

République algérienne démocratique et populaire.

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche
scientifique.

Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen.

Faculté des sciences.

Département du physique.

Mémoire du master en physique énergétique

Intitulé:

*« Simulation du coefficient de transfert de chaleur à
travers la paroi d'une serre »*

Présenté par :
GADIRI Houssam

Soutenu le 08/03/2012 devant le jury d'examination:

A. KHERROUS	Président du jury	Maitre de conférences	(Université de Tlemcen)
N. BIBTRIKI	Encadreur	professeur	(Université de Tlemcen)
A. CHERMITTI	Examineur	Maitre de conférences	(Université de Tlemcen)
R. SAIM	Examineur	Maitre de conférences	(Université de Tlemcen)

2010/2011

إهداء

أهدي هذا العمل لأمي وأبي و جدتي وإلى كل إخوتي عبد الغني و زكرياء
و أمين و إلياس و عبد الحميد و الى كل أبناء إخوتي محمد ضياء الدين و
محمد الشريف و محمد الصديق و زين العابدين ويونس و وليد وإلى كل
أهلي و عائلتي و كل الأقارب والأصدقاء.

أتمنى أن يكون هذا العمل خطوة على طريق النجاح واستمرارية في
المستوى لأعمال أخرى لزملاء آخرين سبقونا في هذا المجال أتمنى أن
يكون هذا العمل ثمرة في المستوى ومفتاحا لفتح أبواب تضيف الجديد
للآخرين الذين سيقبلون على مثله.

Remerciements :

Au terme de ce travail, je tiens d'abord à exprimer mes profondes gratitude et nos vifs remerciements de reconnaissance au Monsieur N.BIBITRIKI pour son encadrement exceptionnel et son soutien en mobilisant les moyens possibles pour la réalisation de ce travail.

Nos remerciements vont également à messieurs les membres du jury pour avoir accepté d'examiner ce travail ainsi que pour leur délicate attention.

Nous remercions également toutes personnes ayant participé de près ou de loin à la préparation de ce travail, qu'ils trouvent tous, ici le témoignage de notre profonde reconnaissance.

Je tien à exprimer toute mes gratitude à mon ami BEN SEDIK Abdelouaheb de son soutien pour la réalisation de ce travail.

Enfin, à nos familles, à nos amis et à tous ceux qui ont participés de près ou de loin dans l'élaboration de ce travail, vous trouvez ici l'expression de nos profondes reconnaissances.

Sommaire

INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : La plante	
1. Introduction.....	2
2. La plante.....	3
2.1. La photosynthèse.....	3
2.2. La respiration.....	4
2.3. La transpiration.....	4
3. Besoins de la plante.....	5
3.1. Besoin en lumière.....	5
3.2. Besoins en eau (goutte à goutte).....	6
3.2.1. Détermination des besoins en eau.....	6
3.3. Besoins des plantes en éléments minéraux et organiques.....	7
3.3.1. La composition des végétaux.....	7
3.3.2. L'origine et le rôle des différents éléments.....	8
3.3.3. L'utilité des engrais.....	8
3.4. Humidité relative.....	9
3.4.1 Définition et expression de l'humidité.....	10
3.4.2. Contrôle de l'humidité.....	12
4. Influences sur la plante.....	13
4.1. Influence de la lumière sur la plante.....	14
4.2. Influence de la température sur la plante.....	15
4.2.1 Influence de la température sur la croissance des plantes.....	15
4.2.2 Conséquences des températures.....	16
4.2.3 Influence de la température sur la vitesse moyenne de croissance.....	16
4.3. Influence de l'humidité.....	18
5. Influences sur la photosynthèse.....	19
5.1. Influence de la lumière (les valeurs d'intensité lumineuse).....	19
5.2. Comparaison de la photosynthèse de plantes de lumière et de plantes d'ombre.....	20
5.3. Comparaison entre le spectre d'action et d'absorption.....	21
5.4. Influence de la concentration en CO ₂	22
5.5. Influence de la température sur la photosynthèse.....	24
6. Croissance et développement d'une plante.....	24
6.1. Croissance.....	26
6.1.1. Définition.....	26
6.1.2. Croissance cellulaire et différenciation des tissus.....	26
6.2. Développement.....	27
6.2.1. Définition.....	27
6.2.2. Germination, dormance et viabilité des semences.....	28
6.2.3. Développement des feuilles, des tiges et des racines.....	29

Sommaire

6.2.4. Floraison et développement reproducteur.....	29
6.2.5. Sénescence, maturité et mortalité des organes.....	30
6.2. Rendement, résultante de la croissance et du développement.....	30
6.3.1. Rendement biologique.....	30
6.3.2. Rendement utile ou rendement économique.....	30
7. Analyse quantitative de la croissance et du développement.....	31
CHAPITRE II : La serre	
1. Introduction.....	33
2. Serres et grands tunnels.....	33
2.1. Types de Constructions rencontrées en Méditerranée.....	33
2.1.1. Constructions en bois.....	36
2.1.2. Constructions mixtes: en bois et tubes d'acier.....	36
2.1.3. Constructions en acier.....	39
2.2 Matériaux de couverture.....	39
2.2.1. Description des Matériaux.....	39
A. Films à base de Polyéthylène.....	39
<i>A.1. Le Polyéthylène basse densité (PE - BD)</i>	39
<i>A.2. Les Polyéthylènes Vinyle-Acétate (EVA) ou Copolymères éthylvinylacétate</i>	40
<i>A.3. Les Polyéthylènes Infrarouge (PE-IR) (ou PE modifiés)</i>	41
<i>A.4 Les Polyéthylènes thermiques' (ou EVA chargés)</i>	41
B. Films non à base de Polyéthylène.....	42
<i>B.1. Le Chlorure de Polyvinyle (PVC) (Polychlorure de Vinyle)</i>	43
C. Matériaux rigides de couverture de serre.....	43
<i>C.1. Le verre</i>	44
<i>C.2. Les Polyesters armés de fibres de verre ou (PRV) (polyesters renforcés)</i>	44
<i>C.3. Les doubles parois</i>	45
2.2.2 Propriétés des Matériaux de Couverture.....	45
A. Facteur moyen de transmission des matériaux de couverture.....	46
B. Coefficient de conductivité thermique k.....	47
C. Dégradabilité des plastiques.....	47
3. Tunnels bas et films plats.....	47
3.1. Structure et équipement.....	47
3.2. Utilisation des tunnels bas et des films non soutenus.....	49
4. Paillage.....	49
4.1 Matériaux de paillis.....	49
4.2. Utilisation de paillis synthétiques et organiques.....	51
4.3. Production.....	51
5. Vieillessement.....	51
5.1. Vieillessement naturel.....	51
5.2. Vieillessement artificiel.....	51

Sommaire

5.3. Vieillessement des matériaux de couverture des serres.....	52
5.3.1 Existence du phénomène.....	52
5.3.2. Mécanismes du vieillissement.....	52
5.3.3. Méthodes de lutte contre le vieillissement.....	53
5.4. Vieillessement du verre.....	54
5.5. Vieillessement du polyméthacrylate de méthyle (PMMA)	54
5.6. Vieillessement des polyesters.....	54
5.7. Vieillessement du Polyéthylène (PE)	55
5.8. Vieillessement du Chlorure de polyvinyle acétate PVC.....	55
5.9. Vieillessement du Polyéthylevinyle acétate (EVA)	56
CHAPITRE III : Microclimat	
Introduction.....	57
2. Le chauffage de la serre.....	57
2.1. Systèmes de chauffage à eau chaude.....	59
2.2. Flux d'air horizontal.....	62
2.3 Chauffage de la zone racinaire.....	63
2.4. Chauffage radiant.....	63
3. Ventilation.....	64
3.1. Ventilation naturelle.....	64
3.2. Ventilation mécanique.....	65
4. Refroidissement à évaporation.....	67
5. contrôle des paramètres de l'environnement.....	68
6. Conservation de l'énergie.....	69
CHAPITRE IV : Modélisation	
1. Introduction.....	71
2. Principes de base.....	71
2.1. Les différents types de modèle physique de serres.....	71
2.1.1. Modèles statiques.....	71
2.1.2. Modèles dynamiques.....	71
2.2. Spécificité de la thermique des serres par rapport a celle des bâtiments d'habitation.....	72
2.3. Bilan d'énergie de l'air de la serre.....	73
2.3.1 Les coefficients de transfert.....	73
A. Le coefficient global de déperdition (K)	74
B. Coefficients K_s et K_l	74
C. Coefficient d'échange convectif h	74

Sommaire

D. Coefficients α et β	74
2.3.2 Approche de l'équation du bilan d'énergie.....	75
3. Détermination de K.....	75
3.1. Modèle d'estimation de K.....	75
3.1.1. Formulation de K.....	75
3.1.2. Expression des coefficients h_i et h_e	76
3.1.3. Détermination de K.....	78
 CAHPITRE V : Simulation	
1. Introduction.....	79
2. Organigramme.....	79
3. Résultat de la simulation.....	81
3.1. Serre tunnel.....	81
3.1.1 Coefficient K pour $f=0$	82
3.1.2 Coefficient K pour $f=1$	82
3.1.3 Les déperdition thermiques Q_p pour $f=0$	84
3.1.4 Les déperdition thermiques pour $f=1$	85
3.2 Serre chapelle.....	87
3.2.1 Coefficient K pour $f=0$	87
3.2.2 Coefficient K pour $f=1$	88
3.2.3 Les déperditions thermiques pour $f=0$	89
3.2.4 Déperditions thermiques pour $f=1$	91
4. Comparaison.....	93
4.1 Comparaison entres les résultats de K.....	93
4.2 Comparaison des déperditions thermiques.....	94
5. Discussion générale.....	95
 CONCLUSION Générale.....	96
 ANNEXE	
1. Les mots clé de l'irrigation.....	98
2. Tableau de conversion de l'intensité de la lumière.....	99
3. Notions compléments sur la plante.....	99
3.2. Définition d'une hormone.....	99
3.3. Nature et fonctions des hormones naturelles.....	99
3.4. Régulation hormonale.....	100
3.5. Rôle des phytohormones en agriculture.....	101
3.6. Concepts de base.....	101

Sommaire

3.6.1 Vitesse absolue de croissance (CGR)	101
3.6.2. Vitesse relative de croissance (RGR)	102
3.6.3. Taux d'assimilation nette (NAR)	102
3.6.4. Surface foliaire massique (LAR)	103
3.6.5. Surface foliaire spécifique (SLA)	103
3.6.6. Poids foliaire spécifique (LWR)	103
3.6.7. Concept d'indice foliaire (LAI)	103
3.6.8. Durée d'action foliaire (LAD)	103
3.7. Lois fondamentales de l'analyse classique de la croissance.....	104
3.7.1. Décomposition du CGR.	104
3.7.2 Décomposition du RGR.	104
3.7.3. Décomposition du LAR.	104
3.8. Développements récents.....	104
3.8.1. Relation entre CGR et RGR.....	104
3.8.2. Relation entre CGR et rayonnement incident.....	105
3.9 Analyse quantitative du développement.....	105
3.9.1. Caractérisation du développement.....	105
3.9.2. Échelles de développement.....	105
3.9.3. Développement et élaboration du rendement.....	106
4. Mesure de la dissipation thermique.....	109
5. Éclairement naturel.....	109
5.1 Les dispositions favorisant l'éclairement naturel hivernal concernent.....	109
<i>a)</i> la forme et l'orientation des serres	109
<i>b)</i> la transmission de la lumière par le vitrage.....	109
5.2 Éclairage artificiel	110
5.2.1. Éclairage photosynthétique.....	110
5.2.2. Éclairage morphogénétique et notamment photopériodique.....	110
5.3. Éclairage d'appoint ou éclairage totalement artificiel.....	110
5.3.1. Éclairage d'appoint à la lumière du jour	110
5.3.2. Éclairage totalement artificiel.....	110
6. Tableau des ordres de grandeur des caractéristiques principales de divers matériaux de qualité horticole utilisés en couverture de serres.....	110
BIBLIOGRAPHIE.....	112

Introduction

Introduction

La serre est un outil de production agricole spécialisé. Elle permet de créer un microclimat artificiel connu sous l'appellation « effet de serre ». Ce microclimat permet d'une part, de protéger la végétation contre les effets néfastes dû à la variation brusque et extrême du climat environnant et permet d'autre part de favoriser la croissance et le développement de la culture protégée quand les conditions adéquates s'apprêtent.

Les principaux facteurs intervenant dans le milieu serre sont *la température, la lumière et l'humidité*. Chacun de ces facteurs est lié étroitement à la structure, à la conception architecturale, à l'orientation de la serre et surtout aux propriétés et caractéristiques physique du matériau de couverture.

La serre tunnel en polyéthylène (PE) est largement utilisée dans les pays du bassin méditerranéen en raison du faible coût d'investissement et de la rentabilité relative en matière de production. Elle est relativement performante en hiver et en printemps où l'énergie solaire est suffisante pour la production sous serre. Par contre la serre tunnel en PE perd de son efficacité en été où le climat est très chaud qui peut se traduire par des surchauffes et de forte hygrométrie qui pénalisent ainsi la qualité et la quantité en matière de production tout en développant en parallèle des maladies et des parasites qui affectent sérieusement la culture sous abris.

La serre est un système énergétique complexe dans lequel les différents modes de transferts thermiques, hydriques et massiques interviennent et s'échangent entre elles. Malgré que ces modes d'échange sont relativement bien connus scientifiquement, leurs interprétations restent complexes et entraîne des difficultés dans la modélisation du système serre.

La convection qui régit les échanges de chaleur entre l'air intérieur et toutes les surfaces solides (sol, paroi, culture, équipements complémentaires, étages,...) ainsi que les échanges entre les milieux intérieur et extérieur ont été traités pour une serre vide. L'interaction entre ces échanges convectifs et le rayonnement solaire donne naissance à un phénomène physique qu'on appelle « effet de serre ».

De nombreux modèles physiques et mathématiques destinés à appréhender les phénomènes énergétiques du système serre ont été élaborés et développés ces dernières décennies, en égard de la croissance de la population et de ses besoins alimentaires. La majorité de ces modèles s'articule en premier lieu autour de la formulation des bilans d'énergie instantanés de différents composants du système serre (ambiance interne, sol, paroi, plantes, chauffage, aération, brumisation,...etc.) et qui se traduisent en deuxième lieu par la modélisation des systèmes serre dynamiques en fonction du temps (modèle discrets) et par l'optimisation des énergies allouées au bon fonctionnement et à la bonne gestion du système serre.

A partir de ce constat, nous avons entrepris notre étude par la mise au point du bilan énergétique de l'ambiance interne de la serre agricole à travers le système complexe que constitue la serre avec ses différents compartiments (sol, couverture, plantes,...) représentée par modèle réduit.

L'étude du comportement thermique de la paroi nous a conduit directement vers l'évaluation des déperditions thermiques à travers la paroi par la définition et la détermination du coefficient globale de transmission de la chaleur (K) à travers la paroi.

Chapitre I

La plante

1. Introduction

Les végétaux sont des organismes autotrophes, c'est-à-dire qu'ils produisent leur propre matière organique à partir de sels minéraux puisés dans le sol et de dioxyde de carbone, assimilé par les feuilles grâce à l'énergie solaire: c'est le mécanisme de photosynthèse. Ils lui doivent, par le biais de la chlorophylle contenue dans les chloroplastes, la couleur verte des plantes.

Les végétaux sont des organismes qui appartiennent au règne végétal, alors que les plantes sont, parmi les végétaux ; les organismes qui possèdent des racines et une partie aérienne.

Les végétaux sont des organismes fixés au sol par leurs racines (mais il y a des exceptions), ce qui les rend très dépendants des conditions environnementales.

Les plantes ont besoin de différents éléments rassemblés pour survivre et pousser. Le premier est la lumière, utile pour le processus de photosynthèse, qui apporte de l'énergie. Ensuite viennent l'eau et la terre d'où sont tirés les nutriments, et l'air dont elles extraient le dioxyde de carbone, permettant également la photosynthèse. Les conditions exactes varient selon le type de plante.

La culture en « plein champ » est la culture classique qui ne bénéficie d'aucune protection contre les effets du climat.

La culture « sous abri » est une technique qui permet de protéger les plantes par un abri ; elle nécessite une irrigation permanente. Pour une culture « sous abri, pleine terre », le sol est conservé, alors que, dans le cas d'une culture « sous abri, hors sol », la production se fait soit sur un substrat inerte, soit sans substrat (*Nutrient Film Technology* ou *NFT*, aéroponie, aquaponie...). Dans ce type de culture, il faut pouvoir disposer d'une irrigation fertilisante (solution nutritive) permanente.

Le défi de la culture sous abri consiste à permettre à la plante de conserver un bon équilibre entre la photosynthèse et la respiration. Ainsi, la plante pourra accumuler des réserves et grandir.

Les réactions qui se produisent dans la plante, comme la photosynthèse et la respiration, sont influencées par les facteurs environnementaux. La température et la lumière ont un impact considérable.

Avantages et inconvénients de la culture sous abri

Pendant la saison des pluies, les sols gorgés d'eau ne peuvent être cultivés et les pluies, par leur impact, détruisent les plantes et les fruits tout en facilitant le développement de maladies, fongiques en particulier. Sous un tel climat, la production des cultures maraîchères est donc limitée. Pourtant, la densité de population élevée observée induit une forte demande en légumes.

Pour augmenter la production maraîchère, il faut pouvoir contourner les contraintes liées à la forte pluviométrie du climat. Dans ce contexte, la culture sous abri est une technique intéressante ; elle protège les plants de la pluie et permet donc de produire tout au long de l'année. Par ailleurs, ce type de culture permet de développer des productions hors sol ou hydroponiques et donc de supprimer certaines contraintes liées à la nature du sol : déficiences minérales, structure physique inadéquate, présence de pathogènes. Enfin, par un meilleur contrôle des maladies et de la nutrition hydrominérale, la culture sous abri favorise l'obtention de rendements supérieurs aux cultures de plein champ et de fruits de meilleure présentation et donc plus faciles à valoriser. Elle autorise donc une production accrue, sur des surfaces moindres.

Cependant, si la culture sous abri peut résoudre les problèmes spécifiques occasionnés par des pluies intenses, la technique est à l'origine d'autres contraintes qui peuvent être climatiques, parasitaires ou nutritionnelle.

Contraintes climatiques

L'effet de serre engendré par l'utilisation d'un abri a tendance à augmenter au niveau des plantes protégées les températures déjà très élevées. Parallèlement, le rayonnement qui atteint ces cultures est réduit par le matériau de couverture, du film plastique le plus souvent. Il y a donc un

déséquilibre entre une respiration accrue due à de fortes températures et une photosynthèse limitée du fait d'un rayonnement solaire moyen. Le métabolisme des cultures ne peut donc plus fonctionner normalement.

Également lié au climat, il y a le risque d'ouragan; la structure des abris devra donc être conçue en tenant compte de tous les risques climatiques qui peuvent apparaître de la nature.

Contraintes parasitaires

Alors que l'absence de pluies sous les abris permet de réduire l'impact de nombreuses maladies fongiques et bactériennes sur les cultures légumières, les insectes et les acariens vont trouver dans cet environnement un milieu plus favorable à leur développement. Pour rentabiliser une culture sous abri, il faudra donc être en mesure de contrôler ces ravageurs.

Contraintes nutritionnelles

Pour un agriculteur, l'investissement que représente la réalisation d'un abri est relativement important. Pour rentabiliser cette installation, l'agriculteur devra effectuer sous cet abri une culture intensive ; cela suppose qu'il saura y maintenir une bonne fertilité du sol, qu'elle soit chimique, physique ou biologique.

Espèces à cultiver sous abri

Les principales espèces maraîchères peuvent être cultivées sous abri tout au long de l'année sont la tomate, la laitue, le poivron, la courgette, les haricots et les condiments dont les oignons.

D'autres espèces telles que les carottes et les oignons-bulbes ont aussi un bon comportement sous abri.

Le melon du type « Cantaloup charentais » peut-être cultivé sous abri en période pluvieuse donc à contre saison par rapport à la technique classique de culture en plein champ dans les zones à fort ensoleillement.

La cristophine peut être cultivée sous abri dans les zones fraîches, cette technique permettant d'éliminer la multiplication du champignon *Mycosphaerella* qui provoque la maladie de la pourriture noire.

Quelques espèces, comme l'aubergine, le chou, la pastèque ou le piment, résistent bien aux agressions de la pluie, leur culture sous abri n'est donc pas justifiée.

2. La plante

La lumière, le gaz carbonique, l'eau, la température ainsi que les mouvements de l'air qui intervient lors de l'aération sont nécessaire à la plante. Ces éléments sont des facteurs qui jouent un rôle principal interviennent dans la vie biologique de la plante. Parmi les activités biologiques nous citons :

2.1. La photosynthèse

Ce phénomène se déroule dans la lumière. Il est considéré comme la base de la vie dans la planète. Non seulement la plante absorbe du CO₂ et dégage du O₂ qui représente l'essence pour toute être vivant pour respirer mais aussi nous avons la synthèse de la matière d'aïd qui représente le premier épisode dans la chaîne vitale parce que toute être vivant se nourrit sur la plante et sans la plante cette chaîne est brisée.

La photosynthèse est le phénomène de base qui permet à la plante de vivre et de croître. En présence de lumière, la plante absorbe du gaz carbonique (CO₂) et de l'eau (H₂O). À partir de ces ingrédients, elle fabrique des sucres qu'elle met en réserve sous forme d'amidon (ATP ou acide triphosphate) et qu'elle utilisera éventuellement comme source d'énergie.

La photosynthèse a se produit à environ 10 heures par jour, selon la durée d'ensoleillement.

Formule de la photosynthèse



2.2. La respiration

Pendant la respiration la plante absorbe O₂ pour oxyder la matière première (aïd cellulaire) en brulant ces réserves et en dégageant le CO₂ et H₂O. La respiration se déroule principalement pendant la nuit. Pour cela ; il est déconseillé de garder des plante avec nous dans la maison à nos cotés pendant que nous dormons la nuit car elle va aussi absorber l'oxygène environnant.

La respiration permet à la plante de récupérer l'énergie stockée dans les sucres. L'énergie est dépensée pour maintenir les tissus qui sont déjà en place, mais aussi pour accomplir la croissance. La respiration ne requiert pas de lumière et se produit donc 24 heures par jour.

Formule de la respiration



Comprendre les réactions des plantes selon les conditions offertes par un environnement permet au producteur de mieux adapter celui-ci, au besoin, dans le but d'obtenir un rendement et une qualité de plantes supérieurs.

2.3. La transpiration

La transpiration est le mode de refroidissement par excellence des feuilles. Presque toute l'eau puisée par les racines est éliminée par la transpiration. Une transpiration efficace est favorisée par un air ambiant sec et en mouvement.

Quand l'humidité relative est plus faible à l'extérieur de la feuille, l'eau de la plante peut facilement s'évaporer. Aussi, plus l'air est sec et plus il y a d'échanges gazeux entre la feuille et son environnement. Dans de telles conditions, la plante absorbe bien l'eau du sol avec ses nutriments.

Quand l'air est immobile, l'eau évaporée par les feuilles s'accumule autour de celles-ci. La plante transpire alors de moins en moins et son feuillage se réchauffe. Pour prévenir ce phénomène, on peut installer des ventilateurs horizontaux appelés HAF (Horizontal Airflow Fans). Ils créent un mouvement d'air dans la serre et libèrent les feuilles de l'humidité dégagée. Les HAF sont très abordables, mais encore trop peu utilisés par les serriculteurs.

Les facteurs de la température, lumière, humidité et teneur en gaz carbonique agissent simultanément et de façon dépendante.

Plusieurs travaux de recherche ont été réalisés dans le but de connaître les différentes influences de ces facteurs sur la plante d'une façon intrinsèque et extrinsèque malgré l'existence de plusieurs contraintes. Dans ce sens ; des chercheurs ont eu pas mal de résultats. Des résultats de recherches qui ont déroulé et pris énormément du temps pour être énoncés.

Dans ce qui suit nous allons éclairer une partie des travaux de quelques chercheurs et les résultats qu'ils ont déterminé.

Le tableau suivant classe les plantes maraichères en 4 catégories suivant les 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.

CHAPITRE I: La plante

Espèce légumière cultivée	Durée entre la semé et début de récolte (Jours)	Température de germination (°C)		Température pour la croissance (°C)		Température pour la floraison (°C)		Humidité relative (%)	Température critiques (°C)	
		Air	Sol	Air	Sol	Air	Sol		6 heures	5 heures
		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
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

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

D'après ce tableau on peut dire que les serres froides ne peuvent répondre aux besoins alimentaires et assurer un gain significatif. Même au pays de SAHEL ; le chauffage pendant la nuit est nécessaire pour réaliser des rendements de valeur. Pour cela il faut bien maîtriser et savoir comment contrôler le climat d'une serre pour améliorer largement le rendement.

3. Besoins de la plante

3.1. Besoin en lumière

Comme elle est la transformation de l'énergie du photon en matière première stockée dans les cellules, la photosynthèse est un phénomène qui exige la présence de la lumière pour qu'elle soit réalisée au niveau de la plante.

Dans les serres ; l'éclairage est assuré principalement par le soleil ou le ciel ou aussi par les méthodes artificielles (diode).

De point de vue spectral on distingue :

- l'éclairage énergétique couvrant le domaine de longueurs d'onde pour lequel le vitrage transmet le flux énergétique incident.
- l'éclairage lumineux limité au domaine visible (380 nm à 760 nm).
- l'éclairage spécifique utilisé par la plante obtenu à partir de l'éclairage énergétique par pondération selon l'efficacité relative spectrale d'utilisation de la plante.

Les relations entre ces trois types d'éclairage découlent des équations de définition:

- éclairage énergétique

$$E_{\tau} = \Phi_{\tau} / S \quad [W / m^2]$$

- éclairage lumineux

$$E_{\nu} = \Phi_{\nu} / S \quad [lm / m^2 \text{ ou lx}]$$

- éclairage spécifique utilisé

$$E_a = \Phi_a / S \quad [W / m^2]$$

Avec : Φ_{τ} , Φ_{ν} , Φ_a signifie les flux respectivement : énergétique, lumineux et spécifique qui sont utilisés par la plante.

S : signifie la surface à l'intérieure de la serre.

***- Lumière sur éclairage**

On mesure l'intensité de la lumière en piedschandelles (pc) à l'aide d'un photomètre. En hiver, une augmentation de l'éclairage de 300 à 600 pc favorise la photosynthèse. Lorsqu'on utilise de l'éclairage artificiel, il est important de choisir l'équipement qui fournit la bonne qualité spectrale (bleu et rouge). Les lampes à haute pression au sodium sont un exemple de sources de lumière efficaces en serre.

Lorsqu'on utilise de l'éclairage supplémentaire en serre en période hivernale, il faut s'assurer que le niveau de CO₂ disponible est adéquat.

L'apport de lumière stimule la photosynthèse, qui requiert du CO₂ pour la fabrication de sucre. Cependant, en hiver, on ouvre peu les serres et l'entrée d'air de l'extérieur, riche en CO₂, est limitée. S'il n'y a pas suffisamment de CO₂ pour répondre à la demande, une partie de l'investissement en éclairage sera perdue.

Pour remédier au problème, les producteurs peuvent utiliser des sources de gaz carbonique, telles que des brûleurs au propane ou encore du CO₂ liquide injecté sous forme gazeuse dans la serre.

3.2. Besoins en eau (goutte à goutte)

L'eau assure l'équilibre des plantes. Il est principalement nécessaire pendant la période de la croissance.

A l'intérieur de la serre et en raison de l'effet serre ; les plantes risquent de la sécheresse plus qu'ailleurs. Pour cela humidité jouent un rôle important dans l'équilibre de la culture. Des systèmes de brumisation et d'irrigation sont indispensables dans la serre pour assurer l'équilibre des espèces cultivées.

La goutte à goutte est un système d'irrigation très répandus pour les avantages qu'il présente. Parmi ses avantages on note :

- l'économie d'environ 30% d'eau d'irrigation.
- Flexibilité de l'utilisation.
- Réduction de nombre de travailleurs (cet avantage peu être noté inconvénient aussi).
- L'automatisation du système.
- L'économie du temps du travail sur l'application des produits phytosanitaire.
- La possibilité de l'utilisation quotidienne de ce système permet d'éliminer le stress hydrique des plantes causé par l'irrigation à la main.
- La réduction des produits chimiques mise directement dans l'eau

Dans une surface peu importante, ou bien pour une activité d'agriculture familiale le système de goutte à goutte à la main est souvent utilisé.

Pour des surfaces importantes où on a intérêt à faire de grands investissements ; on peut utiliser le système de goutte à goutte contrôlé à programmeur. Le programmeur effectue des mesures sur l'eau (pH, salinité, concentration de fertilisants) et adapte les produits à appliquer en fonction des résultats.

Ce système prend peu de temps par rapport à celui à la main mais la différence en rendement est assez importante.

3.2.1. Détermination des besoins en eau

- L'influence du climat

Les plantes extraient l'eau du sol par leurs racines. La plus grande partie de cette eau ne reste pas dans la plante, mais elle est restituée dans l'atmosphère par les feuilles et les tiges. C'est ce qu'on appelle le processus de la transpiration.

Le sol sous l'effet de la chaleur évapore l'eau qu'il contient. C'est l'évaporation. L'évapotranspiration d'une culture est l'ensemble de l'eau utilisée par la plante pour la transpiration et par le sol pour l'évaporation.

Le climat (la température, le vent, l'humidité de l'air, l'ensoleillement) est à l'origine d'une demande en eau potentielle, appelée Evapo-Transpiration Potentielle (ETP), exprimée en mm. Cette ETP varie selon les conditions climatiques; elle sera différente selon : la saison (été ou hiver), la localisation (Ouest ou Est) et l'altitude (littoral ou montagne). Plus la plante est située dans une zone où l'ETP est importante, plus elle devra restituer de l'eau à l'atmosphère.

- Connaître les besoins de la plante

La consommation en eau de la plante dépend principalement de son âge (stade végétatif) et de sa variété. Ces paramètres définissent pour chaque plante un coefficient cultural (Kc). Ce coefficient caractérise la croissance de la plante au cours de son cycle végétatif. Il est de 0.2 en début de culture pour la canne à sucre et évolue quotidiennement pour atteindre la valeur maximale de 1. Il varie différemment selon l'altitude et la date de début de culture.

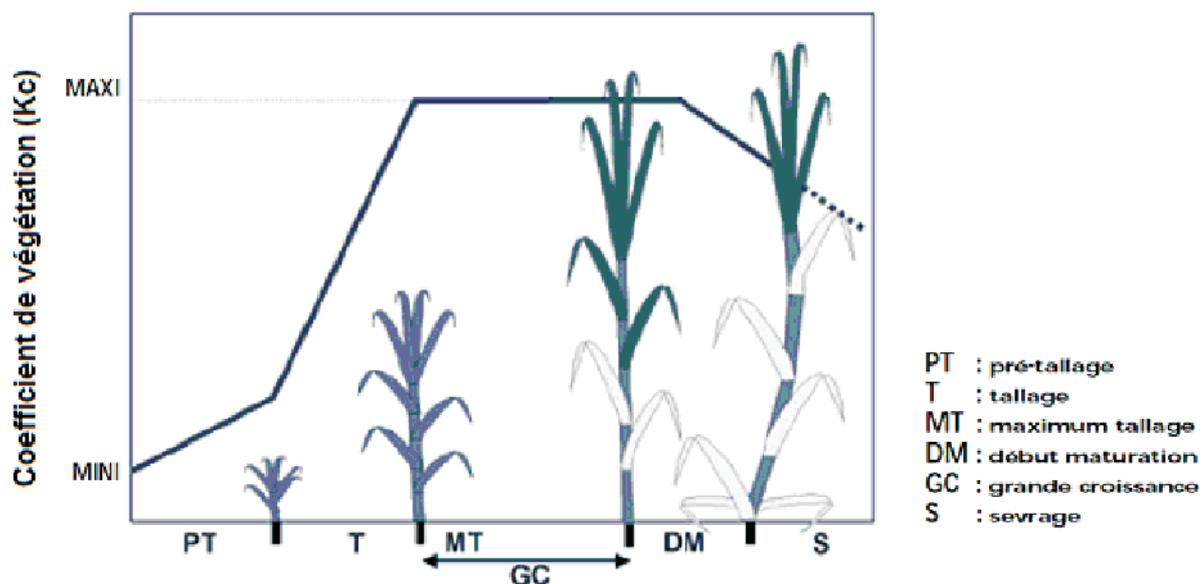


Fig. I.1 évolution du coefficient cultural

La quantité d'eau maximale dont la culture a besoin pour une croissance optimale est définie par le produit de l'ETP et du Kc. Ce besoin est appelé l'Evapo Transpiration Maximale (ETM) exprimé en mm tel que:

$$ETM = Kc * ETP.$$

- Kc : Coefficients caractérisant les différents stades végétatifs de la plante.

- ETP (Evapo Transpiration Potentielle) : demande en eau du climat.

La plante ne dispose pas toujours suffisamment d'eau pour faire face à ses besoins. Dans ce cas, la plante est incapable de fournir toute l'eau qui lui est demandé. Elle diminue alors son activité et de ce fait, sa croissance. L'activité de transpiration de la plante est alors limitée à ce que l'on appelle l'EvapoTranspiration Réelle (ETR), exprimée en mm.

$ETR = ETM$ s'il y a suffisamment d'eau disponible (croissance optimale).

$ETR < ETM$ en cas de manque d'eau (croissance réduite).

3.3. Besoins des plantes en éléments minéraux et organiques

3.3.1. La composition des végétaux

Une plante est un organisme vivant qui se développe grâce à un apport permanent :

- d'énergie, due au rayonnement solaire ;
- de matière, fournie par le sol et l'atmosphère.

CHAPITRE I: La plante

Les plantes contiennent des proportions variables d'eau. Celle-ci peut constituer jusqu'à 90 % de leur masse. Le reste est appelé matière sèche. L'analyse de la matière sèche montre qu'elle est formée :

- *de macroéléments* : présents en grandes quantités (carbone, oxygène, hydrogène, azote, potassium, calcium, phosphore, magnésium et soufre) qui représentent près de 99 % de sa masse
- *d'oligo-éléments* présents à l'état de traces, mais indispensables à la croissance des végétaux. Les principaux sont le bore, le cuivre, le zinc, le fer, le manganèse, le molybdène et le chlore.

3.3.2. L'origine et le rôle des différents éléments

Au cours de sa croissance, la plante absorbe les éléments que nous venons de citer en les puisant soit dans le sol, soit dans l'atmosphère.

Les éléments carbone C, hydrogène H et oxygène O :

Ils constituent les matériaux de base des végétaux et sont assimilés au cours de la synthèse chlorophyllienne des glucides. Cette synthèse est une réaction chimique réalisée par les plantes à partir du dioxyde de carbone contenu dans l'atmosphère et de l'eau présente dans le sol.

L'élément azote N

L'élément azote est fondamental pour la matière vivante, végétale ou animale. Il entre dans la composition des protéines, de la chlorophylle, de l'ADN, ...etc. Il joue donc un rôle essentiel dans la croissance des plantes.

La plupart des végétaux ne sont pas capables d'assimiler l'azote contenu dans l'atmosphère.

En revanche, les plantes prélèvent et utilisent les ions nitrate NO_3^- présents dans le sol.

Les ions ammonium NH_4^+ doivent être transformés en ions nitrate par des bactéries afin de devenir absorbables par les végétaux.

L'élément phosphore P

Il joue un rôle très important dans la nature : chez les végétaux, il contrôle les échanges d'énergie, favorise la croissance, la reproduction, ... etc.

Les plantes l'absorbent sous forme d'ions phosphate PO_4^{3-} . Ces ions proviennent du très lent lessivage de roches contenant du phosphate de calcium $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ et ne sont présents qu'en faible quantité dans les sols.

L'élément potassium K

L'élément potassium est présent dans tous les organismes vivants sous forme d'ions K^+ .

Il est indispensable à la synthèse chlorophyllienne. Il contrôle les échanges d'eau entre la plante et l'atmosphère, et les aide donc à lutter contre la sécheresse.

L'élément soufre S

Il est nécessaire à la synthèse des protéines et intervient dans la composition de certaines vitamines. Les plantes en ont un besoin variable : certaines, comme le colza, le soja, les poireaux, ...etc. sont de grosses consommatrices de soufre qu'elles absorbent sous forme d'ions sulfate SO_4^{2-} présents dans le sol.

Les éléments calcium Ca et magnésium Mg

L'élément calcium, assimilé sous forme d'ions Ca^{2+} , est nécessaire au développement de la plante. Ces ions sont présents en quantité importante dans la plupart des sols calcaires.

L'élément magnésium, assimilé sous la forme d'ions magnésium Mg^{2+} , est indispensable à la production de la chlorophylle.

Les oligo-éléments

Les plantes ont besoin d'oligo-éléments en quantités très faibles, mais précises. En effet, excès et défaut sont également nuisibles à la plante.

3.3.3. L'utilité des engrais

De nombreux sols manquent naturellement d'un ou plusieurs éléments nutritifs et nécessitent, avant toute culture, un apport correctif : c'est la fertilisation dite de redressement (souvent réalisée dans le cas du phosphore). Elle est indispensable puisque c'est l'élément nutritif en défaut dans le sol qui limite le rendement d'une récolte.

Les engrais azotés

Ils apportent sous différentes formes l'élément azote N nécessaire aux cultures :

- Les engrais nitriques, comme le nitrate de sodium NaNO_3 et le nitrate de calcium $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, contiennent l'azote sous la forme d'ions nitrate NO_3^- directement assimilables par les plantes. Ces engrais ont donc une action très rapide sur les cultures.

- Les engrais ammoniacaux, comme le sulfate d'ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ qui est particulièrement intéressant pour les cultures exigeantes en soufre, le chlorure d'ammonium NH_4Cl , ...etc. contiennent l'azote sous forme d'ions ammonium NH_4^+ .

Ces ions sont fixés par la terre, puis lentement transformés en ions nitrate avant d'être assimilés par les plantes. Ces engrais ont donc une action lente et durable.

- Les engrais ammoniaco-nitriques sont constitués de nitrate d'ammonium NH_4NO_3 et commercialement appelés ammonitrate. Ils permettent une fertilisation rapide (action des ions nitrate) et durable (effet à long terme des ions ammonium).

Les engrais phosphatés

Ils apportent l'élément phosphore P nécessaire aux cultures, principalement sous forme d'ions phosphatés (PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^-).

Les gisements de phosphate sont essentiellement constitués de phosphate de calcium $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. Ces phosphates naturels, peu solubles dans l'eau, doivent être souvent transformés en composés plus solubles, assimilables par les plantes.

Les engrais potassiques

Ils apportent l'élément potassium K sous forme d'ions potassium K^+ .

