] **UDINK TEN CATE A. J.**, 1993., Modelling and (adaptive) control of greenhouse climate Thesis PH-D Dissertation Agric. Univ. Wageningen, Netherlands..
- [81] **UDINK TEN CATE A. J.**, 1995., Modelling and simulation in greenhouse climate control. *Acta Horticultural*, 174, 461-467 pp.
- [82] **VAN BAVEL C. H. M., DAMAGNEZ J. et SADLER E. J.**, 1991., - The fluid-roof solar greenhouse : energy budget analysis by simulation, *Agric. Meteor.* 23,61-76 pp.
- [83] **VAN BAVEL C. H. M., TAKAKURA T., BOT G. P. A.**, 1995., Global comparison of three greenhouse climate models. *Acta Hort.*, 174., 21-33 pp.
- [84] **VARLET-CRANCHER C., GOSSE G., CHARTIER M., M., SINOQUET H., BONHOMME R., et ALLIRAND J. M.**, 1989., Mise au point : rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. *Agronomie* 9, 419-439 pp.

- [85] **VON ELSNER B.**, 1982., Das Kleinklima der Warmeverbrauch von geschlossenen Gewächshäusern, Institut für Technik in Gartenbau, Univ. Hannover, Heft 12. 197 pp.
- [86] **VON ZABELTITZ, C.**, Ed., Greenhouse heating with solar energy, REUR technical series 1, Roma, FAO/ENEA, 1987, 200 p.
- [87] **WALKER J. N.**, 1965., Predicting temperatures in ventilation greenhouse. Trans. ASAE 8, 445-448 pp.
- [88] **ZIMMERMANN, M., J. ANDERSSON**, Low energy cooling. Case study buildings, Annex 28 : Low energy cooling, AIE, 1998.
- [89] **ZHANG J. S., JANNI K. A. et JACOBSON L. D.**, 1989. Modelling natural ventilation induced by combined thermal buoyancy and wind. ASAE Journal Vol 32, 6.

NOMENCLATURE

Al et C	Paramètres du modèle de renouvellement d'air de la serre (.),(.)
B_0	Rapport de Bowen = $K_s(T_i - T_e)/K_l(p_i - p_e)$ (.)
C_l	Capacité thermique équivalente de la vapeur d'eau de l'air ($J\text{hpa}^{-1}\text{m}^{-2}$)
C_m	Capacité calorifique de la masse thermique ($J\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$)
C_p	Capacité thermique massique de l'air ($J\text{Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
d_0	Débit de fuite (m^3s^{-1})
d_n	Durée moyenne de la nuit mensuelle
d_m	Nombre de nuits par mois
F_{xy}	Facteur d'angle de x vis à vis de y
f	Fraction d'insolation
G_v	Débit d'air volumique (m^3s^{-1})
h	Coefficient d'échange convectif (air /sol) ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
h_{ai}	Coefficient de transfert de chaleur par convection p/ai ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
h_{ae}	Coefficient de transfert de chaleur par convection p/ae ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
H_{ai} H_{ae}	Enthalpie de l'air intérieur et extérieur (WhKg^{-1})
J	Ecart quadratique moyen
K	($K = a + b V$) coefficient de déperdition global à travers les parois ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
K_l	Coefficient de transfert de chaleur latente par ventilation ($\text{Wm}^{-2}\text{hpa}^{-1}$)
K_s	Coefficient de transfert de chaleur sensible par ventilation ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
K_p	Coefficient d'absorption de la paroi
£	Une relation mathématique
n	Indice correspondant au pas de temps considéré
P_{xy}	Puissance échangée par rayonnement entre les faces x et y (W)
r_e	Albédo du sol extérieur
r_i	Albédo du sol intérieur
R_g	Rayonnement global extérieur (Wm^{-2})
s	Surface ouverte des ouvrants (m^2)
s_0	Surface de fuite (m^2)
S	Surface couverte (m^2)
T_e, p_e	Température, pression partielle de vapeur d'eau de l'air extérieur ($^{\circ}\text{C}, \text{hPa}$)
T_i, p_i	Température, pression partielle de vapeur d'eau de l'air intérieur ($^{\circ}\text{C}, \text{hPa}$)
T_p	Température de la paroi ($^{\circ}\text{C}$)
T_{si}	Température du sol intérieur ($^{\circ}\text{C}$)
T_{se}	Température du sol extérieur ($^{\circ}\text{C}$)
T_c	Température de la voûte céleste ($^{\circ}\text{C}$)
T_m	Température de la masse thermique ($^{\circ}\text{C}$)

Tr	Transpiration de la culture (Wm^{-2})
U	Vecteur Des grandeurs exogènes au système (sollicitations)
V	Vitesse du vent (ms^{-1})
v	Volume de la serre (m^3)
X	Vecteur des variables d'état du système
Y	Vecteur des variables d'observations du système mesurées (sortie)
Y*	Vecteur des variables d'observations du système calculées (sortie)
α	Taux d'absorption du rayonnement global extérieur par l'air de la serre (.)
β	Taux d'absorption du rayonnement global extérieur par la masse thermique de la serre (.)
Δt	Pas de temps d'observation (s)
ε	Critère
$\varepsilon_p, \varepsilon_e, \varepsilon_i, \varepsilon_c$	Emissivités respectives de la paroi du sol extérieur, intérieur et de la voûte céleste
γ	Constante psychrométrique (hPaK^{-1})
ϕ_l	Quantité d'énergie apportée par le système de brumisation (Wm^{-2})
μ	Paramètre intermédiaire
ρ	Masse volumique de l'air (Kgm^{-3})
σ	Constante de Stefan ($\sigma=5,67.10^{-8}\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)
τ	Constante de temps thermique du système (s)
τ	Transmittivité de la paroi (.)
ξ	Paramètre intermédiaire
ψ	Vecteur des paramètres du système