La matière première des engrais potassiques est la sylvinite. C'est un minerai principalement constitué de chlorure de potassium KCl et de chlorure de sodium NaCl .

3.4. Humidité relative

Les recherches ont déterminé que le meilleur taux d'humidité pour les plantes est de 75% et s'est le taux optimal. Pour une HR trop élevée couplée à une température aussi élevée la végétation sera luxuriante et avec allongement des entre nœuds ainsi un développement des maladies aura lieu dans la serre pour cela une aération matinale réduit la HR et élimine les gouttelettes d'eau de condensation sur les parois. En période de production, l'HR diurne reste généralement proche de l'optimum.

Le contenu en vapeur d'eau de l'air dans une serre est déterminé par divers procédés, dont la transpiration des cultures, la condensation, l'évaporation et la ventilation sont les facteurs les plus importants. L'humidité relative élevée, la vapeur d'eau libre sur la surface des plantes et le climat frais sont considérés comme les facteurs les plus importants de l'environnement qui favorisent l'infection par *B_cinerea*, mais les rapports sur les effets de l'humidité et la durée d'humectation des feuilles, séparément ou en combinaison, sont contradictoires.

En général, l'humidité est l'un des facteurs du milieu qu'il faut garder en équilibre parfait pour obtenir une culture valable en serre. L'influence de l'humidité sur le milieu complexe de la serre est moins connue que celle des autres facteurs en raison sans doute des difficultés de mesure et de contrôle. L'air de la serre s'enrichit de la vapeur d'eau provenant du sol et de la transpiration des plantes.

La nuit, l'évapotranspiration est relativement faible car la fermeture des stomates limite la transpiration et l'évaporation du sol. Elle est aussi, assez réduite à cause des possibilités

d'évaporation thermique; mais comme la température s'abaisse dans l'abri et comme l'humidité relative (HR) varie en fonction inverse de la température, pour un contenu absolu en eau de l'air, l'HR augmente et peut atteindre des valeurs très élevées.

Au cours de la journée, lorsque le rayonnement solaire fait augmenter la température, l'humidité de l'air à l'intérieur de la serre augmente avec l'apparition du soleil car l'ouverture des stomates accroît la transpiration mais en même temps l'HR de l'air peut diminuer (avec élévation de la température) à tel point que dans certains cas elle peut tomber à des valeurs faibles, surtout dès que la serre commence à être ventilée.

On peut dire que la végétation influence l'humidité de l'air par son pouvoir évaporant; une culture de tomates peut évaporer, dans les « meilleures » conditions, jusqu'à 15 g d'eau par m³ de serre et par minute, soit environ 1 l/m³/h.

Il est utile d'envisager les points suivants consacré à l'humidité dans les serres:

1. Définitions et relations concernant l'humidité;
2. Influence de l'humidité au niveau de la serre;
3. Maîtrise de l'humidité.

C'est grâce à sa transpiration que la plante transfère les éléments nutritifs qu'elle a absorbés, qu'elle règle sa température et qu'elle contrôle sa croissance.

La transpiration des plantes dépend du déficit de pression de vapeur entre les stomates et l'air. On peut dire que;

- des niveaux trop élevés ou trop faibles de déficits de saturation exercent une influence défavorable sur la physiologie de la plante et sa croissance;
- *)- lorsque l'humidité de l'air est trop élevée, les échanges gazeux sont réduits, et partant la transpiration des plantes; l'absorption des sels nutritifs est donc perturbée;
- *)- lorsque l'humidité de l'air est trop faible, les stomates se ferment, ce qui réduit ou annule la photosynthèse.
- une forte humidité peut également provoquer des difficultés de pollinisation car le pollen, humide, ne peut sortir des anthères;
- l'humidité de l'air dans l'ambiance des plantes exerce une action sur le développement des maladies de celles-ci;
- si la température de la plante s'abaisse sous le point de rosée de l'air ambiant, on observe des condensations sur le végétal, ce qui favorise le développement de certaines mycoses.

3.4.1 Définition et expression de l'humidité

L'air humide est un mélange de vapeur d'eau et d'air sec.

On utilise les expressions suivantes pour caractériser le contenu en vapeur d'eau de l'air:

-Humidité relative (HR) : $(HR) = \frac{\text{tension actuelle de vapeur}}{\text{tension saturante}} \quad [\%]$

L'HR est donc définie comme le rapport de la tension actuelle de vapeur d'eau et de la valeur que cette tension atteindrait si tout l'espace envisagé était occupé par la vapeur dans des conditions de saturation. Elle est exprimée en %.

L'HR est la caractéristique de l'air la plus communément citée parce qu'elle est aisée à mesurer; cependant elle n'a de signification que lorsqu'elle est associée à la température à laquelle elle a été déterminée.

- Humidité absolue : $\text{Humidité absolue} = \frac{\text{masse de vapeur d'eau}}{\text{volume}} \quad [\text{kg}/\text{m}^3]$

L'humidité absolue est le poids de vapeur d'eau dans un volume donné d'air; elle s'exprime en kg de vapeur d'eau par m³ d'air sec.

CHAPITRE I: La plante

Remarque

L'humidité relative et l'humidité absolue dépendent de la température de l'air et varient avec celle-ci. (À 15°C, un m³ d'air peut contenir 13 g d'eau et à 35°C, il peut en contenir 39 g).

- Contenu en eau : $Contenu\ en\ eau = \frac{masse\ de\ vapeur\ d'eau}{masse\ de\ l'air\ sec} [g/kg]$

Le contenu en eau est une donnée indépendante de la température.

- Le déficit de pression de vapeur (DPV) : est la différence entre la pression de vapeur saturante et la pression de vapeur dans la masse d'air considérée.

DVP = pression de vapeur saturante - pression de vapeur dans la masse d'air considéré.

C'est à ce déficit de pression de vapeur que réagit la plante.

- Une expression similaire est la différence de contenu en eau de l'air:

Différence de contenu en eau = contenu à saturation - contenu réel.

Remarque

Il faut noter que, pour une même température, le déficit de pression de vapeur varie avec l'humidité de l'air.

Température	Humidité relative HR (%)	Pression de vapeur PV (mm Hg)	Déficit de pression de vapeur DPV (Hg mm).
20°C	100	17.55	0
	80	14.04	3.51
	60	10.53	7.02
	40	7.02	10.53
	20	3.51	14.04

Tableau 1.2 Humidité relative (HR), pression de vapeur (PV) et déficit de pression de vapeur (DPV) à 20°C.

À 20°C et 60 % HR, la capacité d'évaporation sera deux fois plus rapide qu'à 20°C et 80 % HR (DPV : 7,02 et 3,51 mm Hg).

D'un autre côté, pour une HR de 60 %, le DPV est de 7,02 mm Hg à 20°C et de 12,74 mm Hg à 30°C: la vitesse d'évaporation sera donc près de deux fois aussi élevée pour une même HR (60 %) à 30°C qu'à 20°C.

De même, si la température de l'air est 20°C et son HR 60%, son DPV est de 7,02 mm Hg; si la température de l'air est portée à 30°C (sans que son humidité absolue ne soit changée), le DPV passe de 7,02 à 21,32 mm Hg: la vitesse d'évaporation est triplée.

- La température du point de rosée est celle qui provoque la condensation. La différence entre la température du point de rosée et la température actuelle de l'air est la différence de point de rosée. Plus celle-ci est élevée, plus faible est le danger de condensation d'eau (sur les plantes).

Il convient d'étudier comment l'humidité relative de la serre varie en fonction des autres facteurs du climat.

Si la masse d'air dans la serre est maintenue à une température supérieure à la température de la surface du matériau de couverture, l'humidité relative n'arrivera pas à saturation. Le graphique psychrométrique de la figure I.2 illustre parfaitement ce phénomène: on fait descendre la température d'une masse d'air (a) contenant 80 % d'humidité relative de 21,1°C à 10°C (b'). En dessous de 17,5°C (b), une déshumidification se produit. Si cette même masse d'air est ensuite ramenée à 21,1°C sans adjonction d'humidité, l'HR n'atteint plus que 49 % (c).

Si l'air humide de la serre en contact immédiat avec une surface froide tombe en-dessous de la température du point de rosée de l'air, il y a apparition de condensation. Il va de soi que la condensation s'effectuera en premier lieu sur la surface la plus froide; celle-ci est le plus souvent le matériau plastique de couverture et ce, même pendant le jour, si la serre est fermée et si la

température extérieure est inférieure à la température dans la serre. En conséquence, la surface plastique étant d'une importance, on observe une déshumidification de l'air de l'abri. Pratiquement, le fait que la serre soit couverte de plastique plutôt que de verre n'a aucune incidence sur l'humidité relative pour autant que l'aération soit suffisante. La seule différence est que la condensation a lieu sous forme de gouttelettes d'eau sur le plastique et sous forme de film d'eau sous le verre. Ce taux d'humidité élevé sous forme de gouttelettes apparaît d'ailleurs comme un inconvénient majeur, restreignant l'usage des serres en plastique.

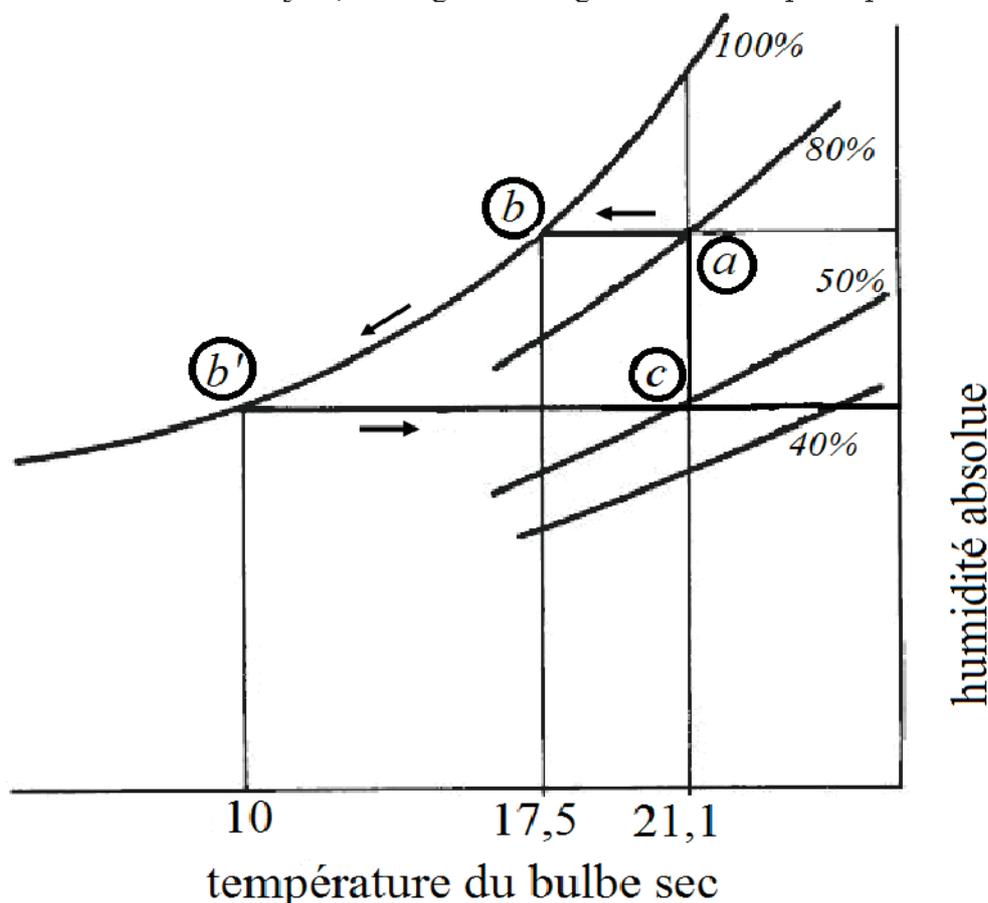


Fig. I.2 Illustration schématique psychrométrique du processus de déshumidification par refroidissement puis réchauffage subséquent.

3.4.2. Contrôle de l'humidité

Le principal facteur de régulation de l'humidité dans une serre non chauffée, par temps froid, est la condensation qui se forme sur les surfaces internes froides. Si on n'ajoute pas d'humidité à la masse d'air (au cours des nuits froides), la condensation provoque un abaissement de l'humidité absolue. Si la masse d'air est maintenue à une température déterminée supérieure à la température de la surface, l'humidité relative n'atteindra pas le point de saturation (voir fig. I.2). Selon des expériences menées aux Etats Unis, l'humidité dans une serre est normalement inférieure à 90 % par température froide étant donné les possibilités de condensation sur les vitres froides. Il s'agit naturellement de voir si ces résultats sont valables en Méditerranée. Il est fréquent que la condensation se forme également sur les plantes, provoquant des infections et la propagation des maladies.

Dans les serres chauffées, on peut éviter ces inconvénients comme suit:

- élever la température de l'air et celle des plantes;
- mieux distribuer la chaleur entre les plantes;
- utiliser des écrans thermiques;

- préférer les systèmes d'irrigation économes en eau.

Dans les serres non chauffées, on peut réduire la condensation sur les plantes et le matériau de couverture de la serre de la façon suivante :

- pour élever la température des plantes, il faut utiliser un matériau de couverture de la serre avec une plus faible transmission dans l'IR long ou employer une couverture double paroi;
- pour réduire l'humidité absolue de l'air, il est possible de placer un mulch plastique et de faire appel à l'irrigation localisée (à préférer à l'irrigation à la raie);
- pour éviter les condensations sur les plantes, on peut couvrir la serre d'une double paroi ou d'une simple paroi traitée au moyen d'un produit « antibuée »;
- pour réduire les zones de la serre où l'air humide s'accumule et stagne, on peut défolier la base des plantes (tomates) pour faciliter la circulation de l'air et chauffer l'air qui baigne le pied des plantes (chauffage à l'air chaud par gaine perforée);
- pour maintenir un échange d'air permanent entre l'air intérieur humide et l'air extérieur plus sec, et de ce fait réduire l'humidité dans la serre, on peut ventiler la nuit même si, par ce fait même, on perd de la chaleur par suite du remplacement de l'air chaud et de l'évaporation d'eau.

Par temps chaud, le problème de l'humidité est triple:

1. taux d'humidité élevé la nuit, en l'absence de chauffage solaire et lorsque la température externe est proche de la température interne souhaitée ou même supérieure à celle-ci;
2. taux d'humidité élevé lorsque le soleil chauffe sans pour autant justifier l'ouverture des ventelles d'aération;
3. taux d'humidité peu élevé lorsque le soleil chauffe et que l'aération est nécessaire.

L'humidité relative tend à atteindre le niveau de saturation lorsque la température de l'air extérieur se rapproche de celle de l'air à l'intérieur de la serre ou lui est supérieure et qu'il y a absence de possibilités de condensation. Dans ces conditions, le contrôle de l'humidité relative se fait par ventilation jusqu'à ce que l'humidité tombe en dessous du niveau nécessaire. Lorsque l'humidité relative de l'air extérieur est élevée, il convient de combiner ventilation et chauffage artificiel. On estime que par degré d'augmentation de la température de l'air résultant du chauffage de la serre, on enregistre une diminution d'environ 5% d'humidité relative.

Par temps chaud, l'humidité relative tombe souvent sous le niveau souhaité; les techniques suivantes permettent de la relever;

- Ombrage: toute diminution de la température de l'air s'accompagne d'une augmentation de l'humidité relative.
- Arrosage du sol, des plantes et du matériau de couverture: ce système offre un double avantage en ce sens qu'il augmente l'humidité tout en diminuant la température.
- Accentuation du mouvement de l'air l'intérieur de la serre fermée ; cette technique augmente l'évapotranspiration et relève la valeur de l'humidité relative.
- Utilisation du cooling system (pad & fan system): ceci permet à l'eau de s'évaporer et augmente l'humidité relative.
- Combustion de gaz afin de produire du CO₂ et par la même occasion de l'humidité.
- Brumisation d'eau: l'évaporation est source de refroidissement et d'augmentation de l'HR.

4. Influences sur la plante

Influence des facteurs et conditions du milieu

*- *Facteurs de croissance* Ils sont les éléments internes (liés à la plante) et externes (liés au milieu) qui interviennent dans la fabrication de la matière sèche ; ils ont une action quantitative donnant lieu à un bilan d'énergie et de matière :

- énergie solaire ;
- éléments minéraux ;
- eau ;
- température.

*- *Conditions de croissance* Les processus de fabrication de matière sèche, et donc l'utilisation des facteurs de croissance, peuvent se dérouler sous certaines conditions et être limités sous d'autres. Exemples :

- température suffisante permettant de déclencher les processus comme la germination, le développement foliaire et l'extension racinaire ;
- régulation thermique, conditions hydriques et ouverture stomatique ;
- aération autour des racines pour la diffusion de l'oxygène ;
- état structural permettant la croissance des racines ;
- forte concentration en sels entraînant la toxicité des plantes.

Ces conditions sont souvent en interaction ; leurs *lois d'action sont mal connues* et elles jouent fréquemment par des *effets seuils*. L'eau est à la fois facteur et condition de croissance. L'intérêt des études en **conditions contrôlées** pour déterminer les lois d'action des facteurs et conditions de croissance est évident, malgré les difficultés inhérentes au transfert des résultats au niveau du champ cultivé.

La plupart des plantes cultivées connaissent des phases sensibles et des stades critiques de croissance et de développement lorsque les états du milieu imposent des limitations à ces processus. Ces contraintes de milieu (stress hydrique, stress thermique, stress minéral, stress salin, etc.) peuvent entraîner des conséquences irréversibles et souvent dommageables pour le rendement.

4.1. Influence de la lumière sur la plante

La lumière est composée de radiations électromagnétiques. La longueur de ces ondes est exprimée en nanomètres (nm). Les couleurs perçues par les humains se situent entre 400 et 700 nm. Les plantes sont sensibles au même spectre de longueurs d'ondes pour accomplir la photosynthèse.

Elles absorbent le bleu (445 à 500 nm) et le rouge (620 à 700 nm), mais reflètent le vert (500 à 575 nm). C'est d'ailleurs pour cette raison qu'elles nous apparaissent vertes.

L'élongation des plantes est influencée par la qualité spectrale de la lumière. Le phytochrome est un pigment protéique qui intervient dans le déclenchement de l'élongation. Quand le rouge sombre (730 nm) domine, le phytochrome réagit et stimule l'élongation, voire l'étiollement des plants.

En production, lorsque les plants sont entassés les uns sur les autres, les feuilles situées en haut des autres captent les ondes bleues et rouges. Seules les ondes rouge sombre atteignent le feuillage caché. Comme elles dominent le spectre lumineux à cet endroit, le phytochrome envoie un signal d'élongation. C'est à ce moment que les plantes s'étiolent. Pour obtenir une production de qualité, il est donc préférable d'espacer les plants adéquatement.

Il est possible d'utiliser l'effet Q₁₀ pour améliorer la qualité de la production. Tôt le matin, le rouge sombre domine dans la lumière solaire. Cette période de la journée est particulièrement favorable à l'étiollement. En diminuant la température de la serre de 4 à 6°C, 30 minutes avant le lever du soleil, et en maintenant ces températures fraîches de deux à trois heures après le lever du soleil, on ralentit la croissance; il en résulte donc moins d'étiollement. On appelle DIP la méthode qui prescrit, tôt le matin, une baisse de température par rapport à celle du jour.

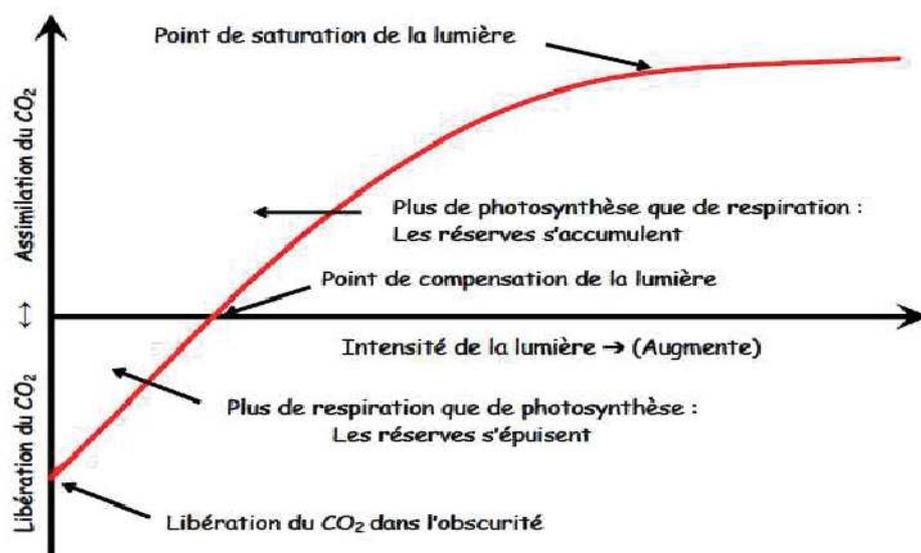


Fig. I.3 : échange du CO₂ en fonction de la lumière.

Le point de compensation

Une plante atteint son point de compensation lorsqu'elle ne produit que les sucres nécessaires pour se maintenir en vie. Pour croître et accumuler des réserves, la plante doit dépasser ce point. L'intensité lumineuse et la température maintenue durant la nuit sont les facteurs qui ont le plus d'impact sur la quantité de sucres accumulés après une journée.

Plus l'intensité lumineuse est élevée, plus la photosynthèse est active et plus la demande en CO₂ augmente. Toutefois, lorsque l'éclairage est très fort, les végétaux peuvent atteindre un point de saturation lumineuse. Ce seuil varie d'une espèce à autre. Les plantes produisent alors le maximum de photosynthèse qu'il leur est possible de produire. Dans de telles circonstances, il serait inutile, et même risqué, d'augmenter l'intensité lumineuse, car la plante n'a peut-être pas la capacité de supporter la chaleur engendrée par autant de lumière.

4.2. Influence de la température sur la plante

La température a effet sur la plante. Il se traduit par conséquent sur la photosynthèse, les réactions métabolique et aussi sur l'alimentation hydrique et minérale. Pour le climat de serre, ce qui compte le plus est la température pour transmettre la chaleur nécessaire à la plante car elle règle le rythme de la croissance et le développement.

Dans les serres la température est normalement mesurer de 1.20 m à 1.50 m sous sol. La différence entre la température sous sol et celle à la surface se traduit par un échange thermique par conduction. L'expression de cet échange est :

$$\Phi_{cond} = (T_1 - T_2) / (Z_1 - Z_2) \quad (\text{Valable pour les régimes permanent}).$$

Entre la surface et le sol il y a un déphasage d'onde thermique, la texture du sol, sa structure, humidité, ... etc. sont des caractéristiques qui influent sur cet échange.

4.2.1 Influence de la température sur la croissance des plantes

En biologie, de nombreuses réactions chimiques sont accélérées par une hausse de température. Lorsqu'on augmente la température de 10°C, la vitesse de la réaction double. À l'inverse, si la température baisse de 10°C, la réaction se produit en deux fois plus de temps. C'est ce qu'on appelle l'effet Q₁₀.

En serre, on peut observer l'influence de l'effet Q₁₀ quand la température des racines n'est pas la même que celle des feuilles. Prenons l'exemple d'une plante placée sur le sol dans une serre en février. Alors que son feuillage, exposé au soleil, atteint une température de 22°C, ses racines

sont soumises à une température de 10°C. Les feuilles travaillent donc deux fois plus vite que les racines.

Résultat: la plante flétrit et on observe de la brûlure sur les feuilles, car les racines, dont le fonctionnement est ralenti, ne parviennent pas à irriguer la partie aérienne. Le phénomène inverse pourrait se produire lorsque l'air ambiant est froid et que la plante est sur une table chauffante.

La coenzyme Q₁₀

La coenzyme Q₁₀ est une molécule liposoluble que aussi l'organisme humain est en mesure de synthétiser ; elle n'est donc pas classée dans les vitamines. La coenzyme Q₁₀ appartient à la famille des ubiquinones, dont le nom (du latin « ubiquus », qui signifie « partout ») fait référence à l'omniprésence de ces substances dans les organismes vivants. La coenzyme Q₁₀ nous est également fournie par l'alimentation.

La coenzyme Q₁₀ est essentiellement présente dans la mitochondrie, qui fait office de producteur d'énergie au niveau cellulaire. Par conséquent, les organes ayant les besoins énergétiques les plus importants, tels que le cœur et le foie, présentent les plus forts taux de coenzyme Q₁₀.

Production d'énergie

La Q₁₀ joue un rôle essentiel à l'intérieur des mitochondries, c'est-à-dire les parties des cellules responsables de la production d'énergie. Ce nutriment aide à protéger ces «centrales électriques» des dommages causés par les radicaux libres. À l'intérieur des mitochondries, le sucre (glucose) est « brûlé » de façon à libérer de l'énergie. La Q₁₀ aide à capturer cette énergie et à la transmettre aux cellules.

La Q₁₀ protège également les cellules et les matières grasses, y compris la vitamine E, contre les radicaux libres. Elle contribue également au recyclage de la vitamine E.

Que fait la coenzyme Q₁₀

Plusieurs fonctions de l'organisme dépendent d'une série de réactions chimiques que l'on regroupe sous le terme oxydation. Ces réactions donnent lieu à la production de molécules appelées radicaux libres. Les radicaux libres peuvent endommager l'organisme d'une façon qui rappelle l'effet de la rouille sur une voiture. Pour prévenir ces dommages, l'organisme a recours à des antioxydants telles les vitamines C et E ainsi qu'à la coenzyme Q₁₀. Par souci de concision, nous utiliserons l'abréviation Q₁₀.

4.2.2 Conséquences des températures

- basse température

Les basse températures peuvent donner naissance à un accident climatique connue sous le nom de « gelé ».

La vernalisation est un phénomène biologique due aux basses températures. C'est un traitement des grains qui provoque une floraison plus précoce des plantes.

- haute température

Des températures très élevées peuvent causer des pertes en rendement allant de 10% jusqu'à 80% car hausse de température cause des modifications biochimiques irréversibles se produisant dans la plante.

4.2.3 Influence de la température sur la vitesse moyenne de croissance

Plusieurs chercheurs ont été intéressés par la vitesse de croissance des plantes. LEHENBAUER est un chercheur qui voulait déterminer l'effet de la température sur la vitesse de croissance des plantes. Il a mesuré l'allongement des plantules de maïs à différentes température et il a déterminé le graphe suivant :

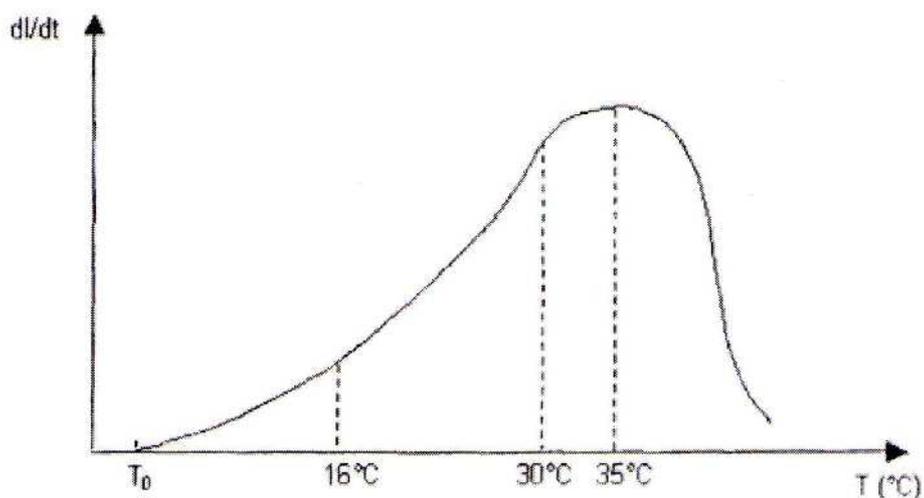


Fig. I.4 : courbe de la vitesse de croissance de plantules de maïs d'après LEHENBAUER.

D'autres chercheurs ont eu des résultats comparables de d'autres espèces mais peu différente. Après un départ exponentiel, la vitesse de croissance suit une fonction linéaire entre $16^{\circ}C$ et $30^{\circ}C$ pour décroître ensuite, la courbe est dissymétrique (Fig. I.4)

Le coefficient K_r qui est variable avec la température peut influencer sur la vitesse de la croissance pour 2 végétaux de la même espèce. Les résultats sont présentés dans les figures suivantes :

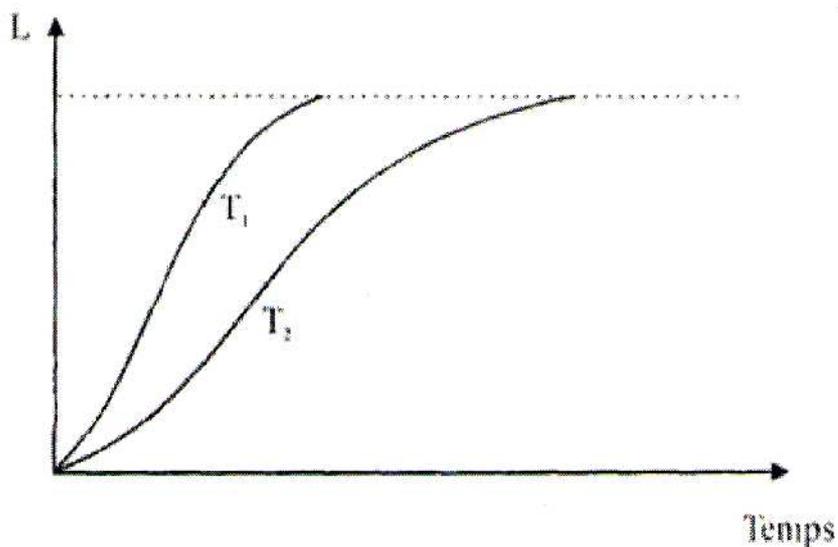


Fig. I.5 : Courbe d'allongement en fonction du temps pour T1 et T2.

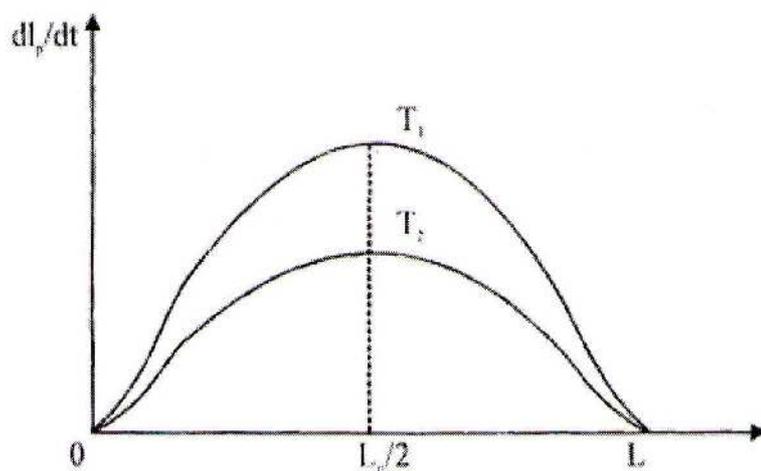


Fig. I.6 : vitesses de croissance en fonction de l'allongement pour T₁ et T₂

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 (Fig. I.5 et I.6).

Au niveau des laboratoires de l'INRA en France on a établie que la croissance doublait chaque fois que la température augmente de 10°C (la loi du Q_{10}).

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 : vitesse de la réaction chimique ou de développement.

$$Q_{10} = \frac{m_{T+10}}{m_T} = \frac{a.e^{b(T+10)}}{a.e^{bT}} = e^{10b} \quad \text{Où : } m_T = a(Q_{10})^{T/10}$$

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:

$$V_c = \frac{dl_p}{dt} = \frac{K_T \cdot l_p (L_p - l_p)}{L_p}$$

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

$$K_T = \frac{dl_p}{dt} \left(\frac{L_p}{l_p (L_p - l_p)} \right)$$

Les phases de développement d'une plante sont les modifications qui se succèdent lors de son évolution.

La vitesse de développement est la pente de la droite joignant les points relatifs à deux étapes de développement. La vitesse de développement a pour expression: $V = \frac{L_p - l_p}{t_2 - t_1}$

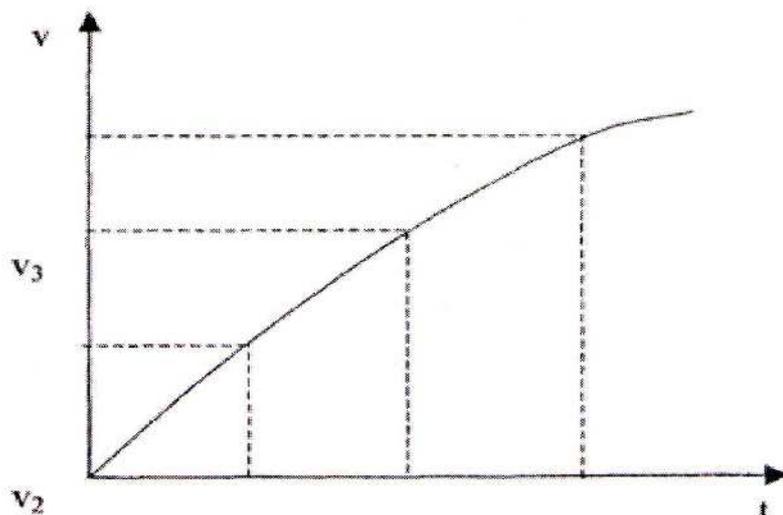


Fig. I.7 : courbe de la vitesse de développement.

4.3. Influence de l'humidité

Dans une serre ; il a été montré que la condensation réduit considérablement la transmission thermique de certains matériaux de couverture tels que le polyéthylène à cause de la réduction des déperditions de chaleur rayonnante. La diminution de transfert de chaleur rayonnant n'est pas totale car l'eau ne coule pas sur le film plastique de façon ininterrompue et il subsiste des zones sans condensation entre les gouttes. Des expériences ont montré que, par forte condensation, les gouttes couvrent 70 % de la surface, tandis que, par légère condensation, elles n'en couvrent que 25 %. La condensation est faible sinon nulle là où le mouvement d'air créé par un ventilateur est élevé.

Dans certaines conditions (nuits à ciel dégagé), la température de l'air à l'intérieur de la serre chute considérablement dès le coucher du soleil à cause des fortes déperditions de chaleur par radiation, et ce avant que la condensation ne se forme sur les matériaux de couverture. Un taux élevé de condensation peut être à l'origine d'un important transfert de chaleur vers les matériaux de couverture.

Lorsque l'humidité relative se rapproche du niveau de saturation, les feuilles sont davantage exposées aux maladies, tandis qu'en dessous de 75% HR, les risques d'infection sont minimes. Une expérience menée sur une culture de tomates a permis d'évaluer l'incidence du contrôle de l'humidité relative sur les maladies cryptogamiques.

Trois niveaux de contrôle ont été déterminés:

- (1) aucun contrôle de l'humidité relative ;
- (2) humidité relative maintenue à 90% ;
- (3) humidité relative maintenue à 75%.

En l'absence de tout contrôle, le *Cladosporium fulvum* a fait des ravages considérables; l'infection a été nettement moins importante lorsque l'humidité relative était maintenue à 90%, et pratiquement on n'a enregistré aucune maladie pour une humidité relative de 75%. L'incidence est sensiblement la même sur le *Botrytis cinerea*.

On a pu également observer que les tomates prennent une coloration anormale, se fendillent, se couvrent de taches et se pollinisent mal (nouent mal), notamment à cause d'un niveau d'humidité relative trop élevé.

Un taux d'humidité trop faible freine la fécondation des fleurs des tomates, du melon et des haricots par suite de l'avortement des fleurs et donne un goût amer au concombre.

Des expériences en phytotron ont montré que, si seul le facteur humidité varie, une atmosphère humide peut provoquer une augmentation considérable de l'efficacité de l'eau du sol mais peut entraîner également des modifications morphogénétiques. Une atmosphère humide réduit

également la surface foliaire ; les organes de stockage végétatif (organes de réserve) se forment plus tardivement ou pas du tout; la floraison et la fructification sont retardées; le feuillage vieillit plus rapidement et les stomates restent ouverts plus longtemps, permettant ainsi une diffusion continue de CO_2 .

5. Influences sur la photosynthèse

La photosynthèse est influencée par les facteurs de l'environnement : la lumière (source d'énergie), le CO_2 (source de carbone) et la température (qui affecte l'ensemble des réactions biochimiques).

La photosynthèse est un processus complexe faisant intervenir de nombreuses étapes qui sont affectées de manière différente par les facteurs de l'environnement.

De ce fait, les facteurs externes agissent indépendamment les uns des autres et le phénomène global obéit à la loi dite des "facteurs limitant" que l'on peut énoncer de la façon suivante : lorsqu'un processus est contrôlé par plusieurs facteurs agissant indépendamment, son intensité est limitée par le facteur qui présente la valeur minimum. Le facteur est alors limitant et la vitesse du processus est proportionnelle à la valeur de ce facteur.

5.1. Influence de la lumière (les valeurs d'intensité lumineuse)

Les valeurs d'intensité lumineuse sont les valeurs qui permettent une activité photosynthétique optimale.

La courbe suivante représente la photosynthèse nette des plantes éclairées avec une source lumineuse permettant de réaliser une gamme d'intensités (flux de photons) comprises entre 0 et 600 à 800 $\mu\text{mole} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})$. La photosynthèse nette est alors mesurée soit par le dégagement d'oxygène soit par la consommation de gaz carbonique.

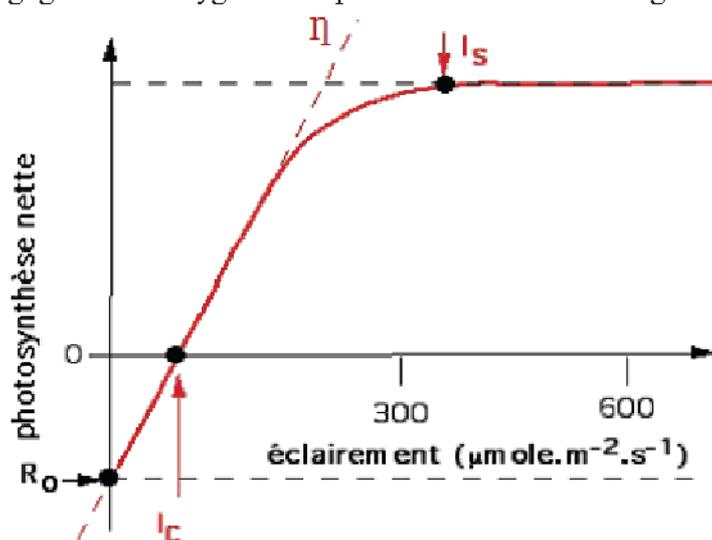


Fig. I.8. photosynthèse nette en fonction de l'éclairement.

Sur cette courbe on a aussi l'éclairement au point de compensation (I_c), l'éclairement saturant (I_s), la respiration à l'obscurité (R_0) et le rendement quantique (η)

1) partie linéaire de pente (coefficient directeur) équivalente à η dans cette gamme d'éclairement, la lumière est limitant et η mesure le rendement de l'absorption des photons (= rendement quantique foliaire).

2) un plateau obtenu pour des valeurs d'éclairement plus ou moins élevées (I_s = éclairement saturant ou optimal). Au delà, la capacité d'absorption des photons dépasse la capacité de leur utilisation. Les réactions d'assimilation du CO_2 deviennent limitant et la photosynthèse présente une intensité maximale.

3) Il existe une valeur de l'éclairement pour laquelle la Photosynthèse nette (P_n) est nulle : la photosynthèse compense juste la respiration. Cette valeur est point de compensation pour la lumière (I_c).

5.2. Comparaison de la photosynthèse de plantes de lumière et de plantes d'ombre

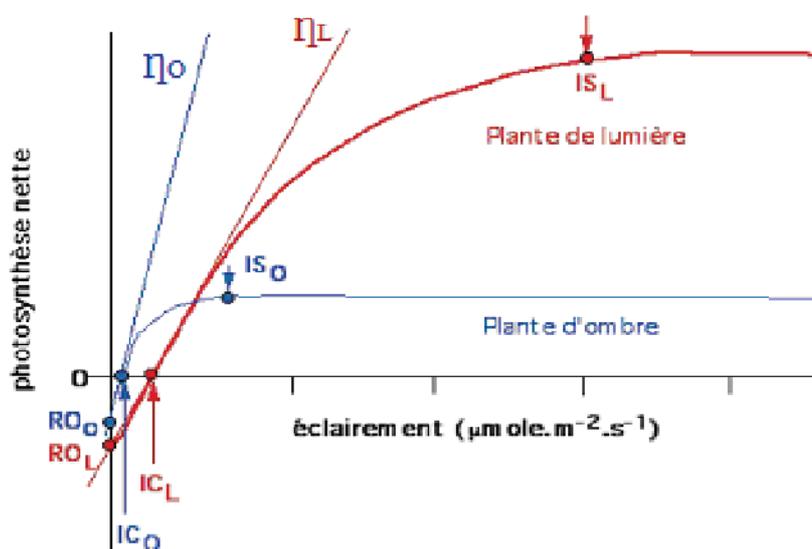


Fig. I.9 : Courbes de saturation de la photosynthèse en fonction de la densité du flux de photons chez une plante de lumière et une plante d'ombre.

Les autres facteurs (concentration en CO_2 atmosphérique, température 25°C) sont maintenus constants. I_c , intensité de compensation ; I_s , intensité saturante ; η , Rendement quantique foliaire. En bleu : plantes d'ombre; en rouge : plantes de lumière.

Quand on compare le comportement de ces deux types de plantes on constate que :

- I_{cO} (ombre) est inférieure à I_{cL} (lumière)
- η_O (ombre) est supérieure à η_L (lumière)
- I_{sO} (ombre) est inférieure à I_{sL} (lumière)

En d'autres termes, les plantes d'ombre présentent une intensité photosynthétique optimale et une intensité de compensation plus faible, mais une efficacité dans l'absorption des photons plus élevée (plantes des sous bois). Inversement, les plantes de lumière sont moins efficaces dans la capture des photons mais elles fixent l'intensité de la photosynthèse en fonction de chacune des réactions monochromatiques composant la lumière incidente.

- Timiriazeff (chercheur russe) réalisait un spectre d'action en éclairant des plantes avec une lumière décomposée par un prisme. Chaque plante était éclairée par une couleur précise.

- Engelmann (chercheur allemand) a réalisé les expériences (expérience d'Engelmann) même type que Timiriazeff au microscope en utilisant une algue filamenteuse éclairée par un spectre. Il utilise comme système de mesure biologique une bactérie, *Bactérium thermo*, avide d'oxygène, qui est dotée d'un chimiotactisme positif pour cette substance. Les bactéries se regroupent là où l'algue émet le plus d'oxygène, c'est à dire là où elle est éclairée par des radiations bleues ou rouges. Ces spectres ne tenaient pas compte du nombre de quanta de chaque radiation. Ils permettaient seulement une étude qualitative.

En effet pour que l'obtention d'un spectre d'action soit réellement quantitative, il faut le réaliser au moyen d'un illuminateur spectral permettant d'éclairer la plante avec des radiations de longueur d'onde comprises entre 400 et 700 nm. Il doit être réalisé dans des conditions isoquantiques et limitant pour chacune des radiations utilisées.

5.3. Comparaison entre le spectre d'action et d'absorption

Le spectre d'action de la lumière est comparé au spectre d'absorption du système photosynthétique devantage de CO₂ (ex : plantes cultivées).

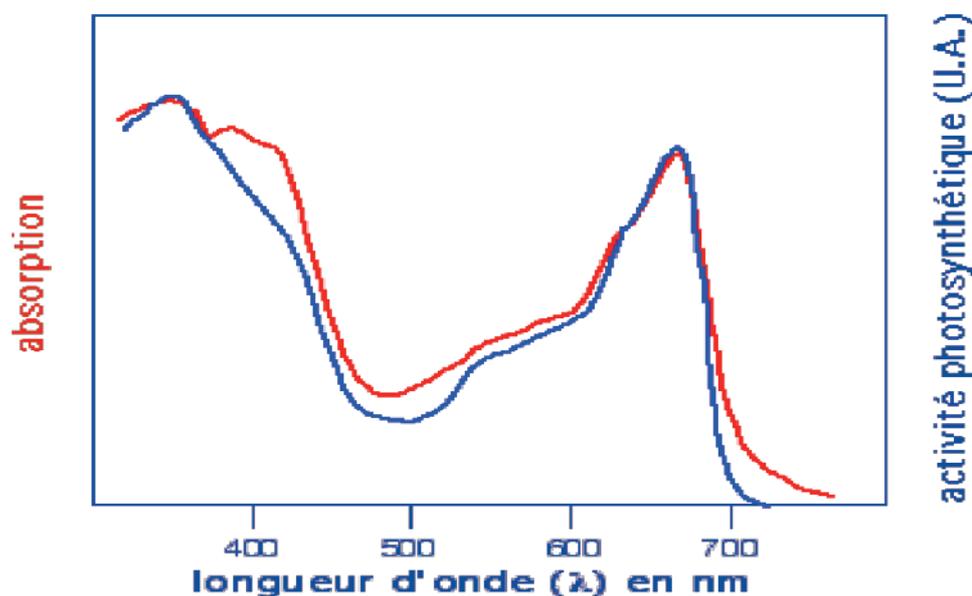


Fig. I.10. Comparaison entre le spectre d'absorption de pigments chlorophylliens et le spectre d'action de la lumière sur la photosynthèse d'une suspension d'algues unicellulaires.

- Absorption (courbe rouge) en % de l'absorption totale de la lumière incidente par des chlorelles
- Action (courbe bleue) : activité photosynthétique en unité arbitraire

Dans ces conditions, les deux spectres se superposent dans le bleu (vers 450 nm), s'écartent largement l'un de l'autre vers 460 nm (absorption des carotènes), vers 640 nm (absorption des chlorophylles) et chutent brutalement au delà de 680 nm.

Le dégagement d'O₂ est nul à 720 nm (il y a une "chute dans le rouge" de l'intensité photosynthétique).

La comparaison des deux spectres permet d'établir le rendement quantique du système photosynthétique étudié par chacune des radiations utilisées.

Le rendement quantique (η) est l'activité photosynthétique rapportée à la quantité de photons absorbés. Ce rapport entre l'intensité photosynthétique en $\mu\text{moles O}_2/\text{s}$ et la quantité de photons absorbée (= flux de photons en $\mu\text{mole}/\text{s}$) est reporté en fonction de la longueur d'onde de chaque radiation reçue par le système photosynthétique. On constate que les valeurs du rendement quantique sont proches pour les radiations bleues (η = environ 0,08) et rouges (η = environ 0,09). Il y a cependant une différence vers 480 nm et une chute drastique au delà de 680 nm.

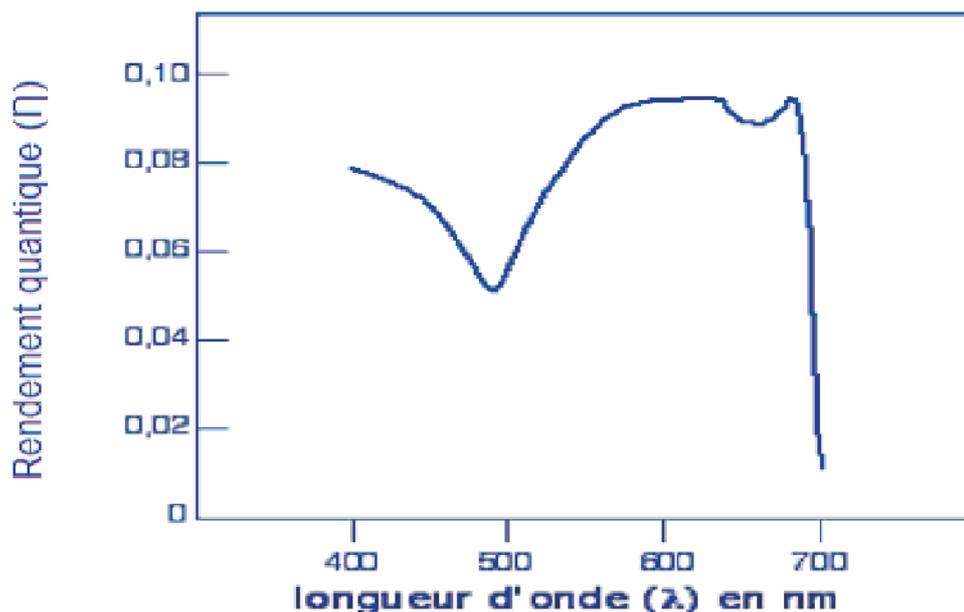


Fig. I.11 Rendement quantique d'un dégagement d'O₂ d'algues unicellulaires (chlorelles).

5.4. Influence de la concentration en CO₂

Les plantes aériennes assimilent le CO₂ atmosphérique (0,035% de CO₂) tandis que les plantes aquatiques absorbent soit le CO₂ dissous (concentration faible : environ 10 μ.mole à pH7), soit les ions bicarbonate HCO₃ (concentrations élevées : de l'ordre du m.mol, mais variable en fonction du pH), qui sont ensuite convertis en CO₂ grâce à la réaction catalysée par l'anhydrase carbonique.

La quantité de CO₂ disponible est limitant dans des conditions d'éclairement moyen. Par conséquent, une augmentation de la photosynthèse est observée lorsqu'on augmente la concentration de CO₂.

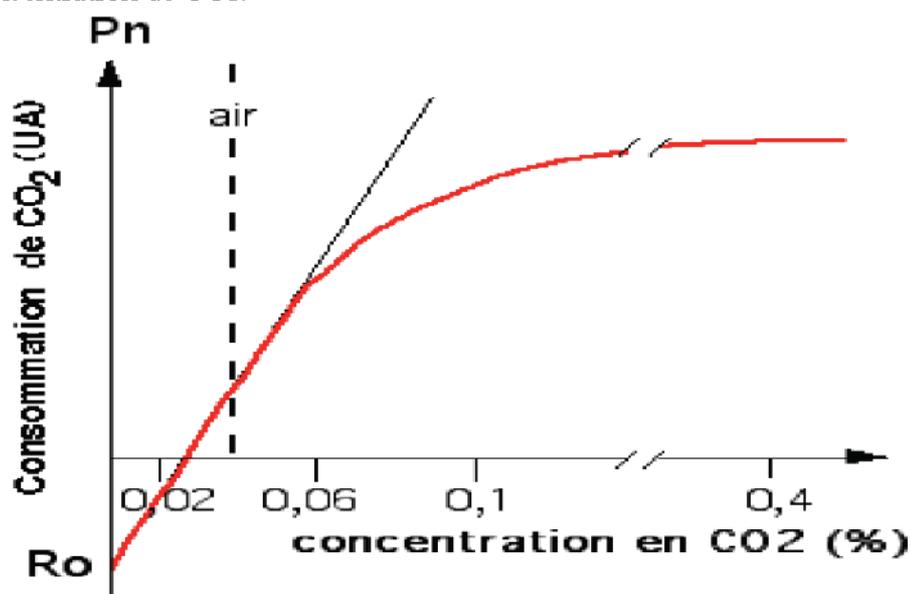


Fig. I.12 Influence de la concentration en CO₂ de l'air sur la consommation en CO₂ (photosynthèse) d'une plante verte.

La courbe (fig. I.12) présente une première partie pseudo linéaire pour laquelle le CO₂ est limitant, et une seconde partie qui correspond à un plateau pour lequel l'éclairement est devenu limitant et la photosynthèse maximum dans ces conditions.

Lorsque l'on refait cette expérience (photosynthèse en fonction de la concentration en CO₂), sous différents éclairagements :

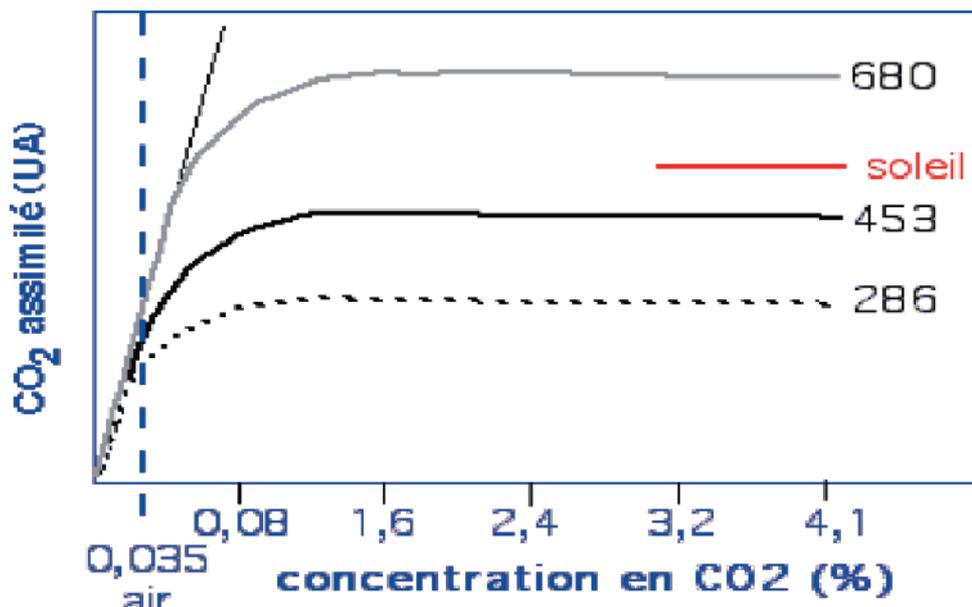


Fig. I.13. Effet de la concentration en CO₂ sur la photosynthèse d'algues (chlorelles) pour différentes valeurs d'éclairement comprises entre 280 et 700 $\mu\text{mole}/(\text{m}^2.\text{s})$.

Dans ces conditions on constate que dans la première partie des courbes, le CO₂ est limitant pour un éclairage donné et que dans la deuxième partie des courbes l'éclairement est limitant pour une concentration de CO₂ donnée.

5.5. Influence de la température sur la photosynthèse :

Selon l'origine des plantes, l'optimum de température de leur activité photosynthétique est différent. Les plantes des régions tempérées ont un maximum qui se situe entre 15°C et 25°C, tandis que les plantes d'origine tropicale peuvent avoir un maximum qui se situe entre 30 et 45°C. De même, les limites à la tolérance au froid et au chaud sont différentes -2°C à 0°C et 40 – 50°C, pour les plantes des régions tempérées, +5°C à 7°C et +50 à 60°C, pour les plantes tropicales.

L'influence de la température est marquée par le fait que la courbe de saturation de la photosynthèse par la lumière est modifiée.

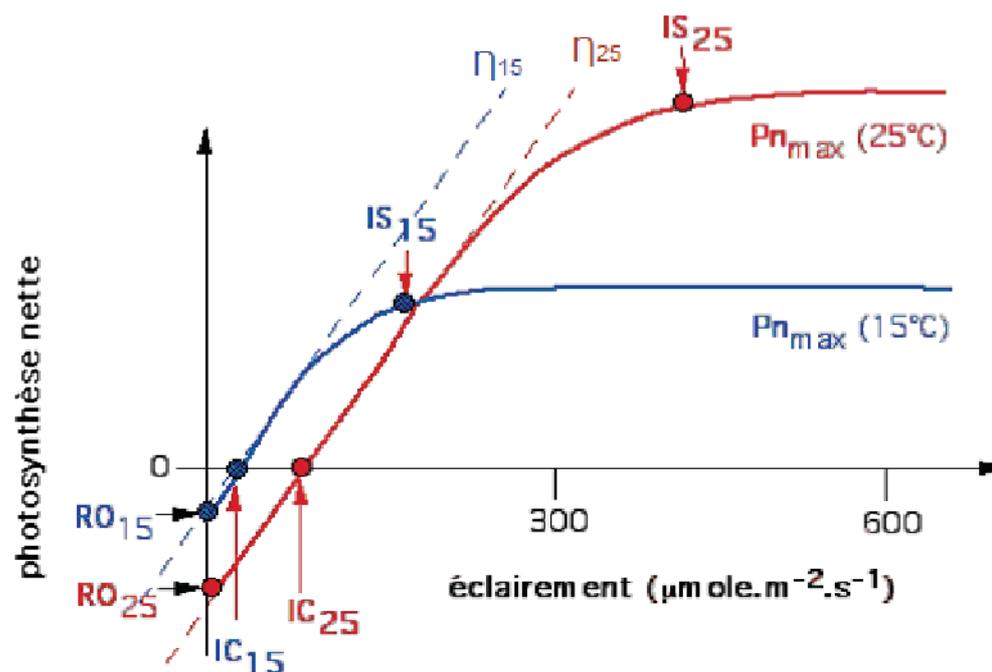


Fig. I.14 Effet de la température sur la photosynthèse nette en fonction de l'éclairage.

Lorsque la température augmente, le point de compensation (I_c) et le début de la saturation (I_s) se décalent vers les intensités lumineuses plus fortes et l'intensité maximale est plus élevée (P_{max}). I_c est plus élevée principalement lorsque R_o augmente avec la température.

On remarque que η n'est pas modifié, contrairement à P_n max. Considérant que ce sont les réactions primaires liées à la lumière (photochimiques) qui sont limitant dans la partie linéaire et que ce sont les réactions biochimiques qui sont limitant au plateau, on constate que les réactions photochimiques sont peu ou pas sensibles à la température, ce qui n'est pas le cas des réactions biochimiques.

6. Croissance et développement d'une plante :

La croissance et le développement d'une culture représentent les transformations quantitatives et qualitatives qui accompagnent le parcours des différentes étapes de sa vie depuis l'implantation jusqu'à la maturité. Les connaissances actuelles en biologie et physiologie des plantes permettent de caractériser ces transformations pour chacune des étapes considérées et à différentes échelles. Les étapes de la vie d'une plante et les échelles d'étude des phénomènes de croissance et de développement sont :

- Étapes de la vie d'une plante

- Germination et émergence des plantilles
- Période de croissance végétative
- Phase de transition
- Période de croissance reproductive
- Sénescence progressive des organes et maturité du produit récoltable

- États de croissance d'une plante

- Croissance cellulaire
- Croissance des méristèmes correspondant aux futures feuilles, tiges et racines.
- Croissance d'un organe d'une plante (feuille, tige, nœud, inflorescence, grain, racine,...)
- Croissance d'une plante entière partie aérienne, partie souterraine.
- Croissance d'un peuplement mono-spécifique ou plurispécifique.

L'évolution des phases de croissance et des stades de développement d'une plante est présentée dans la figure. I.15 (pris comme exemple le blé) :

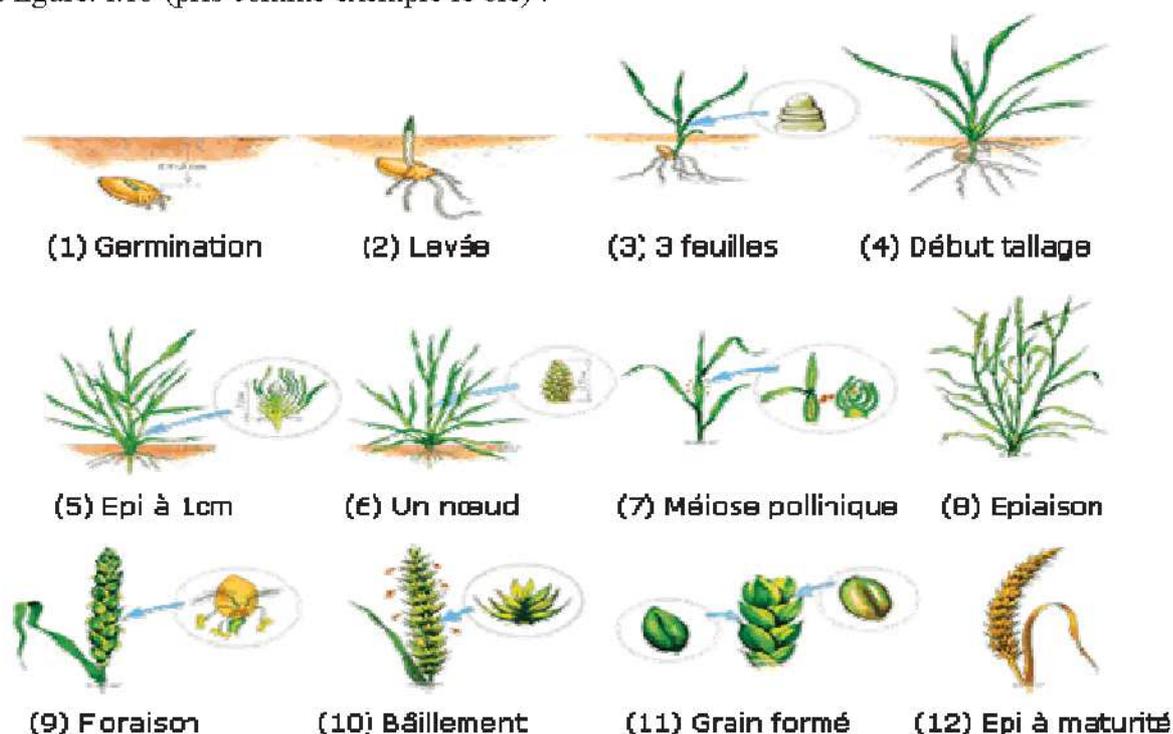


Figure I.15. Évolution des phases de croissance et des stades de développement du blé.

(1) Le germe contenu dans les semis développe une première partie s'ancrant dans le sol pour former les racines et une autre pointant vers la surface : c'est la germination. La température minimale de germination des graines se situe entre 3 et 4°C. Contrairement à d'autres plantes, les racines des céréales ne pénètrent pas profondément dans le sol, elles sont disposées horizontalement.

(2) Les premières pousses sont visibles après 10 jours à peine : c'est la levée. La plante commence réellement sa croissance durant les mois d'hiver pour donner de petites pousses en fin de saison.

(4) A un même niveau de la tige et à la base de la plante se constitue une touffe herbacée : cette étape est appelée tallage.

(5 - 7) Commence alors la période dite de "montaison", phase pendant laquelle la plante pousse rapidement si le temps et l'humidité le permettent et au cours de laquelle elle met de nouvelles feuilles. Il convient, à ce stade, de la protéger contre les insectes et les maladies ainsi que de lui apporter une dose d'engrais à base de matières azotées.

(8) Fin mai, l'épi se forme : c'est "l'épiaison".

(9) La floraison ne débutera que lorsque la température dépassera 14°C.

(10 - 11) La période de maturation des grains requiert de la chaleur et un temps sec, elle se fera dorénavant en plusieurs étapes, la maturité laiteuse (le grain contient encore 50% d'humidité et le stockage des protéines touche à sa fin), la maturité jaune (le grain a perdu en humidité et l'amidon a été constitué), la maturité complète (la teneur en humidité atteint environ 20%).

(12) Le grain est mûr et prêt à être récolté. C'est alors la période des moissons.

L'ensemble des étapes de croissance et de développement représente le cycle biologique naturel de la plante, qui va ainsi de l'implantation à la maturité. Dans le cas d'une plante **annuelle**, le cycle biologique se termine par la mort de tous les organes.

Lorsque la plante est **pluriannuelle**, on observe une succession d'états végétatif et reproducteur qui alternent. Cette alternance assure la pérennité de la plante étant donné qu'avant la maturité des organes reproducteurs il y a apparition d'un nouvel état végétatif. La dissémination des plantes se fait par graines, par propagation végétative ou par les deux voies à la fois.

6.1. Croissance :

6.1.1. Définition

La croissance est l'augmentation continue de toutes les dimensions de la plante : longueur, largeur, diamètre, surface, volume et masse. Cette augmentation est mesurable dans le temps. La croissance d'une plante entière (ou d'un couvert végétal) fait intervenir en fait deux phénomènes concomitants :

- la croissance en dimension de chacun des organes après leur initiation : c'est la croissance au sens strict ;
- la multiplication du nombre de ces organes : c'est la liaison avec le développement.

6.1.2. Croissance cellulaire et différenciation des tissus

La croissance résulte de la division cellulaire, ou mitose, et de l'élongation des cellules.

L'élongation est l'augmentation *irréversible* en volume selon une direction particulière.

La croissance d'un organe est le résultat de l'augmentation du nombre de cellules qui le constituent et de la taille des cellules individuelles. La multiplication cellulaire présente généralement une allure exponentielle.

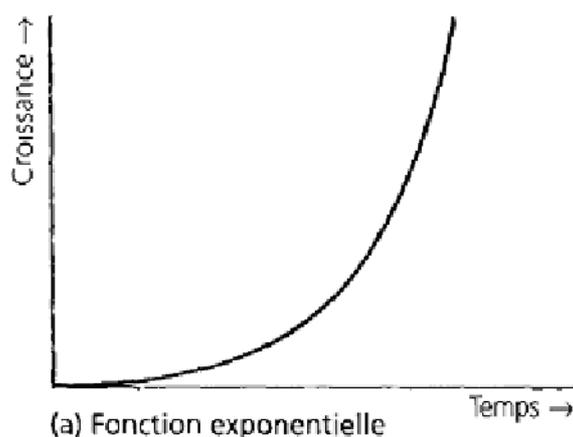


Figure I.16. Allure générale de la courbe de croissance des plantes.

Les étapes de l'élongation cellulaire comprennent :

- l'augmentation de la flexibilité des parois cellulaires composées de cellulose (25 %) et d'hémicellulose (50 %), due à une action hormonale;
- l'absorption de l'eau par **osmose** : l'eau remplit la vacuole ce qui augmente le volume cellulaire à cause de la pression de turgescence qui s'y exerce ;
- la synthèse de nouvelles parois cellulaires ou constituantes pariétaux (cellulose, hémicellulose, lignine).

La différenciation correspond au changement qualitatif progressif des cellules dans le sens d'une *spécialisation* pour former les organes et produits cellulaires.

6.2. Développement

6.2.1. Définition

Le développement représente l'ensemble des transformations qualitatives de la plante liées à l'initiation et à l'apparition de nouveaux organes. Contrairement à la croissance, le

développement est un phénomène repérable dans le temps. Il s'agit d'événements discrets qu'on peut observer à un instant donné : germination des graines suite à leur imbibition, émergence des plantules, initiation florale, maturité des graines, mort du végétal.

Comme pour la croissance, on distingue la phase de développement végétatif et la phase de développement reproducteur. Durant la première phase et après la germination, la plante passe de l'état juvénile à un état où elle se ramifie et multiplie ses organes végétatifs (feuilles, tiges, racines). La phase de développement reproducteur est marquée par la fabrication d'organes d'accumulation de la matière sèche.

6.2.2. Germination, dormance et viabilité des semences

La **germination** traduit le fait que lorsqu'une semence viable est placée dans des conditions adéquates de lumière, de température, d'oxygène et d'humidité, elle donne lieu à une plantule qui émerge de la surface du sol, ou de tout autre médium utilisé dans les tests de germination pour la plupart des espèces cultivées et adventices qui se propagent par des graines.

7 à 30 jours après la germination, **l'embryon** puis la **plantule** sont entièrement dépendants, sauf pour l'eau, de la **réserve** d'éléments nutritifs stockés dans la semence (amidon, lipides, protéines et acides aminés, minéraux essentiels, ...etc.). Bien que toutes les semences contiennent des réserves, il existe une grande diversité d'organes de stockage : cotylédons dans le cas des légumineuses, endosperme dans le cas des céréales.

Les principales étapes de la germination sont les suivantes :

- imbibition ;
- gonflement de la semence ;
- accroissement des activités métaboliques ;
- croissance de l'embryon ;
- émergence des plantules.

On observe une grande variabilité de la **faculté germinative** des semences. La faculté germinative (ou pouvoir germinatif) est définie en % par le nombre de graines qui germent après une durée déterminée (généralement 7 jours pour beaucoup d'espèces) sur 100 graines mises à germer. Les différences de pouvoir germinatif peuvent être liées à des différences d'énergie germinative, de maturité physiologique, et de conditions de récolte et de conservation des semences.

Les processus métaboliques accompagnant la germination sont marqués par une activité enzymatique, respiratoire et hormonale accrue. Cette activité permet l'hydrolyse de l'amidon, des lipides et des protéines en substances directement assimilables par l'embryon, comme les sucres, les acides gras et les acides aminés.

L'embryon fabrique différents types **d'hormones** qui sont transloquées dans l'endosperme ou dans les cotylédons, et qui jouent un rôle déterminant dans l'hydrolyse des réserves. Le rôle que joue l'acide gibbérellique (GA) dans la stimulation de l'activité α -amylase est bien connu chez les céréales et les légumineuses. L'activité hormonale peut entraîner la production de substances promotrices ou inhibitrices de la germination.

La **dormance** est un phénomène très répandu dans la nature mais difficile à définir avec précision. Si, en conditions adéquates de germination, une semence ne germe pas, elle est soit morte soit dormante. La semence est dite dormante si, après un traitement qui lève la dormance, la germination a lieu. Si la germination n'a pas lieu, on dira que la semence est morte. La mort d'une semence résulte du fait que son embryon est détérioré par un choc mécanique, thermique ou autre.

Il existe plusieurs types de dormance : la dormance vraie ou dormance embryonnaire et/ou tégumentaire, la dormance induite et la dormance forcée.

Dans le cas de la dormance due aux inhibitions tégumentaires, la germination a lieu si l'embryon est dénudé. On parle alors de **graines dures** ou de dureté tégumentaire.

La dormance tégumentaire dépend de la nature des enveloppes et de la localisation des substances inhibitrices dans ces enveloppes.

Concernant la **viabilité**, une semence est dite viable si, une fois la dormance levée et les graines placées dans des conditions adéquates de germination, la germination est normale. Sinon la semence est dite morte. Il existe des tests de viabilité qui donnent des résultats fiables.

La dormance peut être levée par un traitement thermique adéquat en jouant sur l'alternance de températures, par l'exposition à la lumière, par un traitement mécanique, ou **scarification**, permettant d'enlever l'inhibition tégumentaire, et par des traitements chimiques. Toutes ces techniques ont de larges applications agronomiques.

Par ailleurs, la dormance revêt une *signification écologique* considérable dans la mesure où les plantes utilisent ce phénomène comme stratégie d'adaptation face à l'adversité de l'environnement.

6.2.3. Développement des feuilles, des tiges et des racines

Les futurs organes de la plante - comme les feuilles, les tiges et les racines - prennent leur origine dans la zone de croissance active, caractérisée par une division cellulaire intense au niveau des méristèmes apicaux. Le stade ultime de cette activité méristématique est **l'initiation** des primordias de feuilles et des autres organes qui sont des ébauches de ces organes.

On appelle **plastochrone** l'intervalle de temps séparant l'initiation successive des primordias. Le plastochrone varie entre espèces et sous l'effet des facteurs et conditions de milieu. Mais pour une courte période et un environnement peu changeant (faibles variations de température et d'éclairement), on peut considérer que le plastochrone reste relativement constant.

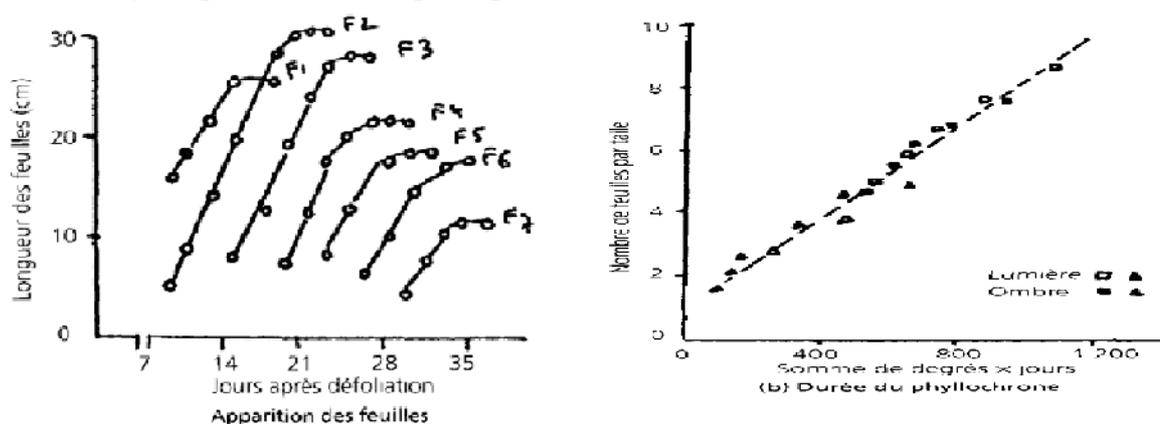


Fig. I.17. (a) Apparition successive et croissance en longueur des feuilles de *Lolium multiflorum* cultivé en zone méditerranéenne irriguée.

(b) Durée du phyllochrone de la même culture conduite en pleine lumière et sous ombrage.

Sauf avortement éventuel, chaque primordias donnera naissance à un futur organe. Dans le cas des feuilles, l'intervalle de temps séparant l'apparition successive et l'émergence des feuilles est appelée **phyllochrone**. En l'absence de limitation à la croissance et au développement des plantes, on considère que le phyllochrone reste constant. La fig. I.17 permet de visualiser ce phénomène dans le cas de *Lolium multiflorum*. Pour ce fourrage cultivé et pour de nombreuses autres graminées la durée du phyllochrone, en somme de degrés x jours, est d'environ 100 à 120 °C-jour (fig. I.17.b).

Les principaux facteurs du milieu qui agissent sur l'initiation et l'apparition des feuilles sont la température et l'intensité de l'éclairement.

6.2.4. Floraison et développement reproducteur

La floraison commence par **l'induction florale** et l'initiation des organes reproducteurs.

Le premier signe visible de l'initiation florale est le changement morphologique de l'apex, dont les primordia évoluent du stade rides simples au stade **double ride**. L'apparition des premières doubles rides marque le début du stade reproducteur. Cependant, les mécanismes qui interviennent dans la phase de transition du développement végétatif au développement reproducteur ne sont pas encore clairement élucidés. Chez les céréales et les graminées fourragères, le nombre de doubles rides augmente rapidement avec le temps à partir de leur apparition ; ces doubles rides évoluent ensuite en inflorescences et épis dont le nombre d'épillets aura été fixé dès la phase végétative de l'apex.

Concernant l'écophysiologie de la floraison, l'induction florale fait intervenir différents mécanismes adaptatifs qui incluent :

- la levée de la dormance des bourgeons axillaires ;
- la réaction des plantes aux basses températures, ou vernalisation ;
- la réaction des plantes au photopériodisme.

6.2.5. Sénescence, maturité et mortalité des organes

La sénescence est le phénomène par lequel les feuilles perdent progressivement leur chlorophylle, chutent et meurent. La sénescence a généralement lieu durant toute la vie de la plante bien que le processus soit plus accentué en phase reproductrice.

En phase végétative, la plupart des graminées maintiennent un nombre de feuilles vivantes relativement constant, impliquant un équilibre entre le taux de formation des feuilles et le taux de leur disparition.

Avec l'avancement du développement reproducteur, la sénescence s'accélère, la chute des feuilles augmente et au stade ultime, pour une culture comme le blé, il ne reste que la dernière feuille pour assurer la fourniture des assimilais nécessaires au remplissage des grains, avant qu'ils n'atteignent la maturité. Après cette phase, tous les organes d'une culture annuelle meurent alors que les plantes pérennes reprennent leur développement végétatif si les conditions de milieu sont favorables.

6.2. Rendement, résultante de la croissance et du développement

Dans le cas d'un peuplement cultivé, la résultante des interactions entre les caractères propres d'un peuplement, les facteurs et conditions de l'environnement qu'il exploite et les modifications qu'il subit par les techniques culturales déterminent le **rendement** et la **qualité** du produit, ou des produits, recherchés par l'homme. Le rendement est un concept relatif et il faut distinguer le "rendement biologique" du "rendement utile".

6.3.1. Rendement biologique

C'est l'accumulation de matière sèche totale au sein d'un peuplement végétal, système aérien et système racinaire compris, depuis l'établissement du couvert (émergence) jusqu'à la récolte. La matière sèche accumulée est le résultat d'un bilan entre le *gain* de carbone à partir du CO₂ de l'air grâce à la photosynthèse, et la *perte* de carbone par respiration, autres catabolismes et sénescence. La respiration permet de satisfaire les besoins énergétiques du métabolisme, conduisant à la fabrication de glucides complexes, de lipides, de corps aromatiques, de protides et d'autres substances nécessaires à la croissance et au développement des plantes.

La sénescence qui correspond à la chute des feuilles et au dépérissement progressif des organes contribue aussi à la détérioration du bilan carboné de la plante.

6.3.2. Rendement utile ou rendement économique

Toute la matière sèche accumulée dans les parties aérienne et racinaire n'est pas récoltable et on distingue plusieurs groupes de peuplements :

• **Groupe de plantes dont le rendement économique provient de la croissance végétative:**

- Plantes à racines (ex. : betterave à sucre).
- Plantes récoltées pour leurs tiges (ex. : canne à sucre).
- Plantes récoltées pour leurs feuilles (ex. : tabac).
- Plantes récoltées pour leurs tubercules (ex. : pomme de terre).
- Plantes récoltées pour leurs parties aériennes (ex. : cultures fourragères).

• **Groupe de plantes dont le rendement économique provient de la croissance reproductrice.**

La formation du rendement économique commence par l'induction florale et se termine par l'arrêt complet de la croissance (dessiccation). La plupart du rendement utile provient de l'assimilation photosynthétique réelle, c'est-à-dire parallèlement au développement des organes d'accumulation de matière sèche (tiges, inflorescences, grains).

7. Analyse quantitative de la croissance et du développement

Le tableau suivant présente les différentes lois qui régissent des différents concepts de la culture :

GR=dW/dt	[kg.j ⁻¹]	Vitesse absolue de croissance (plante)
CGR = (I/A) (dW/dt)	[kg.m ⁻² .j ⁻¹]	Vitesse absolue de croissance (peuplement)
RGR = (1/W) (dW/dt)	[kg.kg ⁻¹ .j ⁻¹ ou j ⁻¹]	Vitesse relative de croissance (plante ou peuplement)
NAR = (1/L) (dW/dt)	[kg.m ⁻² feuille.j ⁻¹]	Taux d'assimilation nette
LAR = L/W	[m ² .kg ⁻¹]	Surface foliaire massique
SLA = L/W _L	[m ² feuille.kg ⁻¹]	Surface foliaire spécifique
LWR=W _L /W	[% ou sans dimension]	Poids foliaire spécifique
LAI = L/A	[m ² feuille/m ² sol]	Indice foliaire
LAD = Σ(LAI x D)	[m ² .jour, ou jour]	Durée d'action foliaire
Lois classiques		
CR = LAI x NAR, RGR = LAR x NAR ; LAR = LWR x SLA		
• Développements récents		
CGR = Biomasse x RGR Relation entre CGR et RGR		
CGR = E ₀ .E _I .E _u Relation entre CGR et rayonnement incident		
N	Nombre de plantes/m ²	
W(t)	Poids sec à l'instant t	[kg; kg/m ²]
W ₀	Poids sec initial, ou capital	[kg, kg/ m ²]
W _L	Poids sec des feuilles	[kg]
L(t)	Surface foliaire à l'instant t	[m ²]
A	Surface de sol correspondant à L	[m ²]
D	Durée de croissance	[jour]
T, t ₀	Temps instantané et temps initial t ₀	[jour]
I ₀ , J	Rayonnement incident ou intercepté	[Mj/m ²]
E _I	Efficiencce d'interception du rayonnement incident	[%]
E _u	Efficiencce d'utilisation du rayonnement intercepté	[g MS/Mj]

Tableau I.3. Analyse quantitative classique de la croissance et développements.

Aller dans l'annexe pour voir les détails de ce tableau.

Conclusion

La température, la lumière, l'air et l'humidité relative représentent quelques-uns des éléments faisant partie intégrante de l'environnement de la plante. Ce sont des alliés silencieux. En les apprivoisant, on utilise leurs forces au profit de la culture.

La **serriculture** (ou **culture sous serre**) désigne la pratique qui consiste à cultiver des végétaux (soit en culture maraîchère ou en horticulture ornementale) à l'intérieur d'une serre afin de réunir des conditions hygrométriques et photopériodiques adaptées.

La culture sous serre permet de bénéficier de la luminosité naturelle avec la possibilité de rallonger la photopériode par des lumières artificielles tout en gardant le contrôle des conditions hygrométriques. Elle permet notamment de rallonger la période où l'on peut cultiver certains végétaux, ou de les cultiver en dehors des régions où on les trouve originellement.

Chapitre II

La serre

1. Introduction

Une serre est destinée à protéger les plantes. Elle favorise la croissance des cultures (légumes, fleurs, etc.) en créant des conditions climatiques plus favorables que le climat local et permet de produire des cultures hors saison.

Les parois et/ou couverture sont transparentes ou translucides, permettant de cultiver des plantes dans un environnement plus chaud ou mieux contrôlé qu'à l'extérieur. La culture peut être faite dans le sol d'origine, ou en hors sol, en hydroponique, en pots ou dans des sacs de laine de roche.

L'efficacité de la serre s'explique par deux phénomènes. D'une part, le milieu intérieur est réchauffé par l'effet de serre et, d'autre part, comme il est abrité du vent, les pertes de chaleur par convection sont limitées.

La serre utilise l'effet de serre (piégeage du rayonnement infrarouge du soleil entre les parois transparentes), mais elle peut parfois être chauffée à la demande pour des productions toute l'année dans des pays froids ou tempérés. Des systèmes de régulation de la température et de l'humidité sont nécessaires, car l'atmosphère chaude, humide et confinée de la serre peut favoriser des attaques parasitaires ou de pathogènes des plantes (champignons notamment).

Le **tunnel**, ou **serre-tunnel** est une forme de serre. Il s'agit d'une structure plus légère car elle est recouverte de bâches plastiques résistantes aux ultraviolets et tendues sur des tubes métalliques arrondis. De dimensions variables, les tunnels sont intéressants pour leur plus faible coût de construction. Ils sont construits pour protéger des cultures précoces ou tardives des conditions climatiques extérieures défavorables.

La couverture est translucide en matière plastique (par exemple : film en polyéthylène, plaques semi-rigides PVC) rigide ou souple, généralement traité pour résister aux ultraviolets. Ce film peut être armé pour augmenter sa résistance aux déchirements.

Pour la **chapelle** ou **serre chapelle** ; plusieurs peuvent être construites côte à côte. La couverture est généralement en verre, minéral ou synthétique.

Le verre employé est transparent à la lumière visible mais ne l'est pas pour les rayonnements infrarouges. Autrement dit, il laisse entrer la lumière venant du soleil qui va alors chauffer le milieu intérieur. Par contre, il arrête les infrarouges émis par ce milieu intérieur chaud. Ces infrarouges, piégés dans la serre, vont contribuer d'autant plus à augmenter la température intérieure.

Le verre est un matériau de meilleure qualité car il laisse mieux passer la lumière tandis que les matières synthétiques deviennent de moins en moins translucides si elles ne le sont pas déjà.

Le poids du matériel a aussi une certaine importance : il est plus facile d'installer une matière plastique que du verre sur une toiture de serre. Il y a des toitures de toutes formes. Les toits en « V » renversés sont les plus courants ; il existe aussi des toits courbés, surtout utilisés pour les revêtements souples. Il arrive que les serres rondes sont faites en verre mais le coût de telles serres est exorbitant.

2. Serres et grands tunnels

2.1. Types de Constructions rencontrées en Méditerrané

Dans le Bassin Méditerranéen, ce sont les serres en plastique qui prédominent. La zone où l'on trouve des serres en verre est très limitée.

Les principaux problèmes des serres méditerranéennes sont:

- températures hivernales inférieures au minimum biologique: il est nécessaire de chauffer pendant 1 à 3 mois;
- températures diurnes élevées, même au printemps: l'aération est insuffisante pendant 4 à 6 mois;
- taux d'humidité nocturne très élevé;
- bonne résistance au vent exigée;
- qualité de l'eau et manque d'eau;
- insuffisance de CO₂ dans les serres fermées, au cours de la journée.

Si on se limite aux serres en plastique, il est important de prendre les points suivants en considération:

- la conception et la réalisation de la serre;

CHAPITRE II : La serre

- la nature et les caractéristiques du matériau de couverture;
- la fixation du fun et la tension du film sur la construction;
- l'aération en tant que partie intégrante de la construction.

Le type de construction peut influencer sur quatre des six problèmes mentionnés ci-dessus:

- les niveaux de température nocturne peuvent être élevés dans une certaine mesure par une meilleure étanchéité des abris;
- une aération suffisante peut remédier aux températures diurnes élevées;
- la conception de la serre peut accroître la résistance au vent;
- le manque d'eau peut être compensé en recueillant les précipitations captées par le toit à l'aide de gouttières.

Certains types actuels de serres en plastique présentent des inconvénients, notamment:

- frais de main d'œuvre trop élevés pour la construction de la charpente et le remplacement des films;
- diminution de la rigidité du film due à la radiation globale et au frottement contre la construction;
- flottement du film au vent; danger de déchirure en cas de tempête;
- chute de gouttes d'eau et diminution de la transmission de lumière à cause de la condensation;
- aération inadéquate dans les serres multi-chapelles;
- transmission insuffisante pour la lumière, suite à un encombrement excessif de la charpente (surtout en bois).

Ces points expliquent l'insuffisance de qualité qui caractérise de nombreuses serres.

Etant donné les problèmes et les désavantages inhérents aux serres en plastique existantes, il est logique de rechercher un nouveau type de construction qui répondrait aux exigences suivantes:

- coût modéré pour la construction et l'entretien;
- fixation de normes de résistance minimum aux coups de vent;
- manipulations simples pour le remplacement du film, n'impliquant pas un coût élevé de main d'œuvre; système de fixation solidaire de la structure et facile à déconnecter;
- élimination du risque de destruction du film par frottements contre la structure dus au flottement; utilisation de systèmes de tension simples permettant de tendre le film fermement;
- élimination du risque de contacts entre le film et certaines parties de la structure chauffées par la radiation solaire;
- possibilité de remplacer les films existants par d'autres films souples ou rigides;
- existence d'un système d'aération efficace;
- étanchéité de la construction;
- utilisation de films de longue durée si l'aération estivale est suffisamment efficace;
- augmentation de la transmission lumineuse du film de façon à permettre l'utilisation de doubles parois; de même, réduction des pertes de lumière par la charpente;
- élimination du risque de chute sur les cultures de l'eau de condensation grâce à un choix correct du degré de pente du toit, à un traitement adéquat du film ou à la création d'un nouveau type de film *anti-goutte* (anti-drop);
- construction de parois latérales élevées et réduction du nombre d'éléments à l'intérieur de la construction pour permettre la mécanisation des opérations culturales.

Dans les divers pays des régions méditerranéennes, on trouve une grande variété de types de constructions et de matériaux, même dans des conditions climatologiques fort semblables. Le respect des traditions n'est sans doute pas étranger à ce phénomène. En outre, le coût des matériaux intervient pour une grande part dans le choix de ceux-ci: dans certains pays, le bois est bon marché; ailleurs, l'acier ou les tubes d'acier sont moins coûteux.

Ce sont les conditions de climat qui doivent déterminer le type de construction utilisé. Avant de décrire diverses constructions valables, il est bien de passer en revue quelques exemples de serres conçues pour les cultures maraîchères en région méditerranéenne.

Les types de serres les plus couramment rencontrés ont un toit en forme de chapelle (selle) à versants égaux (a) ou inégaux (b); lorsque le toit est cintré, il peut atteindre directement le sol (c) ou reposer

sur les piédroits verticaux (d); si le toit est en ogive, il peut être placé sur des piédroits obliques (e) ou verticaux (f) (voir fig. II.1).

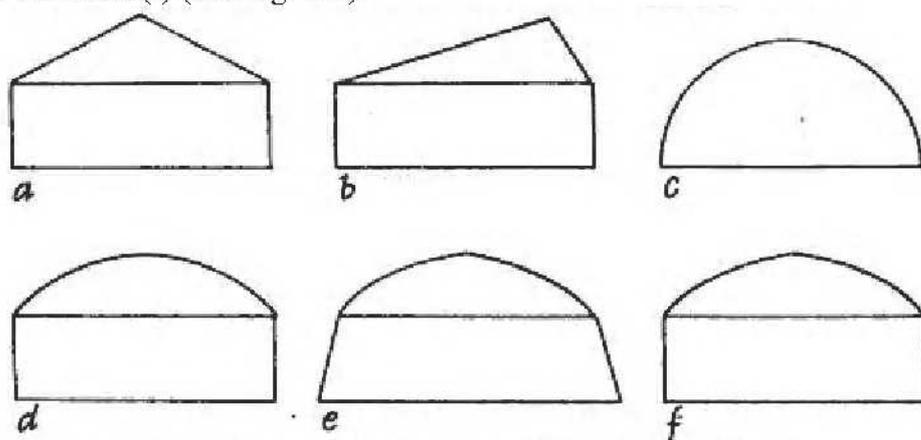


Fig. II.1 Types de serres tes plus couramment rencontrés

Il est plus aisé de tendre et de fixer un film de couverture sur les toits arrondis que sur tes toits à plan incliné

Un autre type1 mixte, possède des montants en bois de pin traité sous pression et les autres parties de la construction en eucalyptus (fig. II.2).

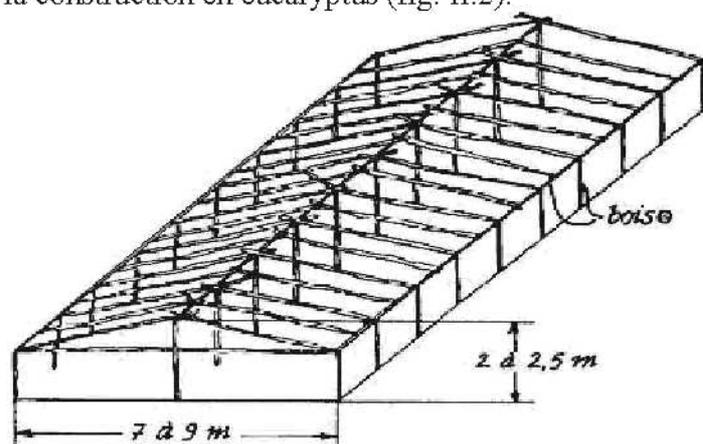


Fig. II.2 Structures en bois

De nouveaux systèmes sont développés qui sont formés uniquement de pièces de pin traitées sous pression, ce qui porte de 10 à 12 ans la durée économique de vie de l'abri.

Antérieurement, les horticulteurs construisaient souvent des serres à une seule chapelle (serres "isolées") avec des parties ouvrantes pour l'aération sur les piédroits; l'efficacité de la ventilation était excellente. Ces dernières années, la préférence est donnée aux serres multi-chapelles (multi-span) car elles sont moins coûteuses, mais l'utilisateur doit prendre garde à l'aération qui peut être insuffisante. La largeur maximum des serres multi-chapelles (c'est-à-dire à chapelles accolées) qui permette une ventilation suffisante par les piédroits ne devrait pas dépasser 20 à 25 m.

Pour toutes les constructions :

- Pour atteindre une ventilation efficace, la largeur maximum d'une serre multi-chapelle dont l'aération se fait par les parois latérales et les pignons ne doit pas dépasser 20 A 25 m.
- Pour les serres couvertes de film plastique, la ventilation par les parois latérales est la meilleure et la moins chère: l'aération faîtière est trop dispendieuse.
- La hauteur de la construction doit être réduite dans les régions où la vitesse du vent est relativement élevée. Par contre, des parois latérales plus hautes et verticales s'imposent pour permettre une certaine mécanisation des pratiques culturales.
- Dans les endroits où le risque de chute de neige existe réellement, il ne faut construire que des serres isolées ("mono-chapelles").

- Les serres devraient pouvoir être couvertes d'un double film plastique.
- Des gouttières devraient, dans la mesure du possible, permettre de capter l'eau de pluie. Le prix de cette gouttière est remboursé en peu de temps et elle peut faire partie intégrante de la charpente de la serre. Le film peut d'ailleurs lui être fixé.

2.1.1. Constructions en bois

- Pour les serres à charpente en bois, la forme idéale de la construction est la "chapelle". Le bois doit être traité, mais il faut cependant prendre attention à ne pas utiliser pour cette imprégnation des produits phytotoxiques.
- Le traitement du bois peut être effectué par imprégnation sous pression ou en brillant superficiellement les poteaux. On peut aussi traiter le bois au moyen de produits chimiques divers (sulfate de cuivre, borax). Les poteaux, secs, demeurent 2 à 3 jours dans la solution pour assurer une bonne imprégnation.
- Il ne faut pas utiliser de clous pour fixer le film. Une méthode portugaise -utilisée aussi en France dans les Pyrénées occidentales, consistant à placer des pièces de bois alternativement au dessus et en dessous du film- est économique et efficace pour un bon maintien du film en place. Il est également possible d'utiliser divers appareillages de fixation mais ils sont en général plus coûteux.

2.1.2. Constructions mixtes: en bois et tubes d'acier

- Pour des serres devant être recouvertes de film plastique, une forme cintrée de toit est préférable pour tendre le film.
- Dans le cas de constructions mixtes, dont les fermes ou les poteaux sont en bois et la charpente du toit en tubes d'acier, les types utilisés en toiture cintrée apparaissent très valables (fig. II.3).

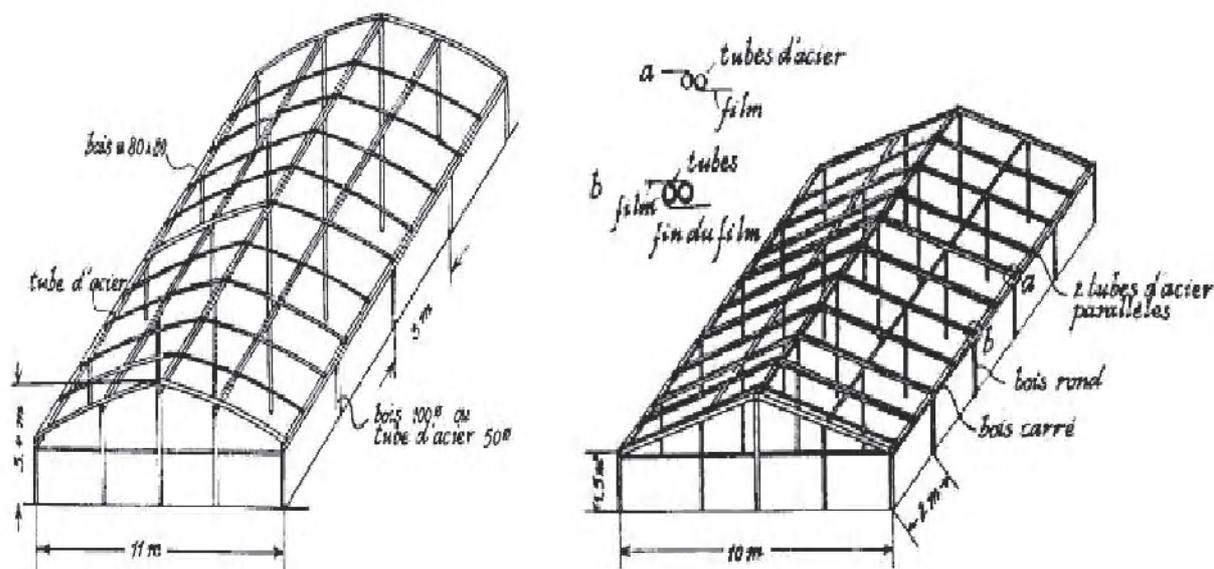


Fig. II.3. à droite: Combinaison dans la structure entre le bois et les tubes acier
à gauche: Construction (deux tubes parallèles sur le toit).

2.1.3. Constructions en acier

- Pour les constructions à charpente métallique, les formes cintrées ou en ogive sont préférables aux types « chapelles », comme par exemple le type décrit à la fig. II.4.

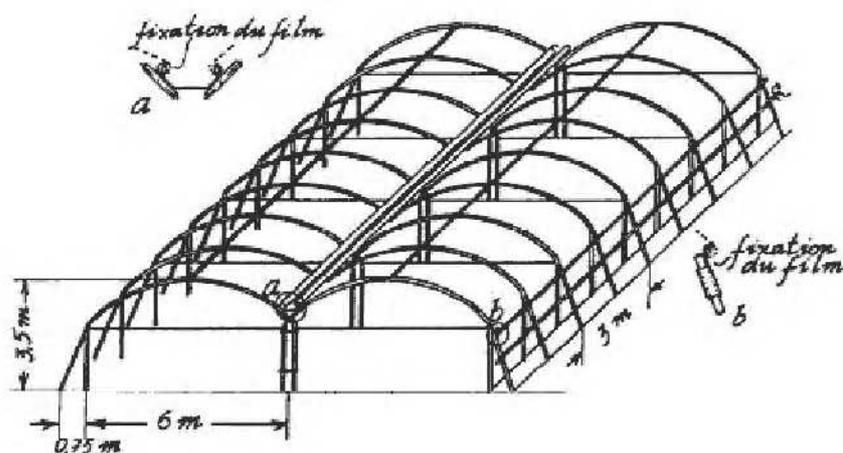


Fig. II.4 Construction en tubes d'acier

- Il faut protéger les tubes d'acier de la toiture, en contact avec le film, contre le risque d'échauffement excessif par le rayonnement solaire, en les couvrant de bandes plastiques isolantes ou d'une peinture de couleur blanche.

La fig. II.5 propose un type de construction de serre bon marché.

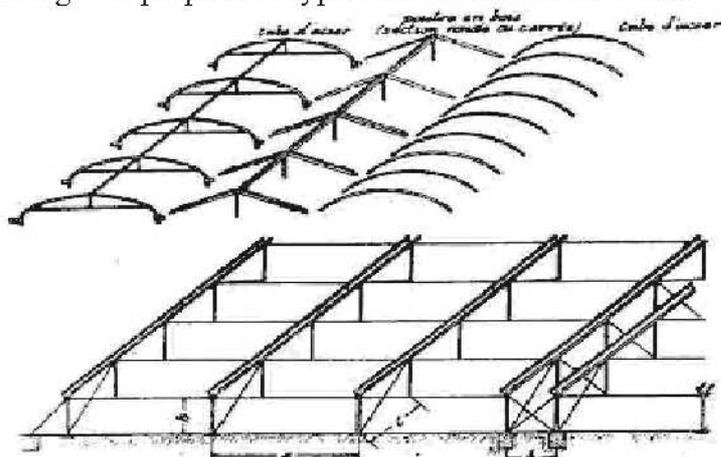


Fig. II.5 Proposition d'une charpente de serres avec éléments de base et de toiture séparés, permettant la combinaison des divers types.

Ce type est à l'étude depuis 1983. Il possède les caractéristiques suivantes;

- La construction est constituée de deux parties bien distinctes:

- La base (élément porteur).
- Le toit.

- Les armatures et la ferme peuvent être en bois ou en acier.

- Chaque élément d'une serre jumelée (multi-chapelle) ne devrait pas excéder 20 à 25 m de large afin de permettre une aération suffisante au travers des parois latérales et des pignons. Il devrait subsister un espace de 1,5 m à 2 m entre chaque serre. La largeur d'une chapelle (a) peut être de 5 à 8 m, de telle sorte que, pour une largeur totale de la construction de 20 à 30 m. Le nombre de chapelles soit de 3 à 6. En principe, la largeur des chapelles et le nombre de celles-ci peuvent être choisis librement. Ils ne sont limités que par la largeur maximum de la construction dans laquelle il est possible d'assurer une ventilation efficace.

- L'élément de base est assujéti par des tendeurs (à l'image d'une tente). Des fils relient la gouttière fixée le long des parois latérales aux bases des piliers de la serre voisine. De cette façon, seuls les piliers des parois latérales sont soumis à des tensions, et par conséquent ils nécessitent des fondations plus profondes. Les poteaux placés à l'intérieur ne reposent que sur une fondation légère, faite de pierres. Longitudinalement, les gouttières sont fixées au sommet des piliers. Le long des parois latérales, les sommets des piliers sont reliés entre eux par des barres ou des fils d'acier. Les

CHAPITRE II : La serre

barres et les fils d'acier, horizontaux ou inclinés ainsi que les gouttières, ne supportent que des forces de tension. L'élément de base est donc essentiellement simple, relativement peu coûteux et offre une résistance au vent très valable. Il y a moins d'éléments de construction que dans les autres types de serre. La transmission de lumière ne peut qu'en bénéficier.

- Les parois latérales sont pourvues d'un système d'aération. Par conséquent, l'espace entre deux serres a une fonction double:

- L'aération de la serre.
- La tension de sa structure.

- La charpente de base comprend des gouttières destinées à canaliser les eaux de pluie. Cette opération n'est pas dénuée de fondement étant donné les risques de pénurie d'eau. En outre, ces gouttières servent de points de fixation pour le film. La toiture, en tant qu'élément indépendant, peut être construite en tubes d'acier ou en bois ainsi qu'il apparaît à la fig. II.5. On peut accorder la préférence au matériau le moins coûteux et au type de construction qui répond le mieux à l'attente de l'utilisateur et du constructeur. On peut affirmer qu'en général il est plus facile de tendre un film sur un toit cintré (rond) ou en forme d'arc que sur un toit surfaces planes inclinées.

- Le toit doit être assuré séparément contre la force du vent.

- Ce sont les films doubles gonflables qui offrent la meilleure résistance au vent. La pression entre les deux films est de l'ordre de 40 à 60 Pascal.

Le tableau suivant résume les dimensions optimales de construction :

Grandeurs	Valeurs des grandeurs
Hauteur	2 à 3 m
distance entre ferme	3 m
largeur d'une chapelle	5 à 8 m
largeur maximum d'une construction multi-chapelle	20 à 25 m
distance entre deux blocs unitaires multi-chapelles	1,5 à 2 m

Tableau II.1. Dimensions optimales pour la construction.

- La charpente peut être construite de la façon suivante:

- Puisque les fermes ne subissent que des efforts de pression, seuls de petits socles de fondation (10 à 20 cm d'épaisseur) doivent être prévus.
- Les fermes, par exemple en tuyaux d'acier, peuvent être enfoncés au moyen de chevilles dans la fondation en béton (voir fig. II.6).

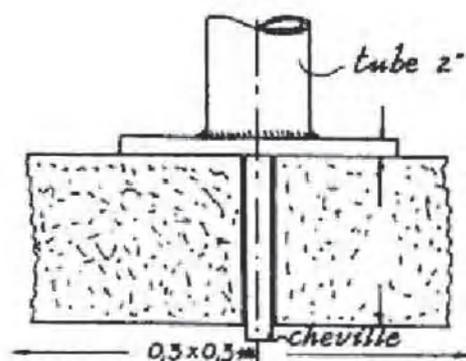


Fig. II.6 Fondation pour ferme en tubes d'acier

- Il est possible d'opérer de façon similaire pour des fermes en bois.
- Alors, sur les faces latérales, la tête des fermes est connectée par des barres d'acier (12 mm de diamètre).
- Les barres d'acier inclinées des faces latérales (16 mm de diamètre) sont fixées à la gouttière et à la fondation.
- Les fondations pour ces barres inclinées doivent avoir une profondeur d'environ 60 à 70 cm.
- Dans l'axe longitudinal, les gouttières sont fixées à la partie supérieure des fermes.
- Entre deux unités multi-chapelles, les barres obliques sont fixées à la fondation de la serre suivante.

- De cette façon, la charpente de base est prête.
- La charpente de la toiture peut être choisie librement en fonction du prix des matériaux dans les différents pays. Si l'on fait appel à un constructeur professionnel, ce dernier choisit lui-même le matériau de la charpente bois ou acier. La charpente de la toiture sera placée sur la construction de base et fixée aux fermes ou aux gouttières. Le film sera fixé aux gouttières au moyen de divers appareils, comme montré aux fig. II.7.

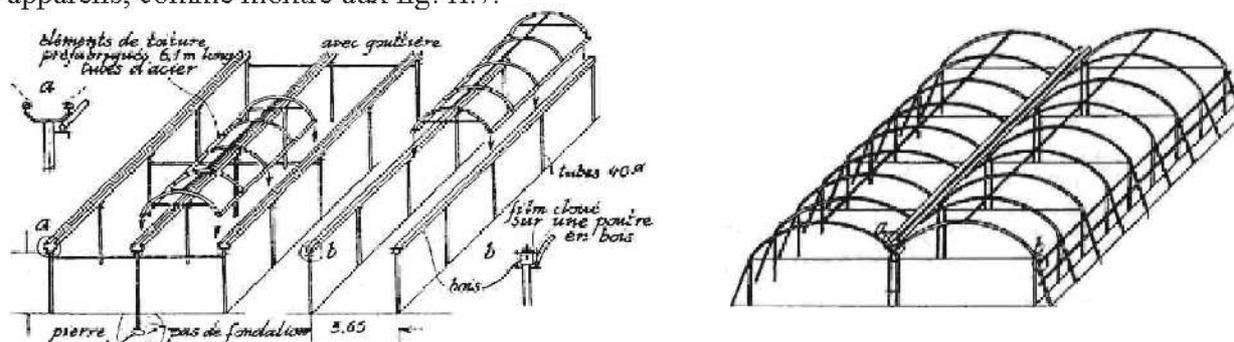


Fig. II.7 Constriction métallique. A gauche : avec éléments de toiture préfabriqués.
A droite : construction en tubes d'acier

L'aération de la serre est assurée par des ouvertures dans les piédroits et les pignons. La construction d'ouvrants en toiture est trop coûteuse pour des serres couvertes de films plastiques.

La structure décrite ci-dessus présente des avantages. Elle peut aider à résoudre quelques problèmes en région méditerranéenne et à améliorer la production.

2.2 Matériaux de couverture

2.2.1. Description des Matériaux

La majorité des matériaux de couverture de serre sont des films de Polyéthylène. Ce n'est que dans des cas rares que des films fabriqués à partir d'autres résines (comme Chlorure de Polyvinyle ou Polychlorure de vinyle, Polyesters, ... etc.) sont choisis.

Les matériaux rigides comme le verre ou les plaques plastiques double paroi (volumes ouverts formés de deux feuilles de plastique rigide reliées à intervalles réguliers par des cloisons servant d'entretoises) sont très intéressants dans les régions septentrionales mais sont trop coûteux et exigent souvent des structures trop sophistiquées pour être. En outre, leur longévité doit être suffisante pour compenser leur supplément de prix par rapport au PE.

A. Films à base de Polyéthylène

Comme dit plus haut, le matériau de base pour la plupart des films plastiques utilisés en Méditerranée comme couverture des serres et abris est le Polyéthylène; l'enrichissement de la résine PE de base au moyen de divers additifs augmente plus ou moins la durabilité du film, modifie sa transparence au visible et à l'infrarouge court (rayonnement solaire) et peut influencer ses qualités d'absorption et de réflexion pour l'infrarouge long. Il est par conséquent, très intéressant pour l'utilisateur (l'horticulteur), de connaître la nature des additifs utilisés lors de l'extrusion des films proposés par les différents fabricants.

A.1. Le Polyéthylène basse densité (PE - BD)

En fait, il existe deux qualités différentes de PE-BD le PE radicalaire et le PE linéaire. Le PE radicalaire est obtenu par polymérisation sous haute pression et à haute température tandis que le PE linéaire exige des pressions et de température sensiblement plus faibles.

Les films en PE linéaires ont une meilleure résistance mécanique mais sont très extensibles (allongement réversible) et sont malaisés à produire en grande largeur, de telle sorte que l'utilisation en couverture de serre des PE linéaires est difficile. Cependant, des mélanges de PE radicalaires et linéaires, à raison de 20 à 30 % de PE linéaires, donnent de bons résultats.

Pour la couverture des petits tunnels, la meilleure résistance mécanique du PE linéaire permet l'emploi de films plus minces (80 à 120 microns) que ceux réalisés en PE radicalaire (120 à 150 microns).

Jusqu'à présent, seuls les PE radicalaires sont utilisés en couverture de serres. La longévité des films dépend non seulement de la qualité des substances stabilisantes (absorbeurs d'UV) utilisées, mais aussi de la qualité de la résine. Celle-ci est exprimée par l'indice de fluidité à chaud (melt-index M-I): de faibles valeurs de celui-ci (0,3 à 0,7), résultat d'un haut degré de polymérisation, obtenu à haute température et haute pression, permettent l'extrusion de films appelés *2 étoiles*, dont les propriétés mécaniques sont bonnes. La durée de vie de ces films peut être très longue si des quantités suffisantes de stabilisants (surtout absorbeurs d'UV) de bonne qualité sont utilisées. Dans les conditions du nord de la méditerranée, les films de valeur peuvent atteindre jusqu'à 4 ans de durée de vie, alors que dans les régions plus méridionales cette dernière ne dépasse pas 3 ans. En fait, dans bien des cas, la longévité des films est plus réduite par suite d'une déficience soit au niveau du M-I, soit à celui des stabilisants.

L'emploi de divers stabilisants pour obtenir des films PE-longue-durée (PE-LD) réduit leur transparence au rayonnement solaire mais augmente leur absorption pour l'IR long. On peut donc enregistrer sous PE-LD des températures nocturnes et donc des résultats culturaux plus élevés.

Pour obtenir des PE-LD à haute transparence, une nouvelle génération de stabilisants, les HALS sont utilisés mais ils réagiraient avec certains fongicides à base de soufre utilisés dans les serres.

A.2. Les Polyéthylènes Vinyle-Acétate (EVA) ou Copolymères éthylvinylacétate

Le Polyéthylène constituant la résine de base est enrichi en Acétate de Vinyle (AV) qui a la propriété d'augmenter l'absorption des infrarouges longs du film obtenu sans réduire la transparence à l'UV, au visible et à l'IR court (solaire). Au contraire, les EVA sont même connus pour leur grande transparence initiale au rayonnement solaire, mais cette qualité peut disparaître plus ou moins rapidement par suite d'une plus forte fixation des poussières, surtout dans les régions où les précipitations sont rares.

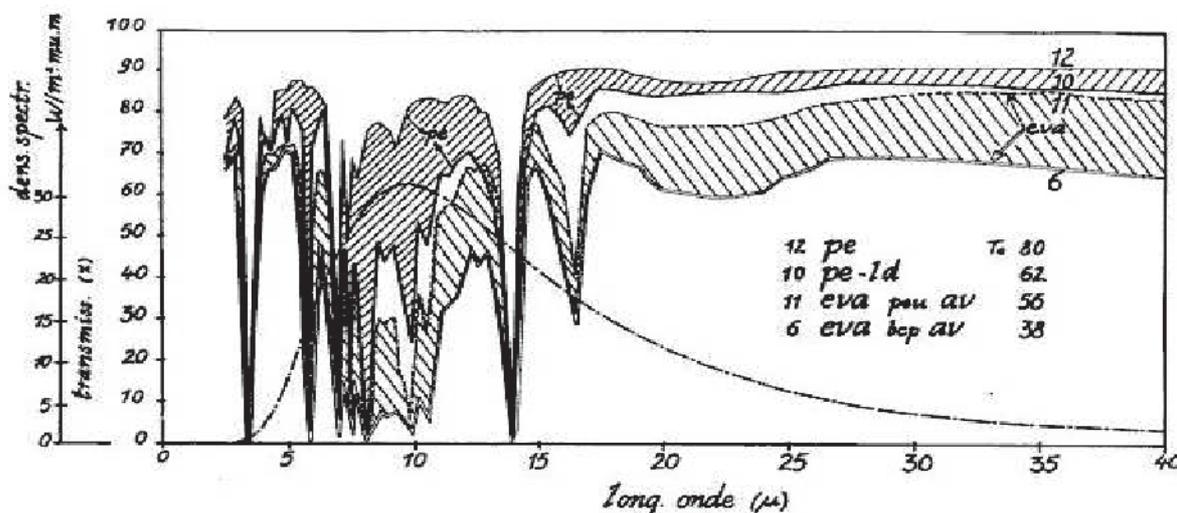


Fig. II.8 Facteur de transmission dans l'IR long de deux PE: « normal » (12) et « longue durée » (10) ainsi que de deux EVA « pauvres » (11) et « riche » (6) en AV. Densité spectrale du corps noir 300 K.

L'absorption des IR longs (c'est à dire l'effet de serre que montrent les films) croît avec la richesse en AV. Cependant ; on ne peut pas atteindre une richesse en AV qui permettrait une absorption totale des IR longs car, à partir d'un certain taux en AV, les propriétés mécaniques du film commencent laisser à désirer, suite à un abaissement progressif du point de ramollissement; on observe un fluage plus rapide, suite à des tensions locales exagérées (traction manuelle d'épreuve, tractions différentielles lors de la mise en place du film sur la serre) tout autant que suite à un échauffement sur les arceaux de charpente.

A l'heure actuelle, les EVA contiennent rarement plus de 14 % d'AV. Une concentration de 18% semble, actuellement, la concession maximum que l'horticulteur puisse faire au point de vue fluage du film, mais ne correspond pas à une absorption totale des IR longs.

L'AV montre une absorption totale spécifique dans l'IR long: ses raies sont différentes de celles des autres substances ajoutées à la résine de base et influencent différemment. Le bilan thermique de la serre: en conséquence, l'AV et les autres charges thermiques ne sont pas interchangeables lorsqu'elles sont utilisées pour réduire la transmission dans l'IR long des matériaux.

L'EVA peut acquérir une durée de vie plus longue par l'adjonction d'absorbants d'UV (EVA-LD), mais il n'est pas impossible que la durabilité dans le temps des films obtenus ne soit, elle aussi, fonction inverse de la richesse en AV de la résine: un EVA trop riche en AV supporterait moins bien la charge anti-UV.

A.3. Les Polyéthylènes Infrarouge (PE-IR) (ou PE modifiés)

La résine PE de base est, dans le cas de ce matériau, enrichie en Silicate d'Aluminium ou en Silicate de magnésium. Les films obtenus possèdent un effet "thermique" certain, mais divers inconvénients sont liés à l'emploi à trop fortes doses de ces "charges thermiques"; par exemple, les impuretés du Silicate d'Aluminium provoqueraient un vieillissement trop rapide du film.

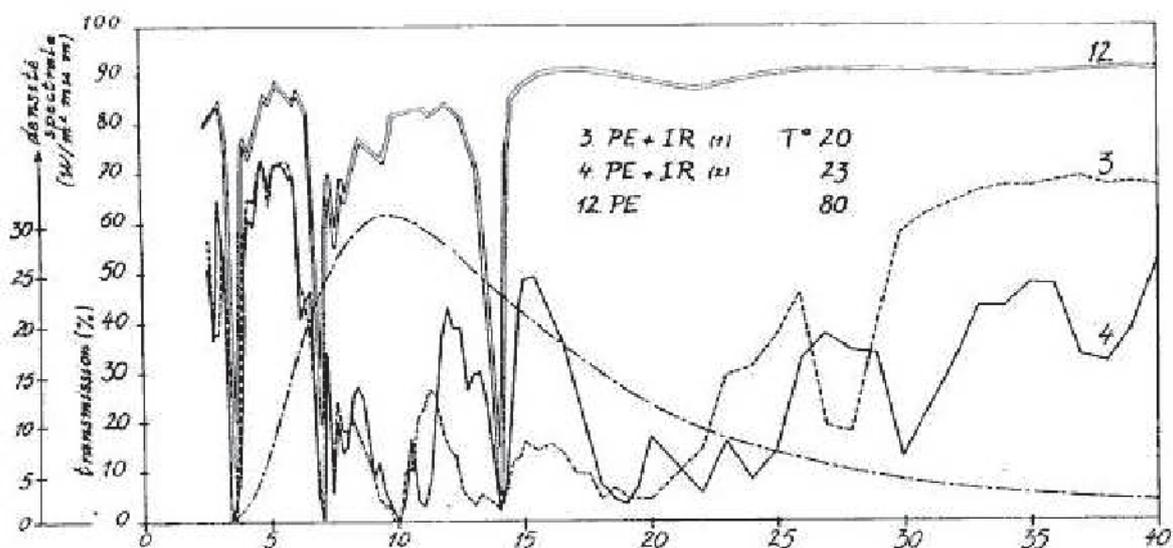


Fig. II.9 Facteur de transmission monochromatique dans l'IR long d'un PE "normal" (12) et de deux PE-IR différents (3 et 4).

Comme dans le cas de l'adjonction d'AV, il n'est pas possible d'obtenir un matériau qui allierait une grande opacité aux IR Longs à une excellente transmission dans le solaire et à de bonnes propriétés mécaniques. S'ils veulent assurer une transparence et une longévité suffisantes aux EVA, les fabricants sont donc contraints de réduire les charges IR à des niveaux de concentration qui ne permettent pas l'absorption totale des IR longs. En général, la concentration en charges IR ne dépasse pas 5 à 8 %.

La comparaison des figures ci-dessus montre que l'AV et les charges thermiques absorbent chacun, préférentiellement, certaines parties du spectre IR long.

A.4 Les Polyéthylènes thermiques' (ou EVA chargés)

Ni l'AV ni les charges IR ne semblent, seuls, susceptibles d'apporter de solution réellement satisfaisante au problème posé, à savoir créer un film PE de durabilité suffisante mais absorbant totalement l'IR long.

C'est pourquoi une génération de PE est née ces années qui, dans l'esprit de leurs créateurs, devraient pouvoir présenter les avantages simultanés des EVA et des PE-IR sans en posséder les inconvénients. Effectivement, quelques films dits "thermiques" ont une transparence plus faible aux IR longs que les PE-IR et les EVA: ils sont fabriqués à partir de résine PE-BD enrichie simultanément en VA et en charges thermiques, chacune des substances étant ajoutée à la dose jugée optimale par le fabricant.

Les résultats pratiques obtenus récemment avec certains de ces films apparaissent très prometteurs. Il est enfin intéressant de noter que deux PE thermiques différents peuvent montrer des courbes d'absorption, et par conséquent une valeur pratique, horticole, très différentes selon la nature des charges thermiques utilisées lors de leur fabrication et des doses d'AV qu'ils contiennent.

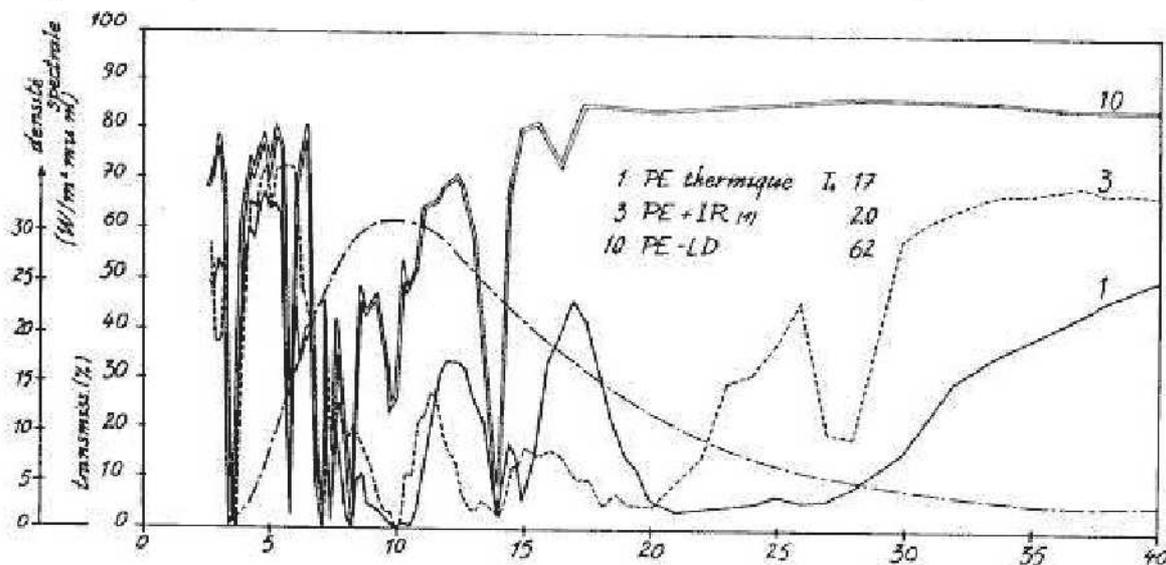


Fig. II.10 Facteur de transmission monochromatique dans l'IR long d'un PE-LD (10), d'un PE-IR (3) et d'un PE thermique (1).

B. Films non à base de Polyéthylène

Un certain nombre d'autres films ont été mis dans le commerce. Le plus ancien est certes le Chlorure de Polyvinyle (Polychlorure de vinyle) (PVC) ; mais il en existe bien d'autres comme :

- le Poly-fluorure de Vinyle PVF ou (PF)
- le Polyéthylène téréphtalate (Poly téréphtalate d'éthylène ou polyester)
- ainsi que divers autres Polyesters.

De nouveaux matériaux (Polystyrène, Polyuréthane) sont parfois proposés à l'horticulteur: ils possèdent une nature chimique tout à fait originale, ou une meilleure résistance mécanique, ou une transparence plus élevée au rayonnement solaire, ou une longévité plus grande ou enfin une transmission plus faible dans l'IR long. Ces matériaux sont, jusqu'à ce jour, peu sinon pas utilisés en méditerranée mais ils pourraient acquérir plus d'importance au cours des années à venir.

Il faut d'ailleurs observer que les propriétés de transmission pour le visible et l'IR long solaires varient au fond très peu d'un matériau à l'autre et que, leur composition chimique n'étant pas généralement divulguée, l'utilisateur est contraint de faire confiance au producteur et d'accepter les valeurs de transmission de l'IR long qu'il propose.

Il va de soi que l'établissement d'un "label de qualité" méditerranéen pour les films commercialisés (PE inclus) serait bras utile à l'horticulteur et lui éviterait bien des difficultés.

Le facteur de transmission de ces matériaux pour le rayonnement solaire étant très peu différent, ce seront surtout leur vitesse de vieillissement, leur absorption (ou réflexion) de l'IR long et leurs caractéristiques mécaniques qui détermineront leur aptitude à couvrir valablement des serres. Notons cependant que certains matériaux, qui par ailleurs s'avéreraient excellents en horticulture, ne peuvent pratiquement pas être utilisés parce que produits en films de largeur trop réduite.

Deux matériaux assez différents des PE classiques et déjà connus depuis longtemps font actuellement l'objet d'une étude approfondie de la part des firmes qui les commercialisent: le Fluorure de Polyvinyle, mieux connu sous le nom de « Tedlar » et un Polyester (ou Polyéthylène téréphtalate) commercialisé sous le nom de « Terphane »; ils sont très susceptibles de trouver bientôt un regain d'intérêt sur le marché, étant donné leurs excellentes caractéristiques radiométriques, pour autant que leur prix soit abordable.

B.1. Le Chlorure de Polyvinyle (PVC) (Polychlorure de Vinyle)

A l'encontre du polyéthylène, le polychlorure de vinyle (PVC) n'est pas naturellement souple (il sert à fabriquer par exemple des tubes rigides). L'addition de plastifiants donne le polychlorure de vinyle plastifié: (P-PVC) qui peut être transformé en films soit par calandrage (largeur limitée à 2 m), soit par extrusion-gonflage (largeur jusqu'à 6,50 m), La migration des plastifiants peut entraîner un vieillissement relativement rapide.

Dans les régions méditerranéennes, les films P-PVC sont surtout utilisés en couverture de petits tunnels (50 à 80 microns).

Les films P-PVC armés sont parfois utilisés pour garnir des parois complexes, comme le haut de pignons des serres-tunnels, en raison du fait qu'ils sont aisés à souder.

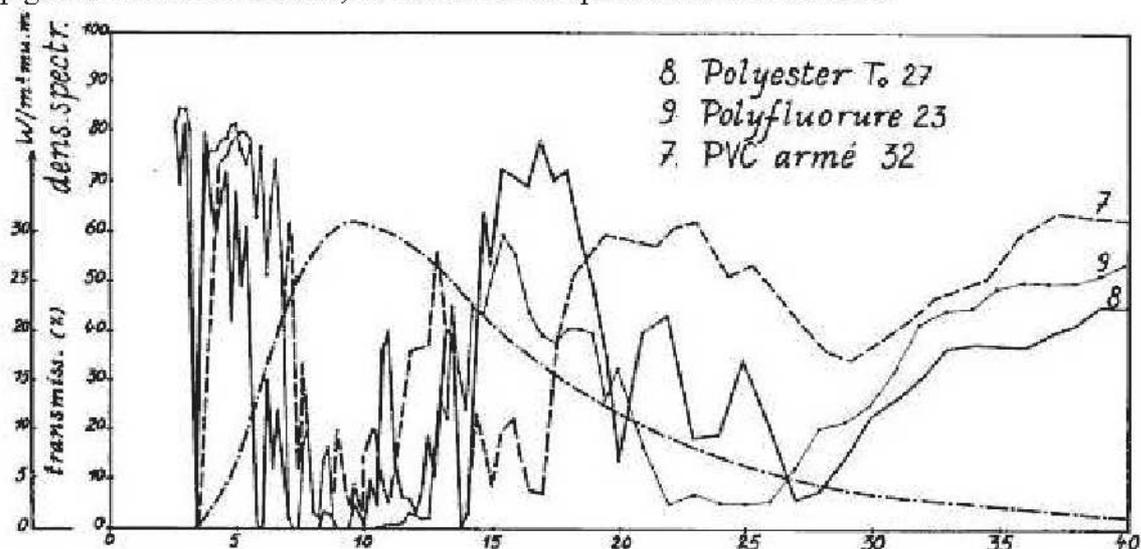


Fig. II.11 Facteur de transmission monochromatique dans l'IR long d'un Fluorure de polyvinyle (9), d'un Polyester (Polyéthylène Téréphtalate) (8) et d'un PVC (7).

L'utilisation des « textiles » en agriculture a pris une extension spectaculaire qui n'est pas généralement bien reconnue.

Les « géotextiles » sous diverses formes comme : tissés, tricotés, non-tissés, thermo-fixés, thermo-liés, ...etc. en Polyéthylène (PE) ou en Polypropylène (PP) sont utilisés en agriculture dans le drainage, l'emballage, les écrans thermiques et les toiles d'ombrage pour serres, tout autant qu'en « bâche plat » (film non supporté). Ces types de géotextiles sont actuellement appelés des « agro-textiles »; les plus utilisés en horticulture sont généralement des non-tissés, fabriqués selon le principe du filage direct et du thermo-soudage. Certains Polyamides (PA) et Polyesters entrent aussi dans la fabrication de ces agro-textiles.

Les agro-textiles sont très légers, minces et souples; ils présentent généralement une bonne homogénéité et une forte porosité qui n'est pas localisée comme c'est le cas chez les films perforés mais mieux répartie l'échelle des liaisons inter-fibres. Cette combinaison de propriétés permet aux non-tissés d'être utilisés pour le semi-forçage puisqu'ils montrent toutes les caractéristiques (résistance mécanique, perméabilité aux fluides et au rayonnement) exigées d'un écran thermique pour créer un effet de serre.

Des mesures ont été faites entre 2 et 50 microns pour l'infrarouge et 0,2 à 0,7 microns pour le visible et l'UV. En moyenne, les couvertures agro-textiles transmettent fortement le rayonnement solaire (surtout les PP et certains PA) (80 à 90 %) et arrêtent de façon efficace les IR, ce qui donne un bon effet de serre (20 à 30 % de transmission).

Selon les experts, ces matériaux ont un bel avenir devant eux en agriculture.

C. Matériaux rigides de couverture de serre

Ces matériaux peuvent se présenter en simple ou en double paroi. Dans le dernier cas, il va de soi que la transparence à la lumière de la couverture qu'ils forment risque d'être réduite dans une

certaine mesure. Par contre, leur absorption dans l'IR long est généralement bonne (Polycarbonates) ou même totale (verre, Polyester, PMMA (Poly-méthacrylate de Méthyle).

C.1. Le verre

Chacun connaît le verre à vitre (étiré ou flotté) et le verre cathédral (imprimé, diffusant). Ces deux produits possèdent la même matière de base; seule leur présentation diffère. Le premier est appelé, ici, « verre horticole » (VH).

Bien que certaines études ont été faites ces dernières années en ce qui concerne leur comportement en couverture de serre, les utilisateurs restent partagés et attribuent souvent au verre imprimé des propriétés diffusantes qu'il ne possède que partiellement, ou pratiquement pas. Cependant ces deux types de verre, absorbant totalement l'IR long, sont bien transparents pour le rayonnement solaire et présentent de façon très nette l'effet de serre associé d'ailleurs depuis toujours dans son principe à leurs propriétés.

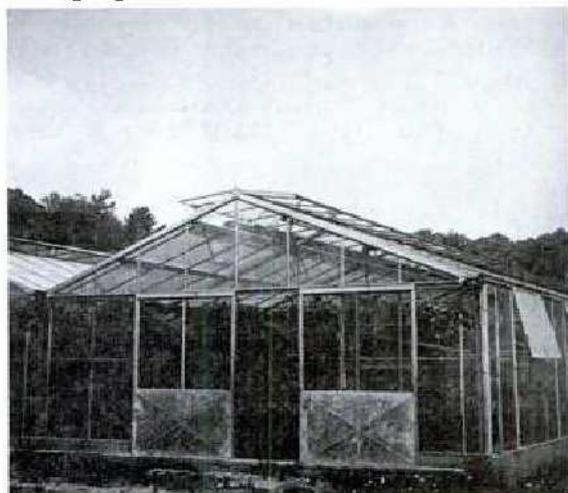


Fig. II.12 Deux types de serre en verre.

D'autres types de verre sont actuellement mis sur le marché. Particulièrement performant apparaît, en climat méditerranéen, par ciel clair et vent modéré, le *verre à couche* (coated glass) ou *verre à faible émissivité* (VH+) qui, pour un supplément de coût très limité, peut présenter un pouvoir isolant voisin de celui de la double paroi vitrée étanche; celle-ci est certes d'un prix et d'un poids par unité de surface nettement plus élevés.

N.B. - La couche « réfléchissante » pour les IR, qui donne au VH+ ses propriétés de faible émissivité, peut être dirigée vers l'extérieur de la serre (VH+1.1) ou vers l'intérieur de celle-ci (VH+1.2). La conductivité du matériau n'est pas la même dans les deux cas (fig. II.13).

Le verre, surtout s'il est traité en surface (coated glass) apparaît comme tout désigné pour recouvrir les serres destinées à protéger des plantes ornementales dans les climats les plus froids.

C.2. Les Polyesters armés de fibres de verre ou (PRV) (polyesters renforcés)

Les polyesters renforcés, armés le plus souvent de fibres de verre, constituent une famille de matériaux assez polymorphes et difficiles à caractériser au niveau de l'utilisateur. Ils résultent en effet de l'action d'acides sur les alcools polyvalents et le grand nombre de chacun de ceux-ci (qui peuvent intervenir pour constituer un produit valable) joint d'ailleurs à La diversité des présentations possibles des fibres d'armature, font en sorte que les propriétés horticoles des produits obtenus sont éminemment variables.

Pour les serres, il est indispensable de choisir des fabrications *spéciales serre* présentant à l'origine une transmission lumineuse globale d'au moins 80% (au lieu de 60 à 65% pour les fabrications « bâtiment ») et certifiées susceptibles de ne pas perdre plus de 20% de cette transmission après 10 ans d'exposition (garantie décennale). Cela implique des résines de haut de gamme et une excellente protection en surface:

- Gel-coat acrylique.
- ou bien revêtement de fluorure de polyvinyle,
- ou de polytéraphalate d'éthylène.

En général, les polyesters sont souvent moins transparents que le verre (peut être parce que plus diffusants); ils seraient appelés cependant à un avenir meilleur en Méditerranée si leur prix sera toujours compétitif mais surtout s'ils n'exigeaient pas des structures pratiquement aussi fortes que celles destinées à supporter le verre, et si leur stabilité dans le temps sera accrue.

Le désir d'améliorer le bilan thermique des serres recouvertes de polyesters conduit logiquement à promouvoir l'utilisation de plaques planes plutôt que des plaques ondulées (qui possèdent une surface d'échange plus importante), mais cette utilisation préférentielle implique l'emploi de charpentes plus rigides: le matériau *plan* exige, en effet un support plus important et mieux réparti.

C.3. Les doubles parois

Divers matériaux sont présentés à l'heure actuelle par les fabricants, sous forme d'une double paroi formant un volume étanche (à base de verre) ou non étanche (à base de produits de synthèse). Leur pouvoir isolant est réel mais décroît de façon perceptible lorsque le manque d'étanchéité du volume augmente. D'un autre côté, si les doubles parois relèvent les basses températures nocturnes ; elles relèvent tout autant sinon davantage les maxima thermiques diurnes, ce qui peut s'avérer très désagréable pour l'horticulteur.

C.3.1. Doubles parois en verre:

D'un intérêt indéniable en climat septentrional ou continental, ces volumes, parfaitement étanches et donc relativement coûteux, apparaissent comme d'un emploi limité sinon nul en région méditerranéenne.

C.3.2. Doubles parois plastiques:

Comme dit plus haut, ces matériaux doubles parois sont formés de deux feuilles de plastique rigide reliées à intervalles réguliers par des cloisons servant d'entretoises qui délimitent, avec les parois extérieures, des canaux de sections diverses. Ils sont obtenus par extrusion et sont en principe de longueur indéfinie. Ces produits sont très différents des doubles parois en verre, surtout en raison de la présence de ces entretoises qui leur assurent une bonne rigidité.

Les doubles parois plastiques ont été vulgarisées dans le monde horticole sous le nom de « stegdoppelplatte » (SDP) par un fabricant qui met en vente un matériau en polyméthylméthacrylate (PMMA). Cependant, d'autres résines peuvent être utilisées pour former des matériaux de présentation similaire; leurs propriétés photométriques et thermiques sont pourtant assez différentes: Polycarbonates (PC) et Polypropylène (PP).

Bien que des essais ont été tentés avec succès, notamment PMMA au Kuweit, il est à prévoir que, vu leur prix, ces matériaux ont moins d'avenir que ceux évoqués ci-après.

C.3.3. Les doubles parois fortes de films plastiques

Le désir des horticulteurs de cultiver en serre même à contre saison (hiver) les a conduits à utiliser, en couverture de leurs serres, des doubles parois formées de films plastiques (le Polyéthylène, principalement).

Dans certaines conditions, ce sont les agriculteurs eux-mêmes qui **bricolent** une double paroi: ils imaginent un système leur permettant de fixer un second film à quelque distance du premier. Il leur arrive aussi de fixer horizontalement, à 1 m environ du faite du tunnel et en le laissant retomber le long des pignons, un second film transparent qui joue le rôle d'écran thermique lorsqu'il est susceptible d'être mis en place (déplié le soir et replié le jour).

Dans d'autres conditions, c'est le fabricant de serre qui a mis au point un système de double paroi, dont les deux films sont maintenus écartés l'un de l'autre soit par la tension qui est exercée sur eux, soit par insufflement d'air (inflated double-skin). Il va de soi que, bien que très intéressant à beaucoup de points de vue, ce dernier système voit son utilisation limitée à certaines zones du Bassin Méditerranéen en raison de son prix de revient et de la nécessité de disposer d'électricité dans la serre.

2.2.2 Propriétés des Matériaux de Couverture

Les principaux matériaux utilisés en couverture de serre en région méditerranéenne ont été caractérisés qualitativement. Dans le rayonnement solaire, les matériaux les plus utilisés étant totalement transparents ou à peine légèrement colorés, leurs propriétés radiométriques sont très peu

influencées par la longueur d'onde. Il en résulte que les valeurs calculées pour le visible, l'IR solaire, le solaire total et le PAR (rayonnement photosynthétiquement actif) ne diffèrent que de quelques pourcents.

En ce qui concerne l'IR long, on recherche les matériaux les plus absorbants et les divers films utilisés se singularisent par des spectres assez différents (fig. II.8 à II.11).

Partant de ces données monochromatiques, dont l'établissement pose peu de difficultés mais qui ne conduisent au fond qu'à une vue qualitative du problème, il importe de tenter d'obtenir des valeurs quantitatives qui possèdent une réelle signification agronomique. Les méthodes utilisées diffèrent d'un auteur à l'autre. Les résultats quantitatifs obtenus varient donc dans la littérature de façon très large, d'autant plus que, dans la plupart des publications, la nature chimique exacte des matériaux n'est pas précisée.

Il sera cependant fait état de la conductivité thermique K des matériaux ; les valeurs citées ont été obtenues selon la méthode proposée dans la publication NIJSKENS J. et al (1984): "Propriétés radiométriques et thermiques des matériaux plastiques". Ces valeurs du "K" des divers matériaux sont obtenues à partir de leurs propriétés photométriques et dans des conditions bien définies de climat (température intérieure et extérieure de la serre, nébulosité, vitesse du vent, ...etc.).

A. Facteur moyen de transmission des matériaux de couverture (Voir Tableau A.4 de l'annexe)

- Tous les matériaux présentés en simple paroi et destinés à la couverture des serres ont une transparence pour le rayonnement solaire direct pratiquement équivalente: tous se situent dans une fourchette de 5 % (92 à 87 %).

- le facteur de transmission pour le rayonnement solaire direct n'est réduit de façon sensible que dans le cas de matériaux spéciaux (VH+ verre A faible émissivité) ou présentés en double paroi (fourchette : 78 à 72 %). Le PMMA en plaque double paroi apparaît comme particulièrement transparent. L'influence de la couche à faible émissivité dans le cas d'un double vitrage de verre se fait également sentir (réduction de la transmission de 72 à 66%).

- certains PE sont légèrement colorés. L'influence de cette coloration sur leur spectre de transmission n'est pas nulle mais elle est pratiquement négligeable en conditions méditerranéennes (réduction de 2 à 3 % de certaines longueurs d'onde du visible).

- en ce qui concerne le facteur de transmission dans l'IR long des divers matériaux, il faut observer que les films sont généralement assez transparents, principalement le PE non chargé et que les plaques double paroi de Polypropylène (4 mm d'épaisseur: PP4) ne diffèrent pas sensiblement des premiers films cités, les autres matériaux absorbant pratiquement l'entièreté de l'IR long;

- le facteur de transmission pour la lumière diffusée par le ciel est sensiblement inférieur à celui correspondant au cas du rayonnement solaire direct, les matériaux étant en outre toujours moins transparents pour le ciel couvert que pour le ciel serein.

B. Coefficient de conductivité thermique K

Le coefficient k , d'expression apparemment simple, n'est pas d'une détermination aisée ni d'un emploi facile. Son estimation dépend d'un certain nombre de paramètres, matérialisant les conditions mêmes dans lesquelles elle est réalisée: température des espaces intersidéraux, température intérieure de la serre, température extérieure à celle-ci, vitesse du vent, ...etc., paramètres qui excluent bien souvent toute comparaison entre les valeurs proposées par différents auteurs.

D'un autre côté, certains matériaux de couverture des serres n'étant que partiellement opaques aux IR longs, la détermination mathématique de leur k implique que tous les termes du bilan thermique établi à cette occasion soient estimés à leur juste valeur, ce qui n'apparaît pas évident.

Enfin, il ne faut pas oublier que le k d'un matériau, estimé mathématiquement ou déterminé en laboratoire dans des conditions bien précises et statiques, n'est pas le k d'une serre dont les éléments de forme, d'orientation, d'étanchéité ...etc. s'ajoutent aux conditions climatiques très variables et dynamiques dans lesquelles se trouve la construction.

C. Dégradabilité des plastiques

Pour l'horticulteur, la durabilité idéale des matières synthétiques qu'il emploie est celle qui correspond au nombre de cycles culturaux qu'il s'est assigné de réaliser dans chaque cas particulier; 4, 6 et même davantage sous même couverture de serre en Europe (c'est à dire 3 ans ou plus) ou une seule saison de culture, dans le cas du paillage des principales plantes. Ce nombre de cycles est souvent déterminé par des raisons économiques.

Surtout en couverture de serre, on cherche à augmenter la *durabilité naturelle* des plastiques, mais il existe cependant des cas où l'on souhaite la réduire: c'est lorsque, après usage, il est intéressant que le film laisse aussi peu de traces de son passage que possible, pour ne pas gêner certaines pratiques culturales: labour après paillage du maïs par exemple.

La plupart des plastiques, et en tout cas les plastiques de grande consommation, (**commodity plastics** comme PE, PVC, PP, ...) sont en fait naturellement photodégradables sous l'action conjugué du rayonnement UV, de phénomènes d'oxydation, de la chaleur, de fatigues mécaniques ... Les films dits photodégradables (essentiellement PE) sont photo-dégradation programmée, l'adjonction d'agents spéciaux déclenchant un processus irréversible de fragilisation au terme d'une période d'initiation déterminée 30, 60, 90 ou 120 fois selon les besoins de la culture. Ils sont uniquement utilisés en paillage pour certaines grandes cultures: maïs, tomate de conserve, coton. Leur coût est augmenté de 5% environ par rapport au film PE ordinaire.

3. Tunnels bas et films plats

Les tunnels bas sont l'invention la plus spectaculaire introduite sur le marché horticole au cours des dernières années. La culture sous tunnels est généralement désignée sous le vocable *semi-forçage* de par sa position intermédiaire entre la culture en plein air et la culture protégée en serres. Les tunnels permettent d'intensifier la production moyennant un investissement peu onéreux. Ils contribuent l'accélération de la croissance de la plante, à l'augmentation du rendement et à l'amélioration de la qualité du produit.

Les premiers abris bas ont fait leur apparition en France au 17^{ème} siècle et c'est au Japon, en 1950, que sont nés les premiers tunnels couverts de plastique. En 1959, Faust déposa un brevet de cloche horticole en matière plastique perméable, qui était en fait constituée d'une armature en forme d'arc recouverte d'un film en plastique. Ce n'est qu'après 1960 que l'utilisation des tunnels commença réellement se répandre.

Le coût peu élevé, la facilité de construction et de mécanisation de la mise en place sont sans aucun doute les avantages que les tunnels ont sur les serres. Cependant, les difficultés de chauffer, d'aérer et d'accéder aux plantes en sont les inconvénients.

On peut remarquer que, en se convertissant à la plasticulture la plupart des pays adoptent les petits tunnels puis que, au fur et mesure qu'ils se familiarisent avec la technique et que les agriculteurs acquièrent la possibilité financière de se procurer des "walk-in" tunnels ou des serres, ils abandonnent ces petits tunnels en raison de leurs inconvénients non négligeables. Certains pays comme le Maroc, l'Algérie et, dans une moindre mesure, l'Espagne, ne sont cependant pas passés par cette phase transitoire du petit tunnel.

La technique de la bâche à plat (U.K.: « direct cover »; USA: « floating cover »), mise au point en Allemagne et en Belgique, semble très rentable sous les climats continentaux et convient à de multiples applications, spécialement en plein air. La feuille plastique non soutenue offre des avantages appréciables, notamment la simplicité, l'efficacité, la protection contre le vent et le froid, l'amélioration de la qualité, l'uniformité des récoltes, la protection contre les oiseaux et les pucerons, la précocité,... etc.

3.1. Structure et équipement

On peut comparer les tunnels bas à des serres en miniature, qui diffèrent cependant de celles-ci en ce sens qu'ils ne sont pas chauffés et qu'ils sont susceptibles d'être déplacés facilement. Il faut néanmoins remarquer que, malgré l'importance que revêtent dans certains pays les tunnels pour

l'utilisation horticole, les chercheurs se sont au fond montrés assez peu soucieux de résoudre les problèmes liés à leur construction et aux conditions climatiques qui les caractérisent.

De nombreux types de tunnels ont été créés, certains étant pourvus de structures de support, d'autres ne l'étant pas. Le type traditionnel de support consiste en une structure semi-circulaire, métallique ou en bois, recouverte d'un film plastique. Les supports, en bois, en fils de fer, en fils de fer plastifiés, en tubes plastiques ou métalliques sont placés à intervalles de 2 ou 3 m. Au Japon, on trouve également des supports en cannes de bambou arquées. Les tunnels sur arceaux ont fait leur apparition en 1956.

Les types de tunnels les plus fréquemment rencontrés sont:

a) Le tunnel Nantais. Il s'agit d'un tunnel double arceaux mis au point dans la région de Nantes, en France. Les arceaux métalliques sont enfoncés dans le sol à une profondeur de 30 à 40 cm. Le film en plastique est tendu sur les arceaux et retenu au niveau du sol par des anneaux. Dans certains cas, le bord est enfoncé dans le sol. Ce type de tunnel fait 40 à 60 cm de haut et 120 cm de large. Un type intéressant de tunnel est celui qui permet de faire glisser le film entre les arceaux afin d'assurer l'aération. Les frais de construction et d'entretien de ce type de tunnel sont peu élevés; ils offrent une bonne résistance au vent et conviennent particulièrement la culture de la fraise, du poivron, de l'aubergine et de la tomate (voir fig. II.14).

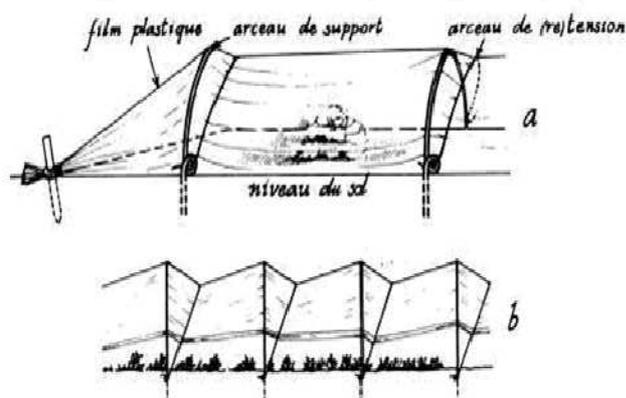


Fig. II.14 : à gauche ; Petit tunnel Nantais - vue latérale (a) et film en position d'aération (b).
à droite : Tunnel nantais.

b) Un système très semblable au tunnel Nantais mais **dépourvu d'anneaux** aux arceaux a été mis au point aux Etats-Unis et en Grande Bretagne. Il mesure de 30 à 40 cm de haut et de 60 à 90 cm de large, et sert protéger les cultures de fraises, de melons, de salades et de haricots. Les films plastiques sont maintenus par une corde fixée aux arceaux.

c) Un type de **tunnel très bas** (30 à 40 cm de haut et 40 à 50 cm de large), spécialement conçu pour la culture du melon et de la courgette. Ici, le film est tendu sur de petits arceaux en métal et maintenu sur le sol par des mottes de terre. Des trous, percés le long du sommet, assurent l'aération, La mise en place de la structure et la pose du film se font mécaniquement Il est possible de couvrir 1/2 ha en 8 heures.

d) Les tunnels **Pfalz** et **Knoblauchsländer**, structures pourvues ou non de système de faîtage, mesurant de 50 à 80 cm de haut et 3 m de large, ont été conçus et sont utilisés en Allemagne.

e) Le système californien de **row cover** met en œuvre deux laizes de film, de part et d'autre de la ligne de culture, le bas étant enterré dans le sol et le haut fixé à l'aide d'épingles linge sur un Ou plusieurs fils tendus entre des piquets; ce système permet d'ouvrir progressivement pour faire passage aux cultures hautes (tomate).

f) Un tunnel qui semble donner des résultats encourageants. C'est un système à parois doubles, gonflé au moyen d'un ventilateur et qui prend forme par la pression d'air (**inflated tunnel**).

La bâche à plat fait office de brise-vent et protège la plante contre les températures trop basses, le vent, la gèle, la pluie, les oiseaux et les insectes. Cette technique consiste à couvrir les plantes d'un film plastique aussi longtemps que les conditions atmosphériques le justifient. Dès que le temps

s'adoucissent, les plantes sont mises à l'air libre. Ce type de couverture ne requiert pas l'utilisation d'un support.

Cette technique permet évidemment d'employer des matériaux très légers, mais implique qu'ils soient suffisamment poreux à l'air et à l'eau: soit films PE 500 à 1000 trous par m² (4 à 8% d'aération, 46 g/m²), soit non-tissés (15 à 25 g/m²), généralement plus poreux mais mécaniquement moins résistants.

Après le semis ou la plantation, la bâche est directement étalée sur la culture de manière assez lâche pour que les plants puissent la soulever au fur et à mesure de leur croissance. La durée de couverture varie avec les espèces et les saisons.

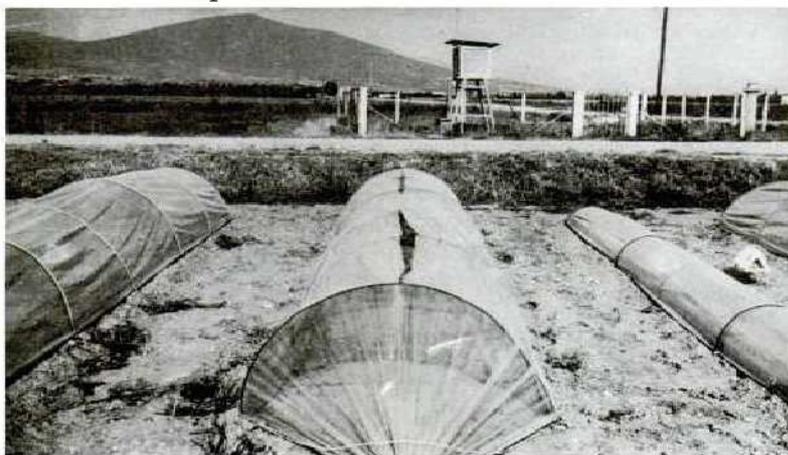


Fig. II.15 Un système simple d'aération des petits tunnels.

3.2. Utilisation des tunnels bas et des films non soutenus

Les tunnels bas et les films non soutenus (bâches à plat) ont donné des résultats positifs pour différents types de cultures et dans la plupart des pays méditerranéens. Le microclimat créé sous tunnel favorise le développement des racines et améliore la photosynthèse des plantes, ce qui, à son tour, a un effet positif sur la précocité, la qualité et la productivité. Le rendement financier s'en trouve accru.

Dans le cas d'utilisation de bâches à plats on peut avancer la récolte des laitues de 8 à 10 jours, celle des radis de 15 jours et celle des pommes de terre de 15 à 21 jours, ceci en conditions méditerranéennes moyennes.

4. Paillage

On peut considérer comme paillis des substances telles que le foin, la sciure, les spathes de maïs, la paille, ou des feuilles de plastique étendues sur le sol en vue de mettre les racines à l'abri des rayons du soleil, du froid, de la sécheresse, ou en vue d'éviter la souillure de certains fruits.

Le paillis est une technique vieille de plus de 300 ans. Les premiers paillis étaient constitués de débris végétaux et de fumier de ferme. À la fin des années 1920 et au début des années 1930, l'asphalte et le papier kraft furent utilisés intensivement aux Etats-Unis. Mais c'est l'apparition du film polyéthylène qui a causé le véritable essor du paillage, après 1950.

Dès 1955, les trois techniques utilisant des films plastiques en horticulture (paillage, petits tunnels et serres) ont été mises au point en Europe entre les degrés 47 et le 52 de latitude. Il s'est rapidement avéré que la région optimale d'utilisation de ces matériaux nouveaux correspondait, selon toute vraisemblance, à des climats plus ensoleillés. Les trois techniques sont donc parties à la conquête des régions plus méridionales.

4.1 Matériaux de paillis

Le paillis est une matière naturelle ou un matériau artificiel. Parmi les matières naturelles, on trouve des débris de bois tels que les copeaux et la sciure, de la tourbe, du fumier et des débris végétaux tels

que le foin, la paille et le compost. On peut aussi associer du fumier à du sable. L'épandage d'un paillis naturel exige une main-d'œuvre considérable.

Ces types de paillis présentent l'avantage de favoriser l'infiltration de l'eau dans le sol, de contribuer à y maintenir un degré uniforme d'humidité, d'alimenter le sol en matières organiques, d'améliorer la couche arable, de réduire l'évaporation de surface et d'empêcher la croissance de mauvaises herbes.

Ils présentent cependant certains inconvénients; en effet, ils requièrent une main-d'œuvre abondante, ils maintiennent dans certains cas la température du sol à un niveau relativement bas, et lorsque le paillis est constitué de paille, il arrive que celle-ci soit porteuse de graines qui risquent d'augmenter la population de mauvaises herbes.

Les matériaux artificiels comprennent le papier, le plastique, une combinaison de ces deux éléments, des feuilles d'aluminium et des émulsions d'asphalte. Tous ces matériaux connaissent ou ont connu un certain succès. Ils se prêtent mieux à la mécanisation que la plupart des produits naturels, peuvent être produits en grande quantité à des prix raisonnables et peuvent répondre aux exigences de chaque culture.

Le papier s'est avéré efficace, mais il est trop coûteux et trop fragile et il se détériore souvent avant la fin de la saison. La couleur et l'épaisseur du papier jouent un rôle important étant donné qu'il ne peut pas transmettre une quantité importante de lumière. L'application mécanique de bandes de papier n'est pas plus malaisée que celle de bandes de plastique. Le papier a l'avantage d'être biodégradable et de se décomposer lors de l'enfouissement. Le papier "Kraft" résiste aux champignons et retient l'humidité.

L'application mécanique de films plastiques est aisée et peu coûteuse. Ils maintiennent l'humidité et évitent l'apparition de mauvaises herbes. L'inconvénient majeur du plastique est qu'il est imputrescible et qu'il doit être enlevé et détruit à la fin de la saison. Divers types de plastiques ont été expérimentés mais ce sont les polyéthylènes transparents ou noirs qui donnent les meilleurs résultats au moindre coût.

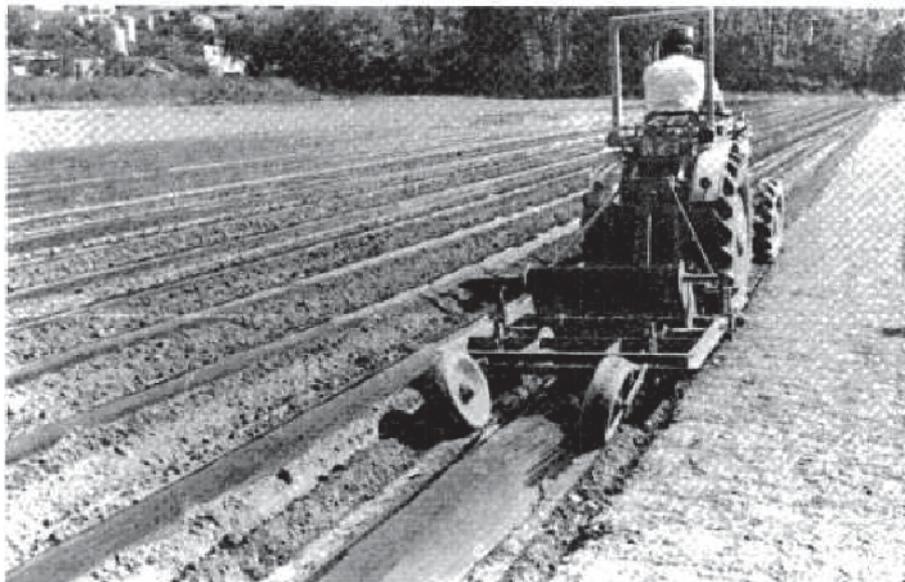


Fig. II.16 Application d'un mulch plastique au moyen d'un tracteur.

4.2. Utilisation de paillis synthétiques et organiques

Le terrain à pailler doit être labouré, amendé et préparé tout à fait normalement. Le paillis ne peut être appliqué que lorsque les conditions du sol le permettent; c'est-à-dire qu'il ne peut être ni trop sec ni trop humide. L'application précoce offre l'avantage de chauffer le sol avant la plantation.

L'épandage de matières organiques autour des plantes repiquées se fait lorsque celles-ci ont atteint 10 à 15 cm. Certaines de ces matières, telles que la paille et le foin, contiennent des semences de mauvaises herbes. D'autre part, leur teneur en azote est très faible et, au moment de la décomposition, elles absorbent une grande partie de l'azote contenu dans le sol. Il convient donc de

suppléer au déficit en N par l'apport d'engrais supplémentaire. En outre, l'épandage de matières naturelles ne peut s'effectuer de façon mécanique, ce qui entraîne le recours à une main-d'œuvre considérable.

Pour couvrir une ligne d'un paillis synthétique, il convient de creuser un sillon de quelques centimètres de profondeur de part et d'autre de celle-ci, à environ 25 cm de la ligne. Il faut alors tendre le film fermement et en recouvrir les bords au moyen de terre pour maintenir le film en place. Il est préférable de ne pas poser le film à plat car les plantes doivent de préférence être repiquées au sommet d'une butte (billon). C'est dans les régions très humides que le billon revêt toute son importance, car il permet d'éviter l'asphyxie du système racinaire.

Le paillage modifie l'environnement de la plante de façon significative et influence le développement des cultures au moment où les conditions de croissance sont les moins favorables. Il peut atténuer le stress que la plante subit par manque d'eau ou lorsque les températures de l'air et du sol sont basses. Le paillage aide également à combattre les mauvaises herbes, à réduire l'évaporation, le compactage du sol, le lessivage, ... etc.

4.3. Production

Le paillage influence la qualité, le rendement et l'époque de la récolte. L'amélioration de la croissance végétative est liée à l'élévation de température, l'amélioration de l'humidité et de la luminosité, au taux plus élevé de concentration de CO₂ et à une meilleure structure du sol.

Un paillis en matière plastique semble profitable aux cultures ayant un système racinaire superficiel et/ou aux cultures dont les racines tirent profit d'une élévation de température, d'une augmentation de l'oxygène du sol ou d'une humidité abondante à la surface du sol. Ce sont les cucurbitacées qui semblent profiter au mieux du paillage. Les racines de tomates plongent plus profondément dans le sol et s'étalent rapidement de tous les côtés de la plante jusqu'à 60 cm de profondeur au moins. Par contre, le système racinaire des cucurbitacées est très extensif et très développé, et il s'étend latéralement sur une profondeur de sol de 10 à 20 cm; en outre, très peu de racines importantes atteignent 50 cm de profondeur. Ceci explique pourquoi le paillage agit plus nettement sur les cucurbitacées à enracinement superficiel.

L'effet du paillage est le plus remarquable sur un sol sablonneux, à structure pauvre, pour autant que la température reste dans la normale et que l'irrigation supplée les carences de pluie. L'augmentation de la température du sol sous paillas stimule la croissance des végétaux.

De nombreuses expériences ont tenté de déterminer l'effet du paillage sur la production; ces effets sur la précocité et sur la production sont résumés au tableau II.2.

Type de plante	Gain en précocité (jours)	Augmentation de la production (%)
Tomate	5 à 10	10 à 50
Aubergine	15 à 20	50 à 200
Poivron	15	10 à 70
Fraisier	2 à 10	10 à 25
Melon	10 à 15	25 à 100

Tableau II.2 Effet de l'utilisation d'un mulch de polyéthylène sur différentes plantes.

5. Vieillessement

5.1. Vieillessement naturel

Comme pour la plupart des matériaux, les propriétés des plastiques évoluent assez souvent d'une manière défavorable et irréversible en fonction du temps.

Ce vieillissement naturel se manifeste parfois par un changement de couleur, d'ailleurs quelquefois imputable aux colorants dont ils sont les supports, par une fragilisation pouvant aller jusqu'à la fissuration de différents objets et même leur réduction en poussière, dans le cas des isolants des machines électriques. On peut signaler aussi l'instabilité latente de certains PCV qui stockés dans l'obscurité se colorent et dégagent des odeurs désagréables. Ce phénomène, après une période d'induction lente, s'accélérerait par l'apparition de peroxydes.

5.2. Vieillessement artificiel

Les causes principales de l'apparition rapide de ce vieillissement accéléré sont les tensions internes et souvent l'oxydation pendant la mise en œuvre, l'action ultérieure éventuelle de l'eau et de l'oxygène atmosphériques, l'effet des contraintes naturelles ou de service de différentes natures: radiante, thermique, mécanique, électrique et dans beaucoup de cas, d'une synergie dans leurs associations diverses.

On est arrivé à ces explications, grâce à des études effectuées dans des conditions assez bien définies sur des plastiques dont on a fait varier la composition, en ce qui concerne la résine et les autres constituants. Ces derniers comprennent surtout le lubrifiant, généralement indispensable et, éventuellement, le plastifiant, la charge, le colorant. La présence de ces adjuvants peut avoir un effet favorable (lubrifiant vis-à-vis des moisissures, verre alcalin dans les polyesters, colorants ioniques dans la fissuration du polyéthylène ou défavorable au vieillissement plastifiants dans le PCV).

Dans les études sur le vieillissement artificiel, en vue de comprendre le mécanisme du vieillissement naturel et de trouver ses antidotes, on a eu souvent recours à des essais accélérés, grâce à une intensification cependant modérée, des contraintes précédemment énumérées. Aussi le temps nécessaire à l'apparition du vieillissement a été considérablement réduit.

5.3. Vieillessement des matériaux de couverture des serres

5.3.1 Existence du phénomène

Le PE, PVC, verre,...etc. et tout les autres matériaux utilisés comme paroi des serres se vieillissent au cours du temps. Après certaine durée ; la déchirure du plastique, la casse du verre deviennent des étapes inévitable dans la vie d'une serre surtout lorsqu'elle est soumise aux conditions défavorables.

Parmi les problèmes causés par le vieillissement on trouve :

- Le jaunissement du matériau de couverture résultant du déplacement de bandes d'absorption, qui apparaissent dans l'ultraviolet (ce jaunissement s'observe notamment chez les polyéthylènes et les chlorures de polyvinyle et peut s'accroître jusqu'à une opacité quasi-totale);
- La microfissuration de la surface exposée au rayonnement solaire qui favorise le caractère diffusant et altère la transparence du matériau.

Ce phénomène de vieillissement est parfaitement illustré sur la fig. II.18.

Les rayons UV représente la cause majeure du vieillissement et l'altération des matériaux.

L'atmosphère absorbe les UV courts ce qui nous résulte que les UV long sont le vrai agent du vieillissement.

5.3.2. Mécanismes du vieillissement

Beaucoup de recherche ont été réalisés dans le sens d'expliquer le vieillissement. Dans ce qui suit nous nous intéressons à ce phénomène du côté horticole.

Comme déjà cité les UV long sont le facteur causant le vieillissement ; donc toute méthode tend à accélérer le vieillissement et fait appel à l'emploi des rayons de longueur d'onde inférieures à 300 μm conduit à des résultats qui de ne pas refléter les conditions naturelles et qui doivent être très strictement interprétés. La faible énergie relative des ultraviolets atteignant le sol explique également que seules les liaisons chimiques les plus faibles des matériaux puissent être rompues. L'absorption d'un quantum de radiations par une molécule met cette dernière en état excité. Au début, l'énergie se trouve localisée le plus souvent dans un électron particulier associé à un groupe chromophore. Cette énergie se dissipe ensuite en donnant lieu :

- soit à un processus photophysique: fluorescence, phosphorescence, énergie thermique, transfert d'énergie.
- soit à un processus photochimique: ionisation, formation de radicaux, cyclisation, réarrangement moléculaire,

Il est évident que le premier type de processus est généralement beaucoup moins néfaste au produit que le second. De plus, les possibilités de réactions sont limitées en raison du principe photochimique élémentaire, selon lequel la lumière doit être absorbée par le polymère pour que la réaction puisse se produire. Or la plupart des polymères synthétiques à l'état idéal ne présentent pas

d'absorption dans l'ultraviolet et ne devraient pas être affectés. En fait, la dégradation des polymères sous l'action des ultraviolets terrestres est due principalement à la présence de petites quantités d'impuretés ou défauts de chaînes, qui absorbent la lumière et amorcent des réactions d'oxydation en chaîne dans le polymère.

A part les UV ; nous avons d'autres facteurs qui causent le vieillissement notamment la température, l'humidité et l'oxygène. Des recherches effectuées ont montré que la température augmente la dégradation sensiblement par voie photochimique par la séparation d'une molécule en fragments et, dès lors, par la formation de radicaux ou d'ions.

Température

Il faut rappeler que suivant la relation d'Arrhenius, la vitesse d'une réaction physico-chimique double ou triple pour chaque élévation de la température de 10°C. D'autre part, une pointe thermique vers 200°C, peut couper certaines chaînes, comme le ferait une radiation UV. Enfin, les chocs thermiques engendrent des tensions mécaniques qui peuvent, comme les tensions internes préexistantes, amener la fissuration des résines, surtout si, comme pour le polystyrène, elles ont dans l'état rigide habituel, un faible allongement à la rupture.

Humidité

Parallèlement à l'effet thermique, il découle de ce qui précède, que certaines résines ont une tendance à une décomposition par l'hydrolyse, quand elles se trouvent en atmosphère humide et chaude.

Oxydation

L'oxygène de l'air en association avec des crasses atmosphériques, est probablement le facteur le plus important, on pourrait dire le plus insidieux du vieillissement d'un plastique, surtout en ce qui concerne la résine et le plastifiant. Cette oxydation se manifeste évidemment avec des intensités fortes différentes, suivant la température et l'ambiance artificielle que l'on peut définir, alors que cela est fort difficile pour une ambiance naturelle.

Les mêmes types de réactions se rencontrent dans la plupart des polymères et leur dégradation est particulièrement favorisée par diverses particularités de la chaîne moléculaire, provenant soit de procédés de polymérisation soit de la transformation ou de la mise en œuvre. À titre d'exemple, les chaînes moléculaires sont sensibilisées au vieillissement par :

- les branchements latéraux (carbone tertiaire).
- une instauration, soit en extrémité de chaîne, soit dans le corps de la chaîne (Polymères insaturés, tels que caoutchoucs synthétiques, polyesters insaturés, ... etc.).
- la présence de groupements carbonyles provenant, par exemple, d'une oxydation lors de la mise en œuvre.

5.3.3. Méthodes de lutte contre le vieillissement

Il convient d'éviter le vieillissement par l'emploi de matières de fabrication appropriée et d'utiliser dans l'horticulture des résines bien choisies. En effet, il y a des produits plus élaborés de PVC et de polyesters dont on peut prédire de très longues années de service avant l'apparition, dans une mesure gênante, des altérations signalées plus haut; c'est ainsi, dans le cas du polyéthylène, on est parvenu à prolonger la durabilité de certains fabricats de 6 mois à 3 ans, et, par d'autres techniques, à atteindre dans certains cas une résistance mécanique intéressante.

Il existe actuellement une large gamme de produits qui, incorporés en faible concentration au polymère, améliorant ainsi sa tenue dans le temps; parmi ces produits, les plus efficaces semblent être ceux dont les propriétés stabilisatrices sont liées à leur facteur d'absorption élevé dans l'ultraviolet proche. Ce sont les « absorbeurs d'ultraviolet ».

La qualité des stabilisants et des plastifiants conditionne la durabilité des fabricats en film PVC. Enfin, lorsqu'il s'agit de résines de qualité, on peut dans une certaine mesure améliorer la durabilité d'un film en augmentant l'épaisseur du matériau de couverture. Pour les polyéthylènes, l'épaisseur d'utilisation la plus rentable est généralement, d'après les spécialistes, de 0,17 à 0,18 mm.

5.4. Vieillessement du verre

Le vieillissement du verre se fait par le phénomène d'irisation lorsque l'eau s'introduit entre les feuilles de verre. C'est une dissolution des alcalis du verre en atmosphère confinée. Si la couche altérée devient épaisse ; il se forme des reflets colorés irisés à l'aspect d'une tache de pétrole. Le changement de coloration peut être causé par l'exposition aux radiations solaires (rayonnement UV). Par conséquent des matériaux (arsenic, manganèse, césium, antimoine,....etc.) changent de valence et provoquent le changement de couleur. En effet si les erreurs d'entreposage du verre sont évitées, si sa composition est idéale et si sa sollicitation est dans les normes ; le verre représente une excellente résistance aux agents atmosphériques de vieillissement.

5.5. Vieillessement du polyméthacrylate de méthyle (PMMA)

Ce matériaux est plus sensible à l'usure et à l'abrasion que le verre et aussi plus fragile. Pour son degré de coloration restant minime dans les différentes conditions climatiques ; le PMMA représente une résistance remarquable aux agents de vieillissement.

5.6. Vieillessement des polyesters

Les polyesters armés subissent une évolution de leur aspect quand ils sont exposés aux agents de vieillissement se traduisant par un jaunissement de résine, apparition des fibres de verre, sortie de ces fibres à la surface et plus ou moins la diminution de la translucidité. Les propriétés mécaniques sont influencées.

L'évolution de la température accélère l'action des radiations UV ce qui justifie le jaunissement des polyesters.

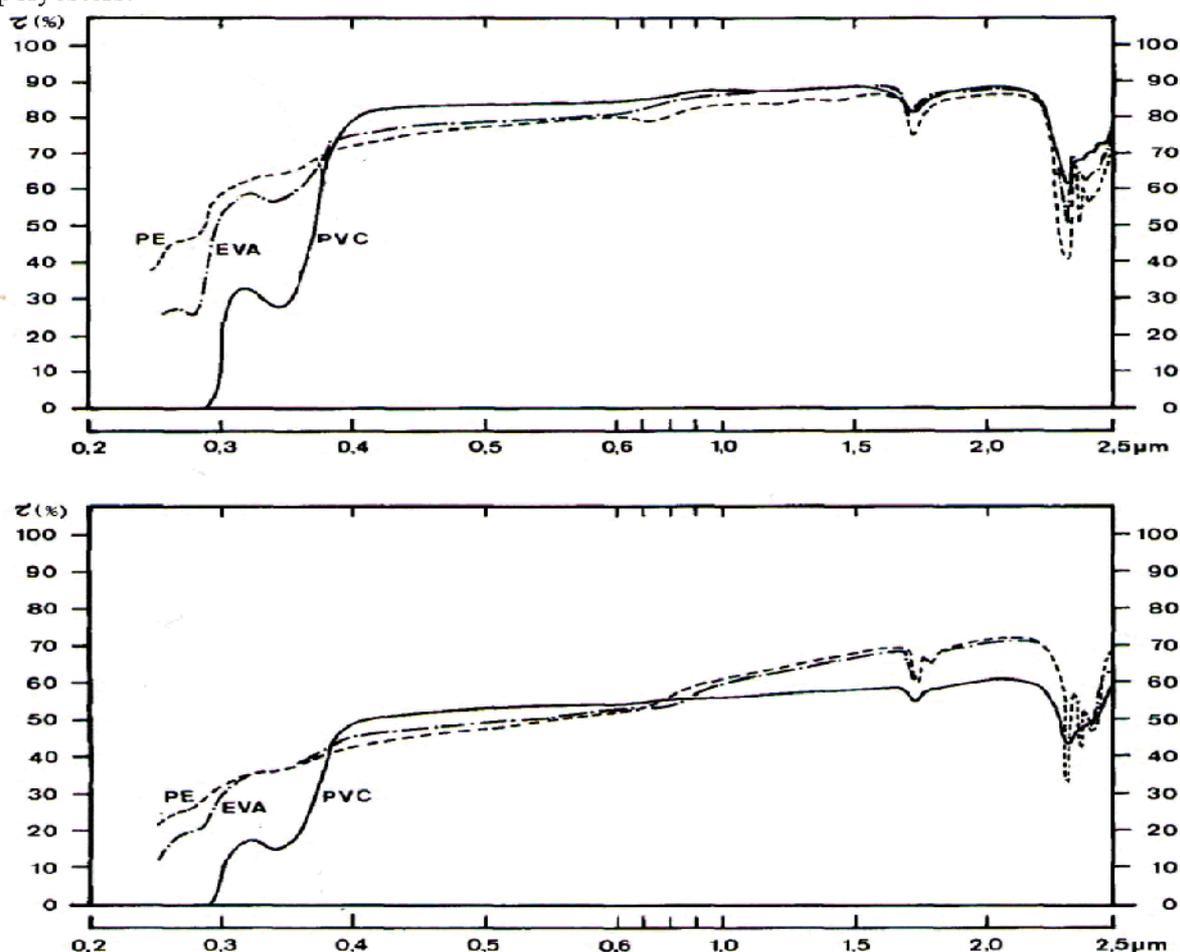


Fig. II.17. - Exemple de transmission de certains films de PVC plastifié, EVA et PE entre 0,2 et 2,5 μm à l'état frais (partie supérieure) et après quelques mois d'utilisation sous des conditions méditerranéennes ou tropicales (partie inférieure).

Des polyesters sont fabriqués suivant des critères très stricts pour répondre à la demande des horticulteurs exagérant une stabilité du produit allant de 3 ans à 8 ans et une garantie décennale.

5.7. Vieillessement du Polyéthylène (PE)

C'est la fabrication, la clémence du climat et aussi l'épaisseur qui commande la dégradation du film PE. Pour une épaisseur de 1mm la résistance du film PE est de 6 mois à un an et jusqu'à 2 ans pour les produit PE longue durée. Pour le PE c'est la transmission aux rayonnements solaires et les propriétés mécanique qui sont affectés. Pour l'IR ; la transmission est peu modifiée.

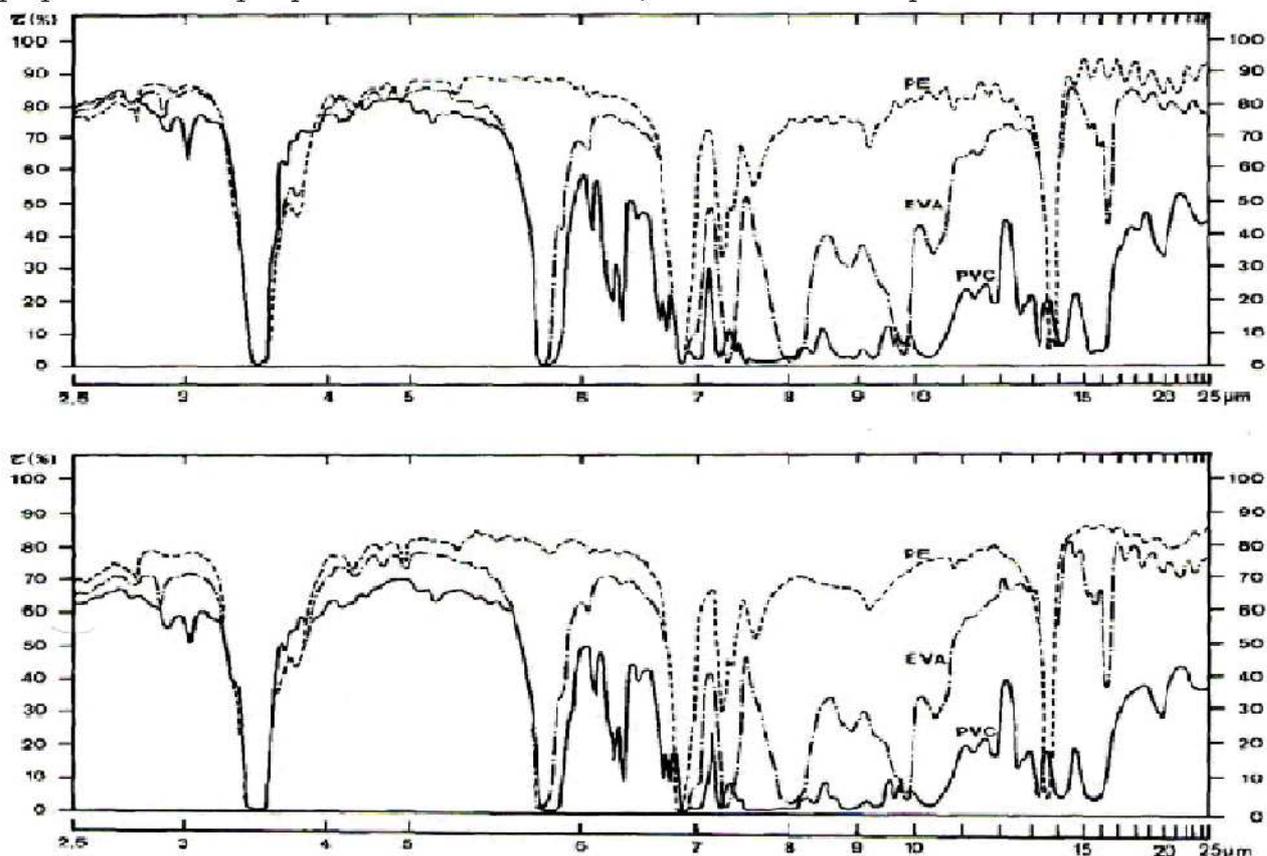


Fig. II.18. - Exemple de transmission de certains films PVC plastifié, EVA et PE entre 2,5 et 25 μm à l'état frais (partie supérieure) et après quelques mois d'utilisation (partie inférieure)

La comparaison entre les deux parties de la figure montre que même après quelques mois d'utilisation en conditions méditerranéennes ou tropicales, les modifications de transmission pour l'infrarouge sont assez réduites.

Nous remarquons que le PE haute densité résiste mieux que celui basse densité.

5.8. Vieillessement du Chlorure de polyvinyle acétate PVC

À haute température les doubles liaisons conjuguées se forment. Elle cause une coloration brune qui augmente l'influence des UV sur le matériau résultant donc le vieillissement. D'autre part ; l'oxygène peut être fixé par ces doubles liaisons ce qui conduit au blanchissement du produit connue sous « farinage du PVC ». Pour ce matériau ; la dégradation est généralement en surface. Elle est de quelques μm de 200 μm environ, suivant le produit et la durée du vieillissement.

En comparant entre le PVC et le PE nous constatons que le PE est attaqué en profondeur contrairement au PVC attaqué en surface.

Pour les films ; La durée de vie normale est un peu plus longue que celle du polyéthylène ordinaire. Elle peut être considérablement améliorée par l'emploi de certains adjuvants.

Pour les plaques ; L'altération des propriétés optiques et mécaniques s'effectue plus lentement que dans le cas des films. Les premières évoluent moins rapidement et les secondes de façon comparable

à celle des polyesters stratifiés cités plus haut. L'adoption de ce matériau comme couverture d'abri serait favorisée par la commercialisation de fabricats stabilisés permettant l'octroi de la garantie décennale.

5.9. Vieillissement du Polyéthylène acétate (EVA)

Les films de l'EVA ont apparu très récemment et leur durée n'est pas bien précise cependant les experts et les fabricants ont la estimé entre celle du PE et celle du PVC (un peu plus que PE et moins que PVC). Elle est de un an à un an et demi. Les films de la qualité ordinaire de ce matériau contiennent des absorbeurs des rayons UV.

Conclusion

Dans le monde des abris serre nous avons une diversité des sous abris suivant les matériaux de couverture et la structure architecturale de la serre.

D'après ce qui précède ; on peut déduire que les matériaux de couverture d'une serre jouent un rôle essentiel dans la culture sous abris. Les caractéristiques des polyéthylènes (PE) sont différentes de celles du PVC et du verre.

Pour le vieillissement des films ; nous retenons la conclusion suivante: l'énergie de rayonnement électromagnétique est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde, ce qui explique que les rayons UV sont les principaux responsables de l'altération des matériaux. Les UV courts sont davantage absorbés par l'atmosphère que les UV longs. Ces derniers sont les vrais agents de vieillissement des matériaux.

Chapitre III

Microclimat

1. Introduction

La maîtrise du climat est la raison d'être des serres ; on doit créer un environnement idéal pour la croissance des plantes. La gestion de la température des serres est contrôlée par la ventilation en cas d'excès. Si les températures baissent à un niveau inférieur à celui accepté par les cultures, on utilise de puissantes chaudières au gaz naturel ou au fioul ou d'autres moyens de chauffage pour élever la température. La distribution des calories à l'intérieur de la serre se fait par convection grâce à des tuyaux aériens, ou des aérothermes. La chaleur peut être distribuée en basse température (branché sur le retour du chauffage) par des tapis sous les tablettes de culture pour apporter une chaleur de fond.

La température peut également être gérée automatiquement par l'utilisation de toile d'ombrage. Quand les rayons du soleil sont trop ardents, ces écrans atténuent une partie du rayonnement solaire durant les périodes chaudes de la journée. A l'inverse, ils sont fermés la nuit pour piéger au niveau des cultures la chaleur venant du sol.

L'air et la température qui règne à l'intérieur d'une serre sont liés : plus l'air circule, plus la température de la serre va être proche de celle de l'extérieur.

Les plantes convertissent le dioxyde de carbone en oxygène durant la période diurne de la journée grâce à la photosynthèse. Pour augmenter la productivité de certaines cultures, il arrive que l'on fasse brûler du gaz propane dans les serres pour y augmenter le taux de gaz carbonique (CO₂).

Le contrôle environnemental des serres comprend le contrôle et la modification des températures jour et nuit, l'humidité relative, et les niveaux de dioxyde de carbone pour la croissance optimale de la plante. Les extrêmes de températures et d'humidité sont rencontrés pendant l'hiver et l'été. Une installation de production bien conçue fournira normalement un environnement avec des points de réglage de la température entre 12 et 30 °C, avec des niveaux d'humidité suffisamment élevée pour réduire le stress hydrique et suffisamment bas pour décourager les maladies et les épidémies comme tel champignon dans la plante. Puisque l'enrichissement en CO₂ est nécessaire ; 1000 µmol/mol est souvent considéré comme le niveau cible souhaitée.

2. Le chauffage de la serre

Le but du système de chauffage est de remplacer l'énergie perdue par la serre lorsque les températures extérieures sont inférieures à celle souhaitée dans la zone de culture sous serre. Idéalement, le système de chauffage doit avoir une sortie variable capable de répondre à la charge de chaleur causée par l'évolution des conditions climatiques extérieures.

La perte de chaleur d'une serre dépend de trois paramètres:

- 1)- de la surface de la serre.
- 2)- la localisation de la serre et des cultures cultivées.
- 3)- le taux de perte de la chaleur de la serre qui dépend largement du matériel de couverture.

Deux sont aisément déterminés. Le troisième est une approximation en fonction du vitrage et de son état et si des écrans thermiques sont en place ou non. Les pertes de chaleur vers le sol sont généralement négligeables par rapport à des pertes dans l'atmosphère. Elles ne sont pas généralement incluses parce que la différence de température entre la serre et le sol est faible et le coefficient de transfert thermique est relativement faible.

La perte de chaleur de conception est calculée en multipliant la superficie de la serre par la différence de température la plus attendus entre intérieur et extérieur et les coefficients de transfert thermique des matériaux de couverture des murs et de toit. Ce coefficient de transfert thermique de conception comprend les effets de l'infiltration et les pertes par rayonnement ainsi que la conduction et la convection. Comme les coefficients de transfert thermique varie selon les conditions météorologiques et les valeurs publiées sont généralement des valeurs moyennes, il

est prudent d'utiliser un facteur de sécurité dans la conception de la capacité du système de chauffage de serre.

Le différentiel de température de calcul (delta T) et la température minimale nocturne souhaitée pour la culture cultivée sont déterminés à partir des dossiers du Bureau météorologique ou d'expérience pour un certain endroit. Souvent, cela est une décision de gestion du risque. Par exemple, si la température design du site est de 5 °C et la température diminue à 0 °C pendant quelques heures par année, le producteur décide si la culture peut prendre quelques heures d'une température inférieure à celle souhaitée.

Pour déterminer la puissance du système de chauffage il faut estimer les besoins en chaleur de la serre. Ceux-ci sont fonction du coefficient global de consommation de chaleur K:

$$Q = A_H . K . (T_i - T_a) \quad [W] \dots\dots\dots \text{III.(1)}$$

Les besoins spécifiques en chaleur, exprimés pour 1 m² de serre (mesuré au niveau du sol de celle-ci) sont:

$$q = \frac{A_H}{A_G} . K . (T_i - T_a) \quad [W / m^2] \dots\dots\dots \text{III.(2)}$$

Où : Kcc : est le coefficient global de consommation de chaleur. [W / (m².k)]

A_H: est la superficie des parois de la serre. [m²]

A_G: est la superficie au sol de la serre. [m²]

T_i : la température souhaitée à l'intérieur de la serre. [°C]

T_a : la température moyenne minimum observée à l'extérieur de la serre. [°C]

Le coefficient K de déperdition de chaleur à travers la paroi de la serre dépend de la nature du matériau de couverture de celle-ci, de son étanchéité, du type de chauffage choisi, du système d'irrigation, de la vitesse du vent, de la couverture du ciel et des précipitations.

Dans le cas d'une serre recouverte de film plastique, on peut accepter les valeurs suivantes du K, estimées pour une vitesse moyenne de vent de 4 m/sec:

- Film simple: K = 6 à 7,8 (W/ m² K)

- Film double: K = 4,2 à 5,5 (W/ m² K)

En ce qui concerne les températures moyennes minimum observées à l'extérieur de la serre, il faut utiliser les valeurs standardisées dans chaque pays ou région, pour autant qu'il en existe.

En Allemagne elle est de -14 °C. Dans la plupart des pays méditerranéens, les températures moyennes minimum sont supérieures à cette valeur et égales à environ 0 °C et un peu supérieur à 0°C au sud de la méditerranée.

Exemple de calcul (condition de climat non venteuses): les besoins en chaleur d'une serre simple paroi dans laquelle il faut maintenir 12 °C à l'intérieure sont :

Si : T_a = -14 °C ; q = 1,5 x 7 (12 - (-14)) = 273 W/ m².

Si : T_a = 0 °C ; q = 1,5 x 7 (12 - (0)) = 126 W/ m².

La plupart des serres sont soit simple ou double couverture. Certains matériaux triple couverture sont vendus, mais la perte de lumière provoquée par la troisième couche du vitrage a limité leur application.

Le double vitrage de deux couches est constitué ; d'un film de polyéthylène de qualité à effet de serre, d'un verre double, ou à l'acrylique ou de feuilles de polycarbonate structuré. Le vitrage simple est souvent constitué de verre unique, film plastique unique, utilisé principalement dans les climats chauds, ou fibre de verre ondulé ou des panneaux de polycarbonate.

Les tests de laboratoire de chaque matériau indiquent des coefficients de transfert thermique différents.

Les pertes d'infiltration sont souvent relativement faibles en film plastique, sauf si la construction est très petite, mais peut être très important dans celles de verre anciennes, en particulier si les joints entre les panneaux de verre ne sont pas bien scellés. Dans pratique ; pour une bonne maîtrise de l'environnement, les coefficients de transfert thermique peut être utilisé pour la

conception conservatrice. Pour les serres de verre en mauvais état, un plus grand coefficient doit être utilisé. L'ajout de 10 % à la charge de calcul serre est normalement suffisante. Si une forte humidité et de la maladie semble être un problème avec des structures à double-vitrage très serré, certains concepteurs ajoutent aussi 10 % à la charge de calcul pour assurer la ventilation d'hiver.

2.1. Systèmes de chauffage à eau chaude

Traditionnellement, la plupart des serres en verre ont été chauffées par la vapeur ou l'eau chaude, qui est distribué à travers des systèmes de tuyauterie, situé normalement sous les bancs et le long des parois latérales et aux fins. Dans les serres de plus de 9 m de large, les températures les plus uniformes sont obtenues lorsque les tuyaux de chauffage sont placés sur le côté extérieur et les extrémités des murs avec une capacité de livraison de chaleur égale à la perte de chaleur de conception de ces murs. Pour le reste, avec une capacité de chauffage égale à la perte de chaleur conception par toiture, les tuyaux sont placés à la hauteur et espacés de façon uniforme sur toute la largeur de la serre.

Dans les serres crête et sillon ou connectés en gouttière, les tuyaux de chauffage sont placés à l'aérienne ou sous les bancs avec au moins deux manches placés près et sous chacune des gouttières afin de fondre des neiges ou des glaces dans le caniveau. Cela aide à garder la gouttière libre de glace, de sorte que l'eau va s'écouler du toit et ne s'accumulent pas (fig. III.1).

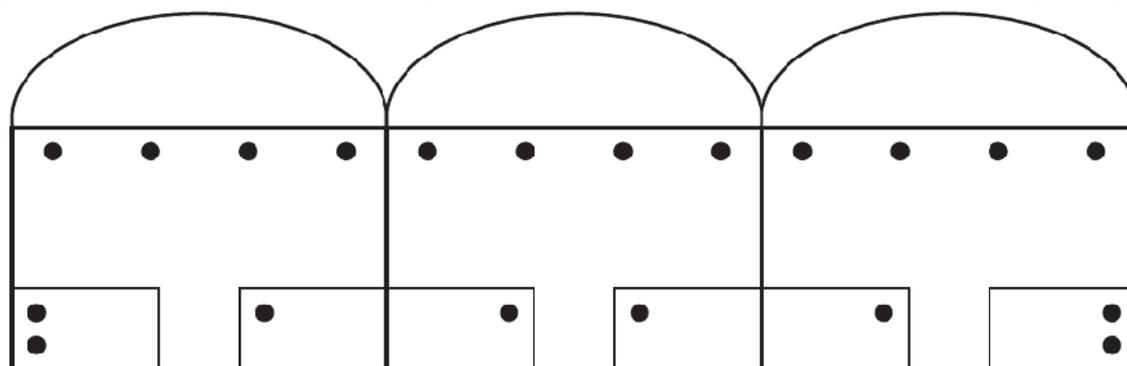


Fig. III.1. Emplacements d'installation typique pour les lignes de chauffage.

Les systèmes d'eau chaude sont préférés car ils sont plus faciles à contrôler que la vapeur. La température de l'eau circulant dans les systèmes d'eau chaude peut être contrôlée pour répondre à l'exigence de la chaleur à un moment donné. Cela donne plus de chaleur uniforme que la vapeur, qui est soit allumée ou éteinte.

Un avantage de la vapeur réside dans le fait que de grandes quantités d'énergie peuvent être réalisées sur de longues distances plus efficacement que ne peut être fait par l'eau chaude. Cela peut être un avantage si la chaudière est loin de point à chauffer. Dans de telles situations quand on peut utiliser la vapeur pour chauffer l'eau chaude des échangeurs dans la serre près du point de besoin on réalise les avantages des deux systèmes ; la vapeur fournit l'énergie au cours de la longue distance de la chaudière à l'échangeur de chaleur et le système d'eau chaude pour distribuer l'énergie uniformément dans toute la serre.

Dans la plupart des systèmes de chauffage à eau chaude ; les vannes à trois ou quatre voies mélangeuses sont utilisées. Ces vannes ont plusieurs avantages. Elles fournissent de l'eau à la température nécessaire à tout moment dans n'importe quel système dans la serre. Elles sont applicables dans les serres avec des systèmes de chauffage au sol et des systèmes de chauffage aux pipes en haut. Le système de chauffage du sol nécessite de l'eau chaude, habituellement dans la gamme de 25 à 50 ° C. Le circuit en haut nécessite l'eau beaucoup plus chaude surtout la chaleur maximale requise est dans la gamme de 80 à 90 ° C.

Les fig. III.2 et III.3 illustrent les caractéristiques de débit pour les systèmes utilisant les vannes 3 - et 4 - voies mélangeuses. En utilisant les vannes de mélange, la température de l'eau dans le système est contrôlée pour maintenir la température désirée à la serre. Les pompes de circulation

fonctionnant souvent en continu et maintiennent des températures beaucoup plus uniforme. C'est le cas avec les systèmes de circulation marche/arrêt.

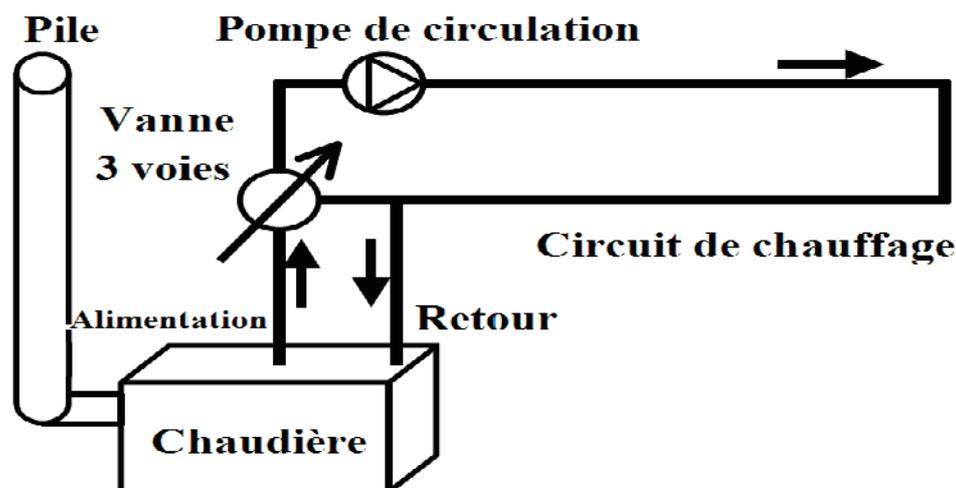


Fig. III.2. Installation type de système de chauffage avec une vanne à trois voies mélangeuse.

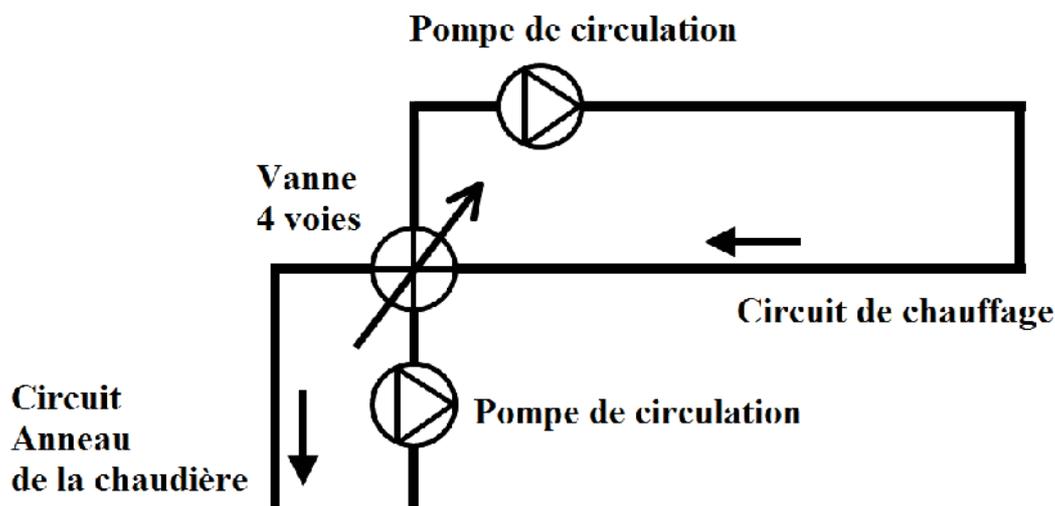


Fig. III.3. Installation type de système de chauffage avec une vanne à quatre voies mélangeuse.

Le tube standard 50 mm à ailettes a une sortie de haute énergie et ne doit pas être utilisé sous les bancs. Des concentrations élevées de chaleur provoque un séchage à des rythmes différents à la récolte sur le banc et finalement provoque la croissance des cultures inégales. Les tubes 50 mm à ailettes peuvent être utilisés au mieux le long des murs à l'extérieur ou à des lieux où la perte de chaleur est élevée. Des tuyaux de bas débit à ailettes spécialement conçu pour ces applications peuvent être placés sous les bancs, habituellement combiné avec l'eau à basse température.

La plupart des structures recouvertes en plastique sont équipées de systèmes de chauffage à air chaud en raison du faible coût initial et la facilité d'installation, et parce que beaucoup ne sont utilisés que dans des portions de l'année. Ces unités sont des brûleurs au pétrole, au gaz naturel ou au propane. Les unités fixées au sol ont souvent la sortie d'air chaud mobile prises à quelque chose qui peut être tourné pour diriger l'air chaud dans la serre. L'unité de gaz en suspension tiré peut être positionnée de façon stratégique dans la serre pour donner les variations des températures plus uniformes. Il convient de noter que les systèmes d'air chaud forcé sont intrinsèquement moins efficaces que les systèmes d'eau chaude modulée discuté ci-dessus.

Lorsque les chauffages ou sont situés dans la serre, un petit conduit d'air primaire de livraison doit être prévu pour délivrer l'air de combustion directement à l'unité de combustion. Les serres

modernes en plastique sont si serrés qu'il est possible d'utiliser l'oxygène dans la serre et de créer une situation dangereuse pour les travailleurs. Ce conduit doit fournir environ 0,033 m² de l'ouverture d'entrée pour 30.000 watts de la capacité de l'unité de chauffage. Cela assure une bonne combustion et peut réduire les coûts d'exploitation.

De nouvelles unités de chauffage à air chaud utilisent le concept de combustion séparé pour s'assurer que l'alimentation en air primaire pour la combustion est toujours adéquate et provient de l'extérieur. Pour ce type de construction de chauffage, l'air passe à l'intérieur de la serre par le côté de combustion de l'échangeur de chaleur.

Il y a eu quelques preuves pour suggérer que des traces de pesticides et de la forte humidité de l'environnement de la serre ont contribué à raccourcir la durée de vie des échangeurs de chaleur utilisés dans les unités de combustion du gaz suspendus. La combustion séparée a éliminé ces problèmes potentiels et considérablement augmenté la durée de vie des échangeurs de chaleur dans les appareils de combustion.

Les gaz d'échappement peuvent contenir du soufre et des traces d'éthylène qui peuvent détruire la croissance des plantes. Un dispositif d'extraction de l'air doit être joint à la partie supérieure de la cheminée d'échappement pour éviter le retour de l'air lors du vent violent.

Les nouvelles unités de combustion séparées, mentionné précédemment évitent le problème de retour des gaz d'échappement dans l'espace de la serre. Cela peut se produire sous des conditions venteuses quand les ventilateurs sont utilisés pour contrôler l'humidité dans le même temps que les appareils de chauffage fonctionnent.

Les systèmes de chauffage à air chaud et les systèmes de canalisations de chauffage d'eau chaude peuvent être comparés à des systèmes d'éclairage traditionnels. Le système à air chaud ressemble à un éclairage incandescent, et le système de canalisations d'eau chaude représente un système d'éclairage fluorescent. L'éclairage incandescent a l'énergie libérée en une source de place, et l'éclairage fluorescent a l'énergie libérée par une source linéaire. La même chose est vraie pour les systèmes de chauffage. L'énergie est libérée dans une chambre de combustion et doit être distribué dans toute la serre. L'énergie libérée dans un système d'eau chaude est libérée plus lentement sur une grande région et est donc mieux répartie.

Pour fournir un chauffage uniforme, plusieurs méthodes de distribution de chaleur sont utilisées. Certains systèmes utilisent les tubes en plastique, utilisés pendant de nombreuses années, pour transmettre l'air de ventilation entrant. Le tube en plastique varie habituellement de 60 à 75 cm de diamètre, est attaché à l'unité de chauffage, et sur toute la longueur de la serre.

L'air réchauffé sortant du radiateur est livré de façon uniforme partout dans la serre à travers les trous équidistants de 5 à 7,5 cm de diamètre espacés de 90 cm sur toute la longueur du tube. L'air chaud sortant quitte le tube approximativement dans une direction perpendiculaire et à une vitesse relativement élevée ceci cause un mélange en continu entre l'air chaud sortant et l'air ambiant de la serre. Ce processus tend à réduire la stratification des températures naturelles de l'air chauffé. Souvent, ces tubes en plastique sont placés sous les bancs de serre pour fournir un chauffage de la zone racinaire de la plante placés sur les bancs. Des jupes en plastique peuvent être placées sur les côtés des gradins pour encourager l'air chaud ascendant à passer à travers les cultures sur le banc, en réchauffant à la fois la zone racinaire et le couvert végétal.

Le flux d'air quittant un tube par une ouverture circulaire lisse peut être représenté comme suit :

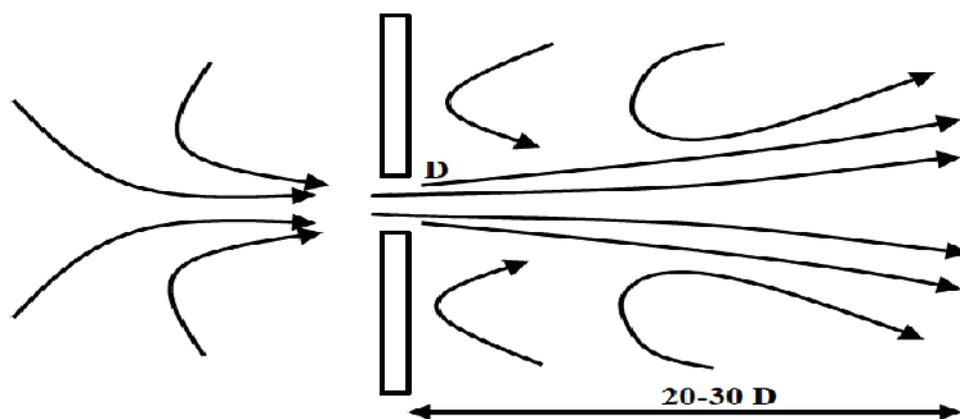


Fig. III.4. L'effet de mélange causé par le déplacement d'air à travers une petite ouverture contrôlée.

L'uniformité de la température a été raisonnable dans les serres en utilisant ce système de chauffage. Le succès de ce système a été attribué à l'action de mélange des jets d'air sortant du tube. La taille réelle du jet d'air s'écoulant à travers une ouverture en douceur sera d'environ 60 % de la superficie totale de l'ouverture.

L'évacuation de l'air s'étend de 20 à 30 fois de diamètres de l'ouverture. La fig. III.4 illustre comment l'air ambiant de la serre est entraînée par un jet d'air chaud, ce qui provoque un mélange intime. Les ouvertures dans les tubes doivent être disposées de manière à éviter que l'air affecte directement les plantes.

Le flux d'air horizontal créé par les ventilateurs de circulation peut également être utilisé pour réduire la stratification des températures verticales. Le système s'est avéré utile en grande serres, où le système de chauffage ne fournit pas une répartition uniforme de l'énergie thermique. Une conception soignée peut éliminer le besoin des systèmes de circulation d'air supplémentaires du système de chauffage pour fournir une distribution uniforme, en particulier avec le sol ou sous-banc chauffant.

La popularité rapidement croissante du chauffage de la zone racinaire (le plancher et le banc chauffant) a réduit le besoin aux systèmes de tubes aériens. Les sols chauds ou des bancs fournissent une chaleur uniforme dans la serre, assurent le déplacement modeste de l'air au niveau des cultures et à travers le couvert végétal et éliminent les microclimats de forte humidité et de basses températures. Les planchers chauds et les bancs en combinaisons au périmètre et au dessus des tuyaux de chauffage, éliminent la nécessité du système de tuyaux en polyéthylène à l'aérienne. Toutefois, la distribution uniforme de la température n'est pas toujours le seul paramètre de l'environnement affecté par circulation d'air interne.

Le mouvement d'air d'environ 45 m/minute peut également être utiles dans la prestation de CO₂ pour les plantes et réduire la diversité du microclimat à la surface des feuilles. Cette idée a également conduit à l'utilisation accrue des ventilateurs d'aire horizontale pour créer un mouvement d'air à travers le couvert végétal.

2.2. Flux d'air horizontal

Les ventilateurs d'air horizontal (HAF- horizontal air fans-) sont souvent utilisés pour faire circuler l'air à travers la canopée de la serre. Ses plus grands avantages sont :

- la création d'une température uniforme dans une serre s'il y a un système de chauffage non uniforme.
- l'amélioration de l'absorption du CO₂ et de la transpiration des plantes en réduisant la couche limite qui entoure la surface des feuilles.

La fig. III.5 indique le microclimat autour d'une plante typique en pot sur un banc de serre.

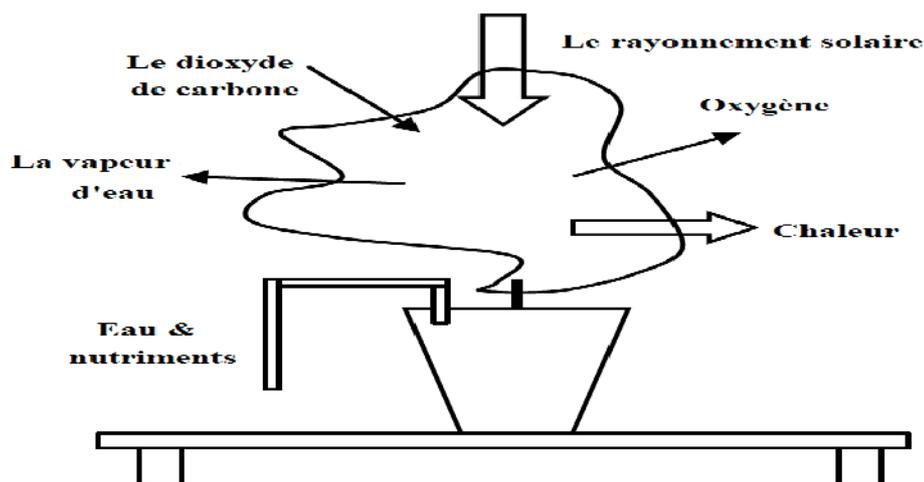


Fig. III.5. Processus d'une plante touchée par le mouvement de l'air.

Les HAF peuvent améliorer l'uniformité de l'environnement à travers la zone de production végétale en mélangeant l'air dans toute la zone de culture. La circulation d'air horizontale est créée au sein de la serre par le placement HAF. La capacité totale du ventilateur est d'environ 1 m³/min par m² du sol de la serre. Les ventilateurs protégés sont normalement montés pour la sécurité et relativement pour dégager l'air des pistes de course permettant la circulation continue. Les systèmes HAF peuvent être efficaces dans l'amélioration du microclimat et aussi la qualité des plantes. Ils créent des mouvements d'air dans le couvert de ces cultures sans oublier le bénéfice de chauffage de la zone racinaire.

2.3 Chauffage de la zone racinaire

Root-zone Heat ou le chauffage de la zone racinaire peut être accompli avec les systèmes de chauffage au sol ou au banc. Les systèmes de chauffage au sol utilisent le plus souvent des tuyaux en plastique coulé dans le béton ou le sable à travers lequel l'eau chaude est distribuée. Les bancs de chauffage utilisant les différents types de tubes ou tuyaux en plastique rempli d'eau en circulation à basse température ont également amélioré le microclimat sur des bancs. Le chauffage de la zone racinaire des cultures sous serres a été une pratique utilisée par les producteurs pendant une longue période. Dans les serres utilisant des systèmes de banc transportable, des tuyaux en acier placés sous la banquette sont utilisés comme zone racinaire et comme système de chauffage à air.

2.4. Chauffage radiant

Le chauffage radiant fournit de l'énergie à la plante d'une manière semblable à l'énergie thermique que nous recevons du soleil. Ce système utilise des unités de gaz brûlé placée aussi haut que possible dans la serre. Ce type de chauffage fournit de l'énergie rayonnante directement aux feuilles mais ne permet pas une uniformité à l'intérieure de la serre. Un rapport des chercheurs aux Pays-Bas a indiqué que dans certains cas, ce n'est pas un problème, mais qu'il peut être un problème pour certaines cultures sensibles à la température. Il est également difficile d'installer des systèmes de chauffage radiant en haut dans une serre existante qui utilise un écran thermique pour la conservation de l'énergie. Dans toutes les nouvelles installations ce problème peut être surmonté par la construction de la serre suffisamment élevée pour permettre à la fois les installer.

Une combinaison de chauffage par rayonnement et de chauffage de la zone racine pourrait être un système de production attractif pour les cultures avec une verrière horizontales, telles que les plantes en pot sur un banc ou sur le sol.

3. Ventilation

Le type de système de ventilation utilisé dépend, non seulement du climat de la zone, mais aussi sur les plantes cultivées, la longueur de la serre, et le montant du capital disponible. La ventilation peut être assurée par la séparation des feuilles de film qui se chevauchent pour créer des ouvertures de chaque côté de la serre ou sur toute la surface voûtée ronde. Des structures plus élaborées avec une ventilation de côté et en haut deviennent populaires dans de nombreux domaines. Une recherche au Royaume-Uni a montré que la ventilation des deux côtés de tunnel a été avantageuse pour un certain nombre de légumes et de cresson, car elle a amélioré le contrôle de température et d'humidité par rapport aux tunnels ventilés en ouvrant uniquement les extrémités.

Les ventilateurs peuvent être utilisés pour fournir des taux élevés d'échange d'air, et ainsi de maintenir les températures internes à des niveaux légèrement plus élevés (12°C) que ceux de l'extérieur. Cependant, ces ventilateurs ont besoin d'énergie électrique, et leur efficacité est faible dans les serres longues.

Les systèmes de refroidissement à ventilateur sont utiles dans les situations de désert chaud et ont permis une réduction de la température jusqu'à 12°C où l'humidité relative extérieure est d'environ 15%.

Bon nombre des principes discutés ci-dessus concernant la circulation d'air pour les systèmes de chauffage s'appliquent également aux systèmes de ventilation. L'Association « National Greenhouse Manufacturing Association » a élaboré des normes excellentes pour la ventilation et le refroidissement des serres. Ces principes et recommandations comprennent l'élévation du site, l'intensité du soleil, l'orientation et la forme de la serre et cultivassions des cultures.

Une ventilation de serre est nécessaire pour contrôler la température et les niveaux d'humidité et de fournir du CO_2 pour la production de bonnes récoltes. Il y a deux systèmes de ventilation de base utilisés dans la production sous serre ; le système de ventilation naturelle et le système de ventilation mécanique.

La possibilité de changer la taille des entrées est importante pour une bonne conception des systèmes de ventilation mécanique. Les fans de ventilation sont normalement contrôlés par des thermostats et dans certains cas par les périphériques de détection de l'humidité lorsque l'humidité relative est le paramètre de contrôle (par exemple, pour le contrôle des maladies).

3.1. Ventilation naturelle

La ventilation naturelle est entraînée par des différences de température (l'effet pile ou cheminée, aussi connu sous le nom tirage thermique) et/ou des conditions de vent créant de petites différences de pression d'air autour de la serre (effet du vent). Nous pouvons faire usage de l'effet cheminé quand il y a une différence de température entre l'intérieur et l'extérieur de la serre et un événement est ouvert pour permettre à l'air chaud de sortir et l'air froid de rentrer. Le plus grand potentiel de ventilation naturelle réalisé par l'effet cheminé est pendant l'hiver lorsque la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur de la serre est la plus grande. Malheureusement, cela se produit lorsque le besoin de ventilation est le moins. Les jours chauds d'été, la température extérieure peut être seulement légèrement plus froide que la température à l'intérieur. Ainsi, le potentiel de ventilation conduit par l'effet cheminé est pratiquement inexistant lorsque le besoin est le plus grand. La ventilation adéquate, naturelle pendant les périodes chaudes de l'été ne peut être réalisée que sur la base de l'effet du vent qui est souvent spécifiques au site. Les emplacements avec les brises naturelles offrent les meilleures possibilités pour la ventilation naturelle lorsqu'il fait chaud. Les brises naturelle et l'orientation correcte de la serre peut faire une excellente ventilation naturelle à certains sites. Toutefois, le vent peut être imprévisible dans certains endroits, et le contrôle de la température adéquate peut être difficile à atteindre. Évaluer les données météorologiques d'un site de serre proposée est essentielle pour concevoir des systèmes efficaces de ventilation naturelle.

La conception du système de ventilation Naturelle comprend l'exploitation manuelle ou automatique, les fentes latérales, les événements de toit, et/ou des événements de faîte construit comme une partie intégrée de la structure de la serre. Bien que difficile à installer, les structures faites en couverture de polyéthylène peuvent offrir de bonnes options pour une ventilation naturelle. Dans les serres connectées en gouttière ou en crête et sillon, des événements donnent de meilleurs résultats que les bouches qui s'ouvrent à la gouttière. Bien que les unités de gouttière sont plus faciles à reconstruire, ils ne réussissent pas aussi bien que les systèmes de crête.

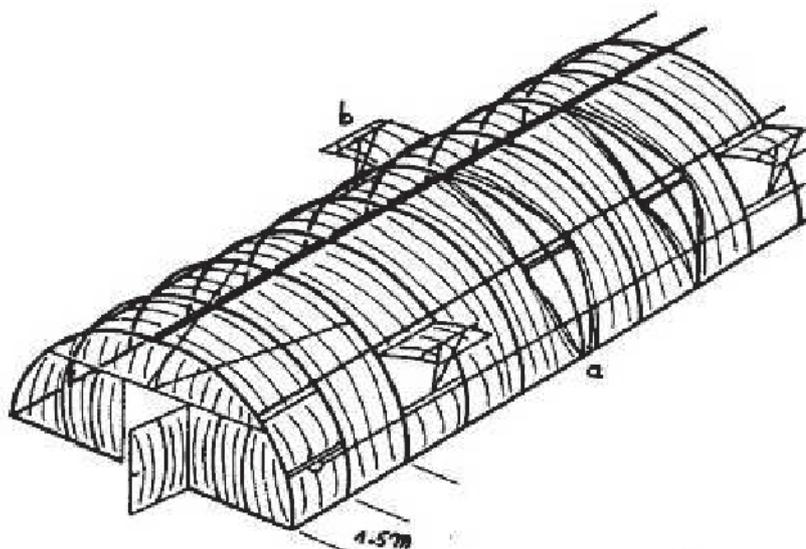


Fig. III.6 Aération Latérale des serres cintrées mono-chapelles.

L'investissement en temps requis pour le fonctionnement quotidien et l'ajustement, et la perte de contrôle, en particulier durant la saison froide, sont les plaintes les plus fréquemment mentionnées des systèmes de ventilation naturelle utilisant roll-up côtés (les cotés enroulés). Certaines serres en verre sont ventilées naturellement en utilisant les événements de toit et des côtés, d'autres utilisent des événements de toit seul qui peut agir en tant que deux entrées et sorties.

Serres sans vitrage :

Des conceptions différentes et nouvelles pour les climats chauds caractérisent des structures de serres sans vitrage. Elles sont conçues avec des écrans thermiques escamotables et offrent des possibilités excellentes pour le contrôle environnemental pendant les temps chauds. Le choix du site est important pour les considérations de chauffage lorsqu'on cultive toute l'année.

3.2. Ventilation mécanique

Les entrées bien conçues des systèmes de ventilation à fans peuvent fournir un excellent contrôle de la température en toutes saisons. La caractéristique la plus souhaitable est la facilité d'automatiser l'ensemble du système. Cela est particulièrement vrai lors de l'utilisation des systèmes informatiques de contrôle de serre. Les aspects négatifs des systèmes de ventilation mécanique sont le coût très élevés de l'installation et de l'exploitation et le bruit associé. Les systèmes de ventilation à fans sont conçus pour offrir une capacité maximale d'environ 146 m³/h à 183 m³/h par m² de la surface du sol. Si les écrans thermiques sont utilisés pour l'ombrage en été, 146 (m³/h)/m² est le paramètre modèle communément accepté. Il est généralement souhaitable de fournir cette capacité de ventilation avec plusieurs ventilateurs, à moins que la serre est très petite et le coût pour une telle installation serait trop élevé.

L'utilisation de plusieurs ventilateurs et/ou des ventilateurs multi-vitesses offre une facilité d'utilisation mieux que ventiler à un seul niveau. Celle-ci est une caractéristique particulièrement souhaitable dans les périodes les plus fraîches de la saison de croissance.

Dans tout système de ventilation la taille et l'emplacement des entrées et des sorties sont les considérations les plus importantes de la conception. L'air entrant dans la serre est toujours plus froid que la température à l'intérieur pendant les climats froids. Il est important d'obtenir un bon mélange de l'air entrant avec l'air ambiant de la serre, de sorte que la localisation des points froids ou des températures inégales ne soit pas ressentis dans toute la région de croissance.

La fig. III.7 illustre l'action de l'air se déplaçant à travers une ouverture restreinte et la distribution résultante et le modèle de mélange.

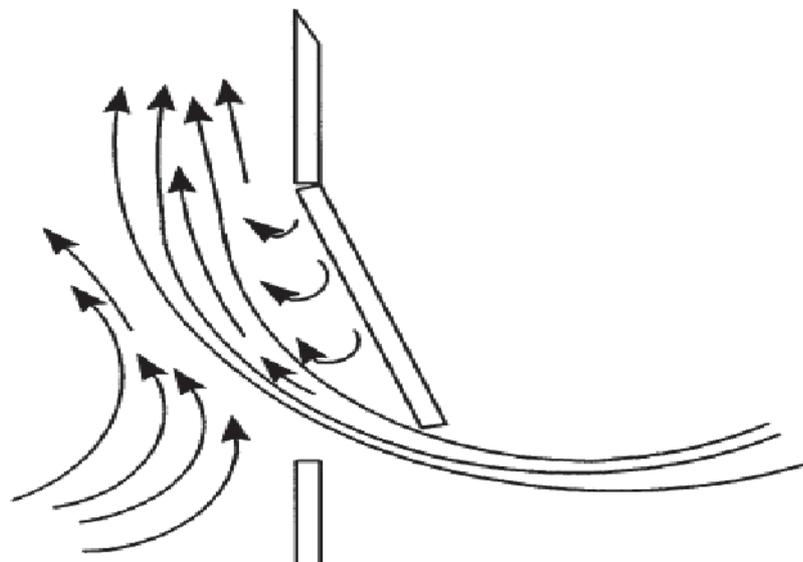


Fig. III.7. Schéma décrivant le mélange de l'air froid entrant avec l'air ambiant de la serre grâce à une ouverture de ventilation de contrôle.

Un mélange important entre l'air froid entrant et l'air de la serre ambiante est créé par l'air déplaçant relativement à vitesse élevée à travers l'ouverture. C'est similaire à l'utilisation d'un jet d'eau provenant d'un tuyau pour mélanger une solution dans un tonneau. Un autre exemple est le nez humain, nous expirons le CO_2 de nos poumons et nous inspirons O_2 . La raison pour laquelle nous n'inspirons pas le souffle quand nous expirons est l'action de mélange des jets minuscules d'air créé par nos poumons lorsque nous expirons. L'action de ces jets mélange de CO_2 avec l'air ambiant de sorte que lorsque nous respirons nous obtenons un bon mélange d'air frais.

Des observations faites dans une serre où la ventilation s'est produite lorsque la température intérieure atteint 23°C , tandis que la température extérieure est de 0°C . Le mélange complet s'est produit sans aucun dommage pour la culture à côté de la fenêtre d'entrée parce que l'air venait à travers l'entrée à une vitesse élevée et a été dirigée vers le haut comme indiqué dans la fig. III.7. Les ventilateurs étaient en marche dans des cycles d'environ 2 minutes au cours de ces conditions.

Comme mentionné précédemment, dans les systèmes de ventilation l'emplacement des entrées et sorties est d'une importance primordiale. Il est souhaitable de conserver la longueur des parcours d'air à moins de 60 m. Les fans sont habituellement montés sur une extrémité de la serre et les entrées d'air sur l'autre.

Les ventilateurs doivent être fournis avec des obturateurs à gravité, des écrans de sécurité à câbles et ont les moteurs protégée localement avec protection électrique adéquate et interrupteur marche-arrêt pour protéger les travailleurs lors de l'entretien. Le volet d'admission ou d'évents fenêtre devrait être motorisé. Des obturateurs de type gravité ont été utilisés, mais ils sont soumis à la force du vent lors du climat venteux et ils ne sont pas appropriés pour l'exploitation hivernale. Les entrées doivent être dimensionnées pour fournir une vitesse apparente de $3,5\text{ m/s}$ ou de $0,13\text{ m}^2$ d'ouverture d'admission pour $0,5\text{ m}^3/\text{s}$ de la capacité du ventilateur installé.

La section transversale peut être déterminée en divisant la capacité d'air du ventilateur en m^3/s par la vitesse de conception d'entrée en m/s , ce qui donne un excellent mélange.

Les obturateurs motorisés peuvent être un problème pendant la période la plus froide de l'année. Les entrées dirigent un grand volume d'air à la culture placé directement en face de l'ouverture et cela peut provoquer des températures réduites à cet endroit. Si la vitesse de l'air déplaçant à travers l'obturateur est faible, alors l'air froid a tendance à s'installer, sans mélange et il se déplace à travers la serre pour arriver au ventilateur avant d'être épuisé, ce qui pourrait avoir eu peu d'impact sur le thermostat de contrôle habituellement situé à 2 m environ au-dessus du sol. Le ventilateur continue de fonctionner parce que le thermostat ne peut pas détecter les températures basses au niveau du sol. Il serait souhaitable d'ouvrir les obturateurs par étapes pour correspondre au nombre de fans en marche.

Certains producteurs ont eu de bons résultats avec un système conçu pour fournir le chauffage et la ventilation partielle en maximisant l'utilisation de la combinaison. La fig. III.8 illustre un système conçu il ya plusieurs années et utilisé avec succès par les producteurs de fleurs et de légumes qui tentaient d'éliminer les effets de la pollution causée par les appareils de chauffage situé à l'intérieur de la serre. Les appareils à combustion séparés, comme discuté plus tôt, ont éliminé plusieurs de ces problèmes.

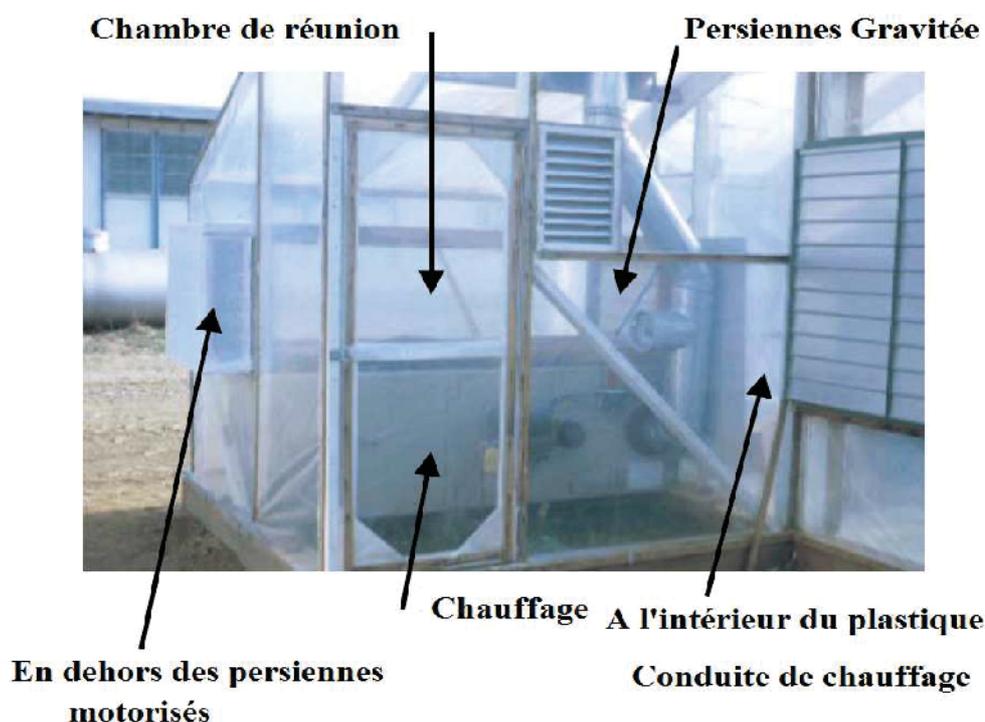


Fig. III.8. Un système de chauffage et de ventilation et partielle attachée à une serre.

Un appareil à feu, l'horizontale est utilisée. Il est directement relié à un tube de chauffage en polyéthylène situés le long du mur extérieur de la serre. Directement au-dessus du four il y a une chambre de contreplaqué, environ la même taille que le four. Cette chambre dispose d'une entrée de la serre et l'autre de l'extérieur, chacune contrôlé par un obturateur motorisé.

4. Refroidissement à évaporation

L'évaporation de l'eau nécessite de l'énergie de conversion de l'eau liquide en vapeur d'eau nécessitant environ 2,5 K.Joules/kg d'eau. Dans les systèmes de refroidissement à évaporation, cette énergie est extraite de l'air, qui est refroidi car il évapore l'eau fournie par le système. Le refroidissement par évaporation a été utilisé avec succès depuis de nombreuses années.

Le système décrit par Acme utilise des ventilateurs d'un côté de la serre et des coussinets mouillés monté sur le côté opposé à l'entrée de ventilation. Les coussinets sont mouillés par l'eau qui coule à travers eux, par gravité. L'air est aspiré à travers eux, en évaporant d'une partie d'eau et provoquant l'air à refroidir près de la température humide

Ces systèmes sont particulièrement bien réussis dans les zones de faible humidité, où une chute de température importantes peut être réalisée. Le problème avec ce système comprenne le nombre de la maintenance du système en fonction de la qualité de l'eau disponible pour le refroidissement. L'accumulation de sel est un problème important dans certaines régions et il est important de contrôler cela en drainant une partie de l'eau loin et de la remplacer avec de l'eau potable pour maintenir une concentration en sel modeste de l'eau de refroidissement circulant.

Les systèmes de brouillard à très haute pression sont aussi utilisés avec succès pour le refroidissement des serres. Depuis que les buses brouillard peuvent être placées dans la serre ainsi qu'à l'entrée d'air. Ce système a l'avantage d'évaporation de l'eau partout dans la serre par rapport à l'évaporation qui se produit seulement sur un mur comme c'est le cas avec le système tampon mouillé.

Les systèmes de brouillard peuvent être plus coûteux en raison du grand nombre de buses nécessaires et la pompe haute pression coûteuse aussi (35 à 62 Bars) utilisé pour créer des tailles de gouttelettes extrêmement fines.

Une bonne capacité de filtration et de traitement de l'eau est essentielle à la bonne performance des systèmes de brouillard que les buses ont de très petites ouvertures afin de produire du brouillard vrai plutôt que de brume. Les accumulations biologique, et chimique dans les buses provoquent une défaillance du système donc une maintenance si bonne est très importante.

5. Contrôle des paramètres de l'environnement

Le contrôle est une partie importante de tout système de chauffage et de ventilation. Les statistiques à thermomètre sont les plus durables pour l'utilisation en serre. Les thermostats qui sont installées à domicile sont d'habitude très précis mais elles sont également plus sujettes à la détérioration et le dysfonctionnement causé par l'environnement de la serre. Les types de thermostats à mercure sont souvent affectés par des vibrations qui peuvent se produit en raison de vents forts ou de fonctionnement de l'équipement, et ne doivent pas être attachés à la structure de la serre.

L'aspiration ou le passage de l'air tout près des thermostats ou des capteurs de l'ordinateur est très important pour le bon fonctionnement du système du contrôle environnemental.

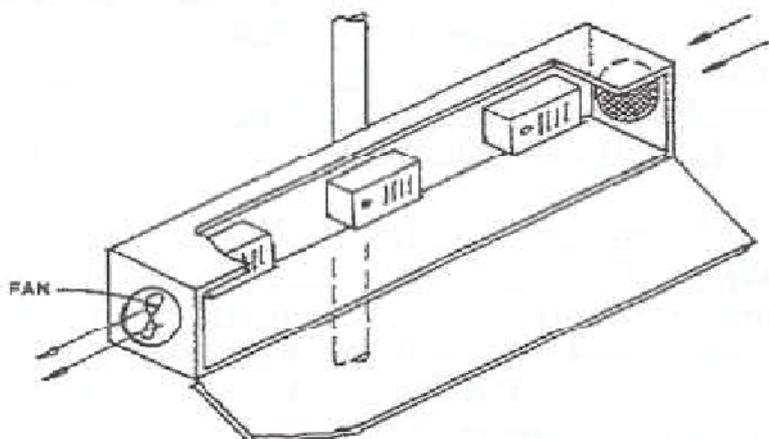


Fig. III.9. Exemple d'un boîtier à aspiration fait pour monter des capteurs et des thermostats.

En utilisation normale, la porte de devant et de haut de la boîte sera complètement fermée.

La fig. III.9 montre un exemple d'une boîte contenant une petite aspirateur de soufflerie ou ventilateur qui aspire l'air sur les unités de détection des thermostats. Les résultats expérimentaux obtenus par un souffle simple d'air sur un thermostat bulbe capillaire traditionnelle ont entraîné une économie d'énergie significative. Depuis, les fluctuations de mesure la de température ont été significativement réduits.

Les capteurs pour les systèmes de contrôle informatique viennent habituellement montés dans un boîtier à aspiration. Leur rôle essentiel est de contrôler la température et l'humidité. Les thermostats peuvent contrôler directement les petits moteurs. Cependant, l'utilisation des relais électriques pour démarrer le chauffage et la ventilation peut augmenter la durée de vie du thermostat. Les relais sont nécessaires s'il y a grand ou plusieurs moteurs qui dépassent le courant nominal des contacts du thermostat.

Les coûts initiaux d'un système de relais sont très élevés mais la vie de l'équipement sera étendue de manière significative. Des Thermostats supplémentaires peuvent être câblés pour offrir les différents réglages jour et nuit surtout quand aussi une horloge 24-heures est utilisée.

Sophistiquées sur ordinateurs ; les unités de contrôle de l'environnement actuellement commercialisées présentent l'avantage de fournir une archive des températures enregistrées pendant toute la journée ainsi que la mise en œuvre des scénarios complexes de la température préprogrammée, si nécessaire.

La caractéristique d'acquisition de données de ces systèmes informatisés est souvent un aspect attrayant pour le producteur car de tels enregistrements sont utiles en déterminant ce qu'étaient les conditions d'élevage réels pour une culture particulière. Ces systèmes fournissent des différents niveaux de contrôle de chauffage et de ventilation pour différents moments de la journée. Ils peuvent intégrer l'équipement de détection de la lumière dans le contrôle du fonctionnement d'un écran thermique (ombre) et/ou dans l'enrichissement en CO₂.

Les systèmes informatiques sont utilisés pour contrôler un système de chauffage et de ventilation bien conçu. Si un système de chauffage ou de ventilation est mal conçu il ne peut pas être amélioré en installant simplement un meilleur système de contrôle. Le système de contrôle fournit les meilleurs résultats quand il fonctionne en conjonction avec un système de chauffage et de ventilation bien conçus.

6. Conservation de l'énergie

Il y a beaucoup de moyens efficaces pour les producteurs afin de réduire l'énergie nécessaire pour chauffer leurs serres. Le moyen le plus efficace pour y parvenir est par l'utilisation d'écrans thermiques ou des couvertures économiseurs d'énergie.

Ces écrans peuvent souvent être utilisés pour le refroidissement efficace en été et aussi si le matériel approprié est bien choisi. Les meilleurs écrans d'économie d'énergie permettent de réduire l'énergie de chauffage requise de 30 à 40 % pour une serre en polyéthylène à double couche.

Un matériel couramment utilisé pour l'ombrage en été fournissant environ 55% d'ombre, peut fournir une économie d'énergie de seulement 25 à 30 %. Toutefois, le bénéfice de l'ombre en été ajoutée à l'économie d'énergie quelque peu réduite peut être un compromis raisonnable. Certains producteurs utilisent un système de double écran, d'autres paient la différence des coûts de l'énergie. Ils utilisent du matériel récent de l'ombre dépouillé d'aluminium et réalisent des économies d'énergie moins pendant la saison de chauffage. Les producteurs qui n'utilisent pas le système d'ombrage en été devraient choisir un matériau qui donne les économies d'énergie bénéficiant. Autres méthodes de conservation incluent l'utilisation de systèmes de banc transportables ou mobiles qui permettent de réduire l'énergie de chauffage nécessaire par unité en augmentant sensiblement l'efficacité de l'espace de la serre. Certains producteurs choisissent d'opter des sources de carburant moins cher ou alternatif.

Conclusion

La gestion du climat est l'un des éléments essentiels de la culture sous serre. Après tout, une serre est un moyen de créer un microclimat approprié aux besoins de la plante et ce, peu importe le climat à l'extérieur. La gestion centralisée des appareils facilite le pilotage précis du chauffage, de l'aération, de l'humidité, de l'irrigation et même de l'éclairage et autres....

Il existe de nombreux types de chauffage utilisant des brûleurs à des divers combustibles ; charbon, bois, huile, gaz naturel et divers matériaux organiques. Ils sont susceptibles de donner satisfaction à la culture sous abri mais ils ne maintiennent pas une température uniforme dans toute la serre et s'ils sont utilisés en atmosphère confinée (c'est-à-dire sans cheminée pour l'évacuation des gaz brûlés), ils peuvent endommager les cultures. L'installation des ventilateurs et des systèmes d'aération est donc indiscutable. En outre ; l'excès de la température a aussi un aspect négatif qui peut endommager la culture (comme en été par exemple). Pour cela ; des systèmes et techniques de refroidissement sont aussi indispensables dans une serre. Les armes qui permettent de lutter contre des températures excessives sont l'aération, le refroidissement par évaporation et l'ombrage.

De nos jours, le contrôle climatique assisté par ordinateur fait beaucoup plus que de simplement contrôler la variation de la température interne de la serre mais il pilote avec la grande précision la gestion de l'agro-système. Il est donc important de développer la culture sous serre en utilisant de nouvelles technologies maîtrisant la gestion du climat intérieur.

Maîtriser ce domaine, c'est maîtriser le développement et la croissance de la plante d'où amélioration du rendement.

Chapitre IV

Modélisation

1. Introduction

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 assez réaliste sera choisi comme modèle de comportement de l'ensemble « serre cultivée ». C'est le modèle qui sera utilisé comme base de notre étude pour la détermination du coefficient global de transmission de chaleur à travers la paroi de la serre

2. 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.

2.1. 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.

2.1.1. 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. [16] ; Chiapale et al. [18]). 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.

2.1.2. 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 [17] et Walker [39] 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 [31] ; Takakura et al.[32]; Kimball [23]; Maher et O'Flaherty [26]) qui ont été suivi par de nombreux auteurs (Takarni et Uchijima [34] ; Kindelan [25]; Van Bavel et al. [37]; Avissar et Mahrer [3] ; Von Elsner [38] ; Deltour et al [19] ; Takarura et al. [33] ; Kimbail [24];

Monteil [28] ; Issanchou [21] et Jolliet [22]). 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 (Okano et al. [29]; Tantau [35] ; Udink Ten Cate [36] ; Boulard et Baille [12, 14]; Seginer et al. [30]).

Généralement les analyses qui ont conduit à ces réductions étaient le plus souvent empiriques et fortement liées à l'expérience.

2.2. 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 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 des éléments prédominants de stockage.

Par rapport aux bâtiments d'habitation, les serres se signalent:

- par une charge solaire plus importante (40% à 80%) du rayonnement solaire extérieur pénètre dans la serre),
- par une faible inertie de son enveloppe,
- par l'importance de phénomène de transfert thermique par conduction convection.

Toute description du comportement de la serre à l'aide d'un modèle simplifié ou « réduit », devra donc prendre en compte de façon assez réaliste tous ces échanges thermiques et énergétiques qui se développent dans une serre réelle.

2.3. Bilan d'énergie de l'air de la serre

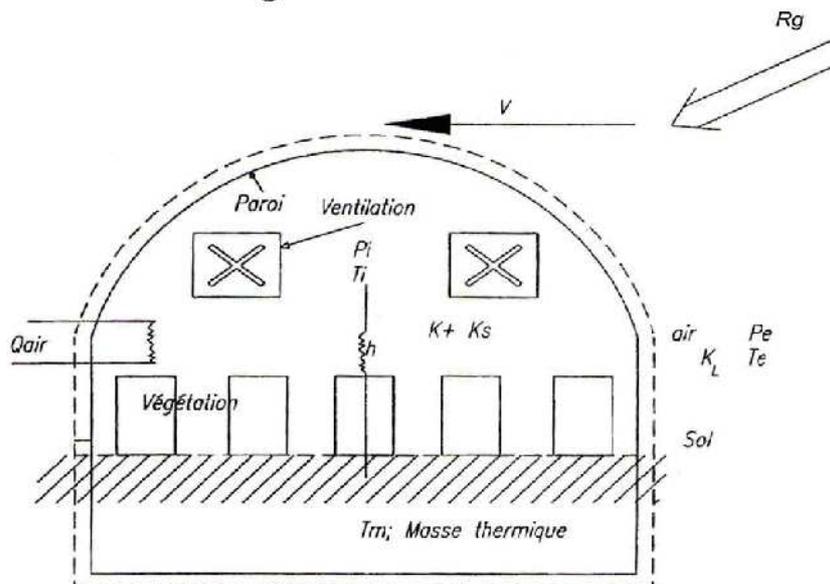


Fig. IV.1 Model de serre

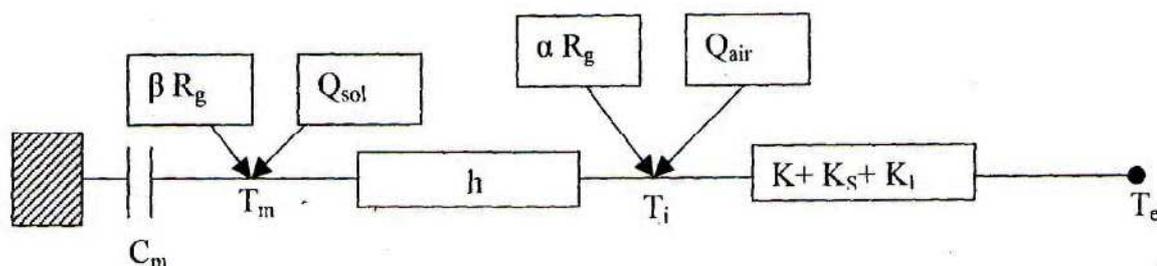


Fig. IV.2 Modèle de serre R.C. d'ordre 1 du bilan thermique

$$\alpha R_g + Q_{air} + h(T_m - T_i) + K(T_e - T_i) + K_s(T_e - T_i) + K_l(P_e - P_i) = 0 \dots\dots(IV.1)$$

$$C_m \frac{dT_m}{dt} = h(T_i - T_m) + Q_{sol} + \beta R_g \dots\dots(IV.*)$$

Où :

T_e : température de l'air extérieur (°C)

P_i, P_e : pressions partielles de vapeur d'eau de l'air intérieur et de l'air extérieur (hecto-Pascal (hPa))

K : coefficient de déperdition global à travers les parois (W/m².K)

K_l : coefficient de transfert de chaleur latente par ventilation (W/(m².hpa))

K_s : coefficient de transfert de chaleur sensible par ventilation (W/(m².k))

Q_{air} : quantité d'énergie apportée par le système de chauffage de l'air (W/m²)

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

T_m : température du sol.

2.3.1 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

CHAPITRE IV : Modélisation

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 [20]; Baudier [8]). Le régime stationnaire suppose que les conditions extérieures sont constantes sur la période considérée.

Plus précisément, il faut parler du 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 [4]; Baille et al. [6]). Ceci nous amène à considérer un coefficient d'échange global en fonction de la vitesse du vent, noté : $K = x_0 + y_0 v$.

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: $K = 7,6 + 0,42v$(IV.2)

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) extrait par ventilation (fuites naturelles, ouverture des ouvrants, extraction mécanique). Les relations liant K_s et K_l à G_v sont les suivantes:

$$K_s = \rho \cdot C_p \cdot G_v / S$$

$$K_l = \rho \cdot C_p \cdot G_v / \gamma S$$

Où:

C_p : capacité thermique massique de l'air ($J/(Kg.K)$).

G_v : débit d'air volumique (m^3/s).

γ : constante psychrométrique ($h Pa/K$).

ρ : masse volumique de l'air (Kg/m^3).

C. Coefficient d'échange convectif h

Ce coefficient caractérise les échanges convectifs entre la masse thermique (sol) et l'air. En considérant que, à l'intérieur de la serre, la vitesse du vent est 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. Coefficients α et β

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

- L'air et la végétation, qui captent une partie de l'énergie solaire sont caractérisés par le coefficient α . Ce dernier varie entre 0,25 et 0,6 selon Boulard et Baille [12] 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 , sera donc considéré comme très faible voir même nul ($\beta = 0$ à $0,1$).

2.3.2 Approche de l'équation du bilan d'énergie

Le rapport de Bowen Bo

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 (IV.1), 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:

$$Bo = \frac{K_s(T_i - T_e)}{K_l(P_i - P_e)} \dots\dots\dots(IV.3)$$

L'équation (2) devient alors:

$$\alpha R_g + Q_{air} + h(T_m - T_i) + K(T_e - T_i) + K_s(T_e - T_i) \left[\frac{Bo+1}{Bo} \right] = 0 \dots\dots(IV.4)$$

La solution issue de la résolution du système composés des deux équations (IV.*) et (I.V.4) et après intégration et mise sous forme récurrente permet de prédire et de commander la température de l'ambiance intérieure de la serre en régime dynamique, ceci bien entendu en connaissant les sollicitations extérieures les caractéristiques de la serre, les besoins de la culture sous serre et l'état de commande du système

3. Détermination de K

Le flux de chaleur à travers la paroi d'une serre détermine l'efficacité du matériau de couverture comme barrière aux déperditions énergétiques entre le *système* serre et son environnement. Ce flux représente 60 à 80% des pertes thermiques totales (Horiguchi, 1978) et représente une part significative des besoins de chauffage de l'enceinte. Par conséquent, la détermination de la quantité de chaleur transmise à travers la paroi constitue un problème important de la thermique des serres et son approche rationnelle représente un outil précieux pour de nombreuses applications pratiques.

En général, le flux de chaleur à travers la paroi, est exprimé au moyen de la relation

$$Q_p = K(T_i - T_e) \dots\dots(IV.5)$$

Le coefficient K intègre les échanges superficiels par convection et par radiation de la paroi de serre vers l'extérieur et il ne peut pas être incorporé dans le coefficient global de déperditions thermiques de la serre Q_p qui est en général exprimé en fonction de la vitesse du vent (Horiguchi, 1978; Schockert and Zabeltitz, 1980). Ceci est confirmé par les fluctuations importantes de Q_p autour d'une courbe moyenne lorsque Q_p est calculé au moyen de formules empiriques, établies à partir des données expérimentales en fonction de la vitesse du vent (Kittas et al., 1987).

Dans le but de proposer une méthode simple d'estimation de K, aussi réaliste que possible, nous présentons dans ce travail un modèle d'estimation de K.

3.1. Modèle d'estimation de K

3.1.1. Formulation de K

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

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

à la face intérieure de la paroi

CHAPITRE IV : Modélisation

$$h_{ri}(T_i - T_{pi}) + h_{ci}(T_i - T_{pi}) = Q_p \dots\dots(IV.6)$$

$$\text{à travers la paroi : } \left(\frac{\lambda}{e}\right)(T_{pi} - T_{pe}) = Q_p \dots\dots(IV.7)$$

$$\text{à la face extérieure de la paroi : } h_{re}(T_{pe} - T_e) + h_{ce}(T_{pe} - T_e) = Q_p \dots\dots(IV.8)$$

$$\text{Par ailleurs, selon l'équation (IV.5), on a : } \frac{Q_p}{K} = (T_i - T_e)$$

$$\text{qui peut se transformer en : } \frac{Q_p}{K} = T_i - T_e + T_{pi} - T_{pi} + T_{pe} - T_{pe} = (T_i - T_{pi}) + (T_{pe} - T_e) + (T_{pi} - T_{pe})$$

Compte tenu des relations (IV.6), (IV.7) et (IV.8), on obtient :

$$\frac{Q_p}{K} = \frac{Q_p}{h_{ri} + h_{ci}} + \frac{Q_p}{h_{re} + h_{ce}} + \frac{Q_p}{\lambda/e}$$

Et en posant :

$$h_{ri} + h_{ci} = h_i \dots\dots(IV.9)$$

$$h_{re} + h_{ce} = h_e \dots\dots(IV.10)$$

$$\text{On a en définitive : } \frac{1}{K} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{1}{\lambda/e} \dots\dots(IV.11)$$

$$\text{Donc : } K = \frac{h_i h_e \lambda}{\lambda(h_i + h_e) + e h_i h_e} \quad (IV.12)$$

La conductivité thermique λ et l'épaisseur des matériaux e les plus couramment utilisés en couverture de serre prennent des valeurs de 0,17 W/(m.K) (PVC) à 0,76 W/(m.K) (verre) pour λ , et de 0,1 mm (PE, PVC) à 4 mm (verre) pour e .

En admettant une valeur typique pour K de l'ordre de 7 W/m² pour une serre en verre (Nisjkens et al. 1984), l'omission du terme de l'équation (IV.11) correspondant à la conduction ne représente qu'une erreur d'environ 3% sur K .

La contribution du terme relatif à la conduction est encore plus insignifiante pour les matériaux plastiques. On peut, par conséquent, négliger ce terme, ce qui donne :

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}$$

$$\text{Soit : } K = \frac{h_i h_e}{h_i + h_e} \dots\dots(IV.13)$$

Par ailleurs, pour une différence entre T_i et T_e de l'ordre de 10°C, l'équation (IV.5) donne :

$$Q_p = 7 \times 10 = 70 \text{ W/m}^2$$

$$\text{et à partir de la relation (IV.7), on déduit : } T_{pi} - T_{pe} = \frac{70}{0,76/0,004} = 0,37 \text{ K}$$

Cette différence qui devient plus faible dans le cas des matériaux plastiques nous permet d'adopter l'hypothèse d'une égalité des températures sur les deux faces du matériau de couverture. Nous désignerons cette température par T_p .

3.1.2. Expression des coefficients h_i et h_e

Pour obtenir K à partir de la relation (IV.13), il faut expliciter $h_i = h_{ri} + h_{ci}$ et $h_e = h_{re} + h_{ce}$

Pour h_{ci} et h_{ce} , on peut retenir les expressions proposées par Kittas (1986), selon lesquelles :

$$h_{ci} = 4.3(T_i - T_p)^{0.25} \dots\dots(IV.14)$$

$$h_{ce} = 1.22(T_p - T_e)^{0.25} + 3.12u^{0.8} \dots\dots(IV.15)$$

CHAPITRE IV : Modélisation

Pour h_{ri} et h_{re} , en négligeant la réflexion dans l'I.R. (Chiapale, 1984), on obtient :

$$h_{ri} = [-\epsilon f_{psi} \sigma_p^4 - f_{pA} f_{psi} \tau_{IR} \sigma_A^4 + f_{psi} \sigma_{si}^4] / (T_i - T_p)$$

Et :

$$h_{re} = [\epsilon \sigma_p^4 + f_{pp} \tau_{IR} \sigma_p^4 + f_{psi} \tau_{IR} \sigma_{si}^4 - f_{pA} \sigma_A^4 - f_{pse} \sigma_{se}^4 + f_{pA} f_{pp} \tau_{IR}^2 \sigma_A^4 + f_{pse} \tau_{IR}^2 \sigma_{se}^4] / (T_p - T_e) A$$

$$\text{avec : } f_{pA} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{S_s}{S_p} \right) = 1/2(1+y) \quad (\text{Kittas 1980})$$

$$f_{pse} = 1 - f_{pA} \quad (\text{Par définition})$$

$$f_{psi} = \frac{S_s}{S_p}$$

(Par la loi de réciprocité (Kreith, 1967) on a : $S_s f_{sip} = S_p f_{psi}$ et puisque $f_{sip} = 1$, on prend

$$f_{psi} = S_s / S_p$$

$$f_{pp} = 1 - f_{psi} \quad (\text{Par définition})$$

En tenant compte que : $\epsilon = 1 - \tau_{IR}$, On peut encore écrire :

$$h_{ri} = [-(1 - \tau_{IR}) f_{psi} \sigma_p^4 - f_{pA} f_{psi} \tau_{IR} \sigma_A^4 + f_{psi} \sigma_{si}^4] / (T_i - T_p)$$

Et

$$h_{re} = [(1 - \tau_{IR}) \sigma_p^4 + f_{pp} \tau_{IR} (1 - \tau_{IR}) \sigma_p^4 + f_{psi} \tau_{IR} \sigma_{si}^4 - f_{pA} \sigma_A^4 - f_{pse} \sigma_{se}^4 + f_{pA} f_{pp} \tau_{IR}^2 \sigma_A^4 + f_{pse} \tau_{IR}^2 \sigma_{se}^4] / (T_p - T_e)$$

On peut admettre, en première approximation, qu'en régime nocturne la température du sol extérieur est assez voisine de la température de l'air extérieur (Kimbali, 1973), soit : $T_{se} \cong T_e$

Et que la température du sol intérieur est, pendant la nuit, assez voisine de la température de l'air intérieur, soit : $T_{si} \cong T_i$

On peut, néanmoins, considérer qu'en conditions nocturnes et par ciel clair la température du sol extérieur peut être inférieure à la température de l'air extérieur de 4 à 5°C, En supposant, par conséquent, que $T_{se} \approx T_e$ on effectue donc une surestimation du rayonnement thermique du sol extérieur de l'ordre de 25 W/m². Si on tient compte du facteur de forme paroi-sol extérieur qui pour $y = 0.6$ (valeur qui correspond à la géométrie d'un tunnel classique en région méditerranéenne) prend une valeur de 0.2, ce rayonnement thermique entraîne au niveau de la paroi un flux radiatif vers l'intérieur du système de l'ordre de 5 W/m².

D'autre part, il est communément admis qu'en régime nocturne sous serre chauffée par ventilo-convection avec distribution d'air chaud par gaines souples aériennes, par thermosiphon en position basse et par système de chauffage à basse température (Tantau, 1974; Baille and Elsner, 1988), la différence entre T_{si} et T_i ne dépasse presque jamais 2K. En admettant, alors, que $T_{si} \approx T_i$ on aboutit à une surestimation de la température du sol intérieur qui, si on tient compte du facteur de forme paroi-sol intérieur dont La valeur est 0,6 pour $b = 0.6$, se traduit au niveau de la paroi par un flux radiatif vers l'extérieur du système de l'ordre de 6 W/m². On s'aperçoit, par conséquent, que les dérivations par rapport à l'hypothèse d'égalité des températures sol extérieur (air extérieur et sol intérieur) air intérieur entraînent des flux radiatifs au niveau de la paroi de serre qui sont faibles, du même ordre de grandeur et sens opposé. Ceci a comme résultat un flux radiatif net négligeable, fait qui nous donne le droit de considérer notre hypothèse d'égalité entre T_{se} et T_e et entre T_{si} et T_i , comme tout à fait raisonnable pour les besoins de notre travail.

Après ces considérations, les équations précédentes donnent:

$$h_{ri} = [-(1 - \tau_{IR}) f_{psi} \sigma_p^4 - f_{pA} f_{psi} \tau_{IR} \sigma_A^4 + f_{psi} \sigma_{si}^4] / (T_i - T_p) \dots \dots (IV.16)$$

Et :

CHAPITRE IV : Modélisation

$$h_{re} = [(1 - \tau_{IR})\sigma T_p^4 + f_{pp}\tau_{IR}(1 - \tau_{IR})\sigma T_p^4 + f_{psi}\tau_{IR}\sigma T_{si}^4 - f_{pA}\sigma T_A^4 - f_{pse}\sigma T_{se}^4 + f_{pA}f_{pp}\tau_{IR}^2\sigma T_{se}^4 + f_{pse}\tau_{IR}^2\sigma T_{se}^4]/(T_p - T_e) \dots \dots \dots (IV.17)$$

On s'aperçoit que, dans les équations précédentes qui définissent K, il n'y a qu'une inconnue, la température de paroi T_p . dans la mesure où: T_e et u (u : vitesse du vent) sont des données du climat extérieur; T_A (température radiative du ciel) est un paramètre du climat extérieur. Dans le cas de notre simulation, T_A a été déterminé à partir des mesures du rayonnement atmosphérique $R_A = \sigma T_A^4$. (Cette mesure, néanmoins, n'est pas une mesure météorologique classique c'est pourquoi pour les applications pratiques, T_A est déterminé à partir des formules utilisant des paramètres météorologiques facilement accessibles (Jolliet. 1988); T_i , est une donnée, car elle représente la température de consigne imposée par la technique culturale. τ_{IR} est une donnée caractérisant le matériau de couverture; les facteurs de forme sont imposés par les caractéristiques géométriques de la serre et comme nous l'avons mentionné précédemment, ils peuvent être exprimés en fonction du rapport y .

3.1.3. Détermination de K

Les relations (IV.5) et (IV.8) donnent :

$$(h_{re} + h_{ce})(T_p - T_e) = K(T_i - T_e)$$

En tenant compte de (IV.10), on obtient :

$$T_p = T_e + \frac{K(T_i - T_e)}{h_e} \dots \dots \dots (IV.18)$$

Les équations (IV.13) et (VI.18) peuvent être utilisées pour la détermination de K, par itérations successives: on part d'une valeur initiale de la température de paroi (prise égale à $(T_i + T_e)/2$ qui permet de calculer les coefficients h_i et h_e à partir des équations du paragraphe précédent. On obtient, alors, une estimation de K à partir de l'équation (VI.13). Cette valeur de K peut être utilisée pour calculer la température de paroi suivant la relation (IV.18). Si cette valeur est voisine (à $\pm 0.1K$ près) de la valeur initiale de la température de paroi, on considérera que l'estimation de K est correcte. Sinon, on continue cette procédure itérative avec la valeur de la température de paroi calculée à partir de (VI.18) comme valeur initiale, jusqu'à ce que l'on arrive à une convergence pour la température de paroi entre valeur initiale et valeur estimée.

Chapitre V

Simulation

1. Introduction

Dans cette partie il s'agit de déterminer par programmation le coefficient K et les déperditions Q_p dans le cas des deux serres tunnel et chapelle à l'aide de l'outil informatique, en programmant les différentes expressions à travers le langage MATLAB.

MATLAB (MATrix LABoratory) comprend de nombreuses fonctions graphiques, un système puissant d'opérateurs s'appliquant à des matrices, des algorithmes numériques (zéros d'une fonction, intégration, interpolation...), ainsi d'un langage de programmation extrêmement simple à utiliser.

Il fut conçu initialement (au milieu des années 1980) pour manipuler aisément des matrices à l'aide de fonctions préprogrammées (addition, multiplication, inversion, décompositions, déterminants . . .), en s'affranchissant des contraintes des langages de programmation classique.

2. Organigramme

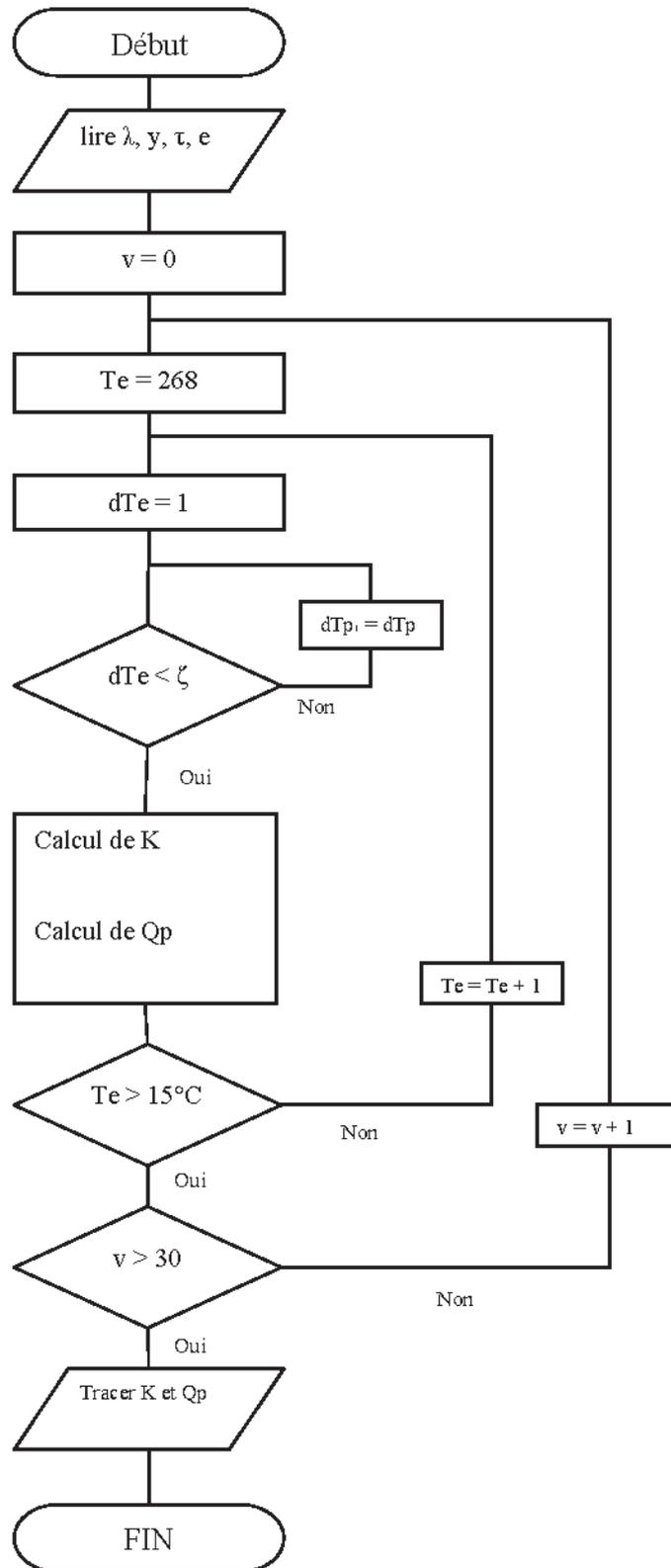


Fig. V.1. Organigramme de la simulation.

3. Résultat de la simulation

3.1. Serre tunnel

3.1.1. Coefficient K pour $f=0$

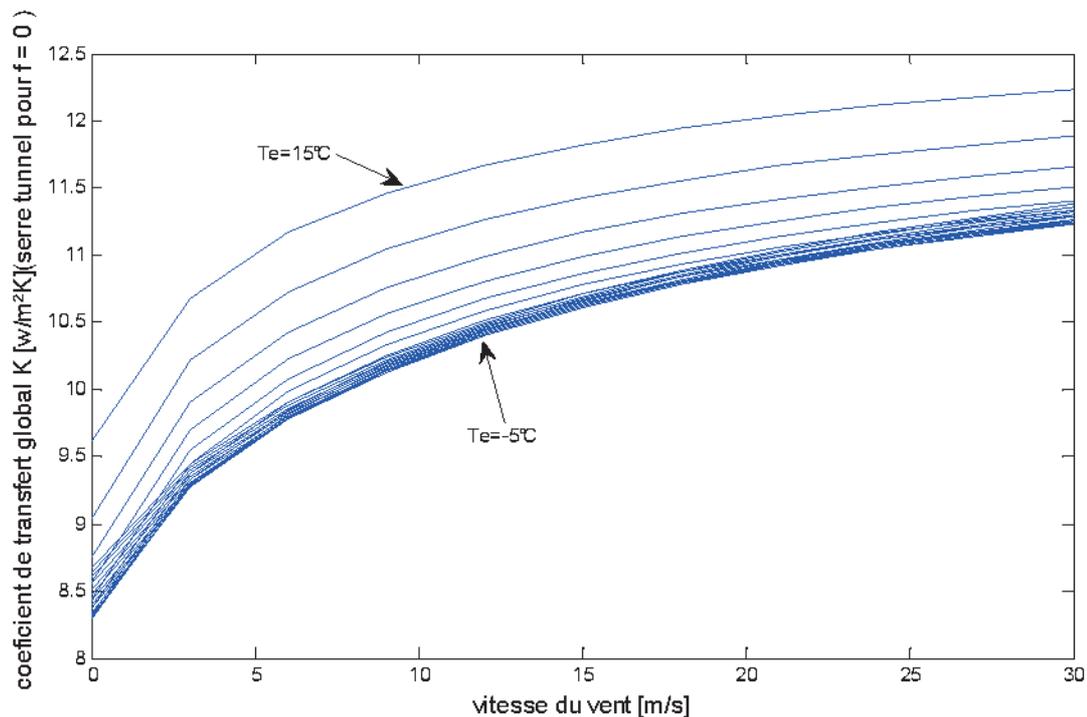


Fig. V.1 Diagramme de la variation du coefficient globale de la transmission de chaleur K [$W / m^2 . k$] à travers la paroi en PE de la serre tunnel en fonction de l'évolution de la vitesse du vent v [m/s] pour $f = 0$

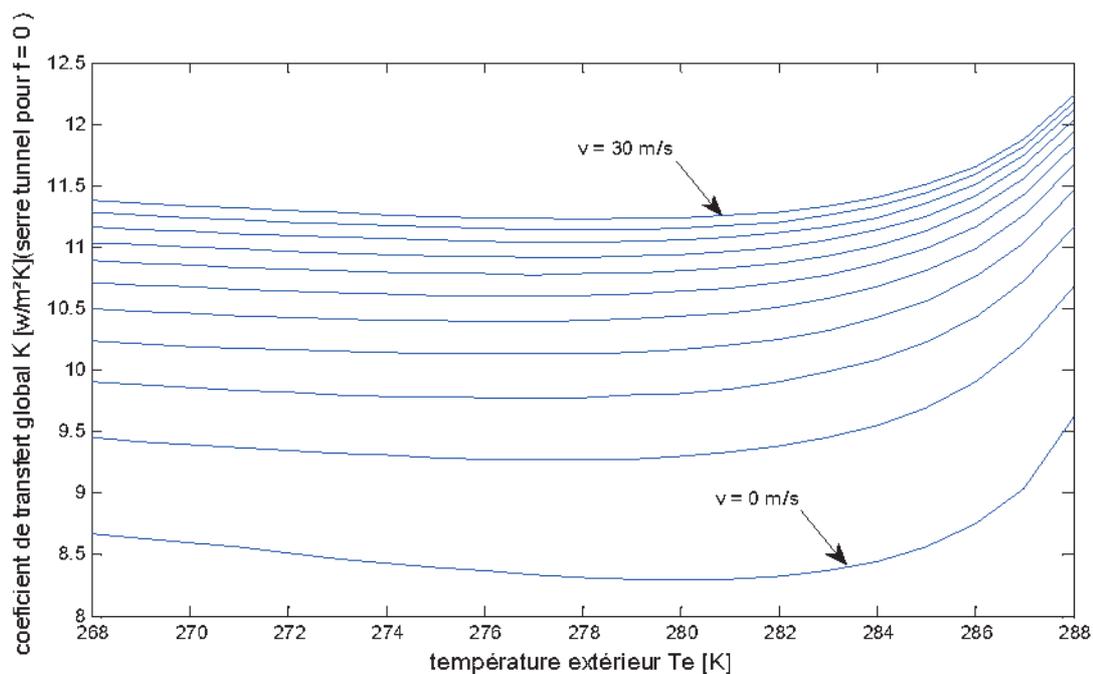


Fig. V.2 Diagramme de la variation du coefficient globale de la transmission de chaleur K [$W / m^2 . k$] à travers la paroi en PE de la serre tunnel en fonction de l'évolution de la température extérieure T_e [k] pour $f = 0$

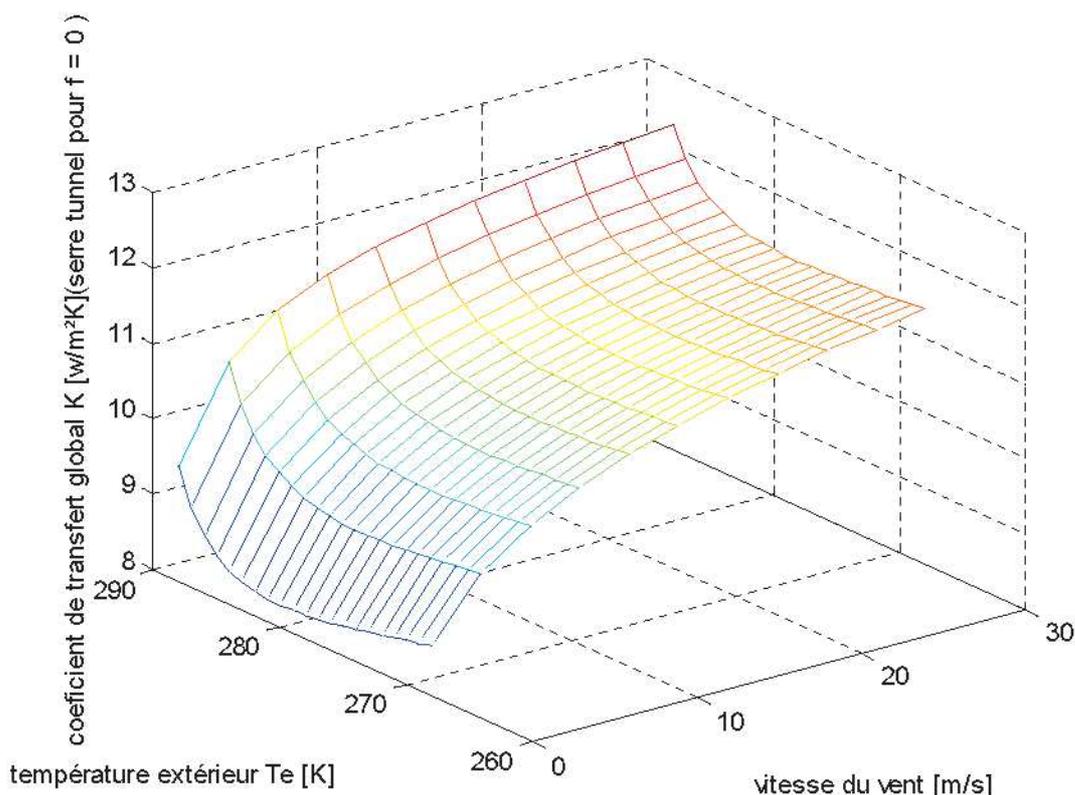


Fig. V.3. Diagramme en 3D exprimant le coefficient globale transmission de chaleur K [$W / m^2.k$] à travers la paroi en PE de la serre tunnel en fonction de la température extérieure T_e [k] et de la vitesse du vent v [m/s] pour $f=0$

3.1.2. Coefficient K pour $f=1$

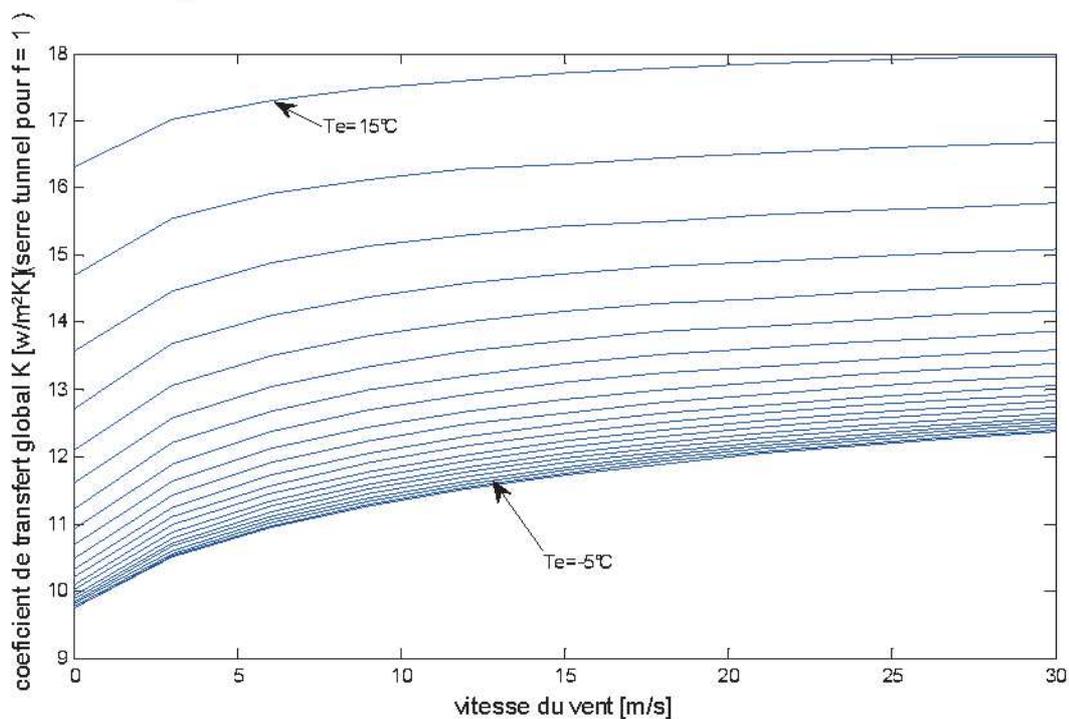


Fig. V.4 Diagramme de la variation du coefficient globale de la transmission de chaleur K [$W / m^2.k$] à travers la paroi en PE de la serre tunnel en fonction de l'évolution de la vitesse du vent de $v=0$ m/s à $v=30$ m/s pour $f=1$

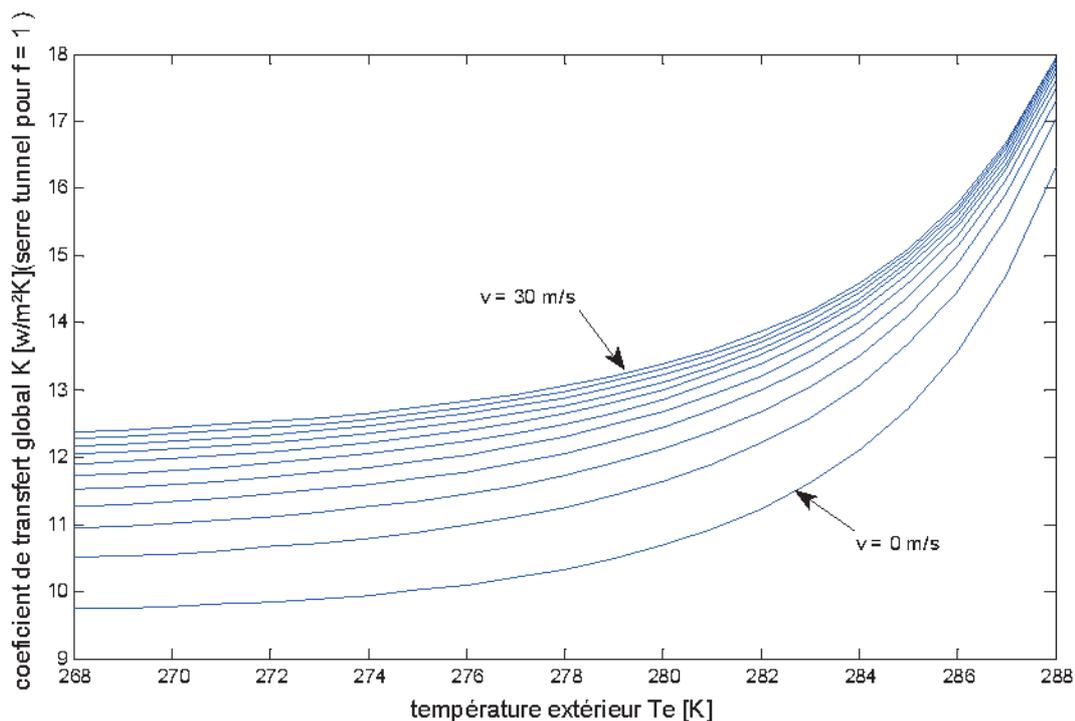


Fig. V.5. Diagramme de la variation du coefficient globale de transfert de chaleur $K [W / m^2 .k]$ à travers la paroi en PE de la serre tunnel en fonction de l'évolution de la température extérieure $T_e [k]$ pour $f = 1$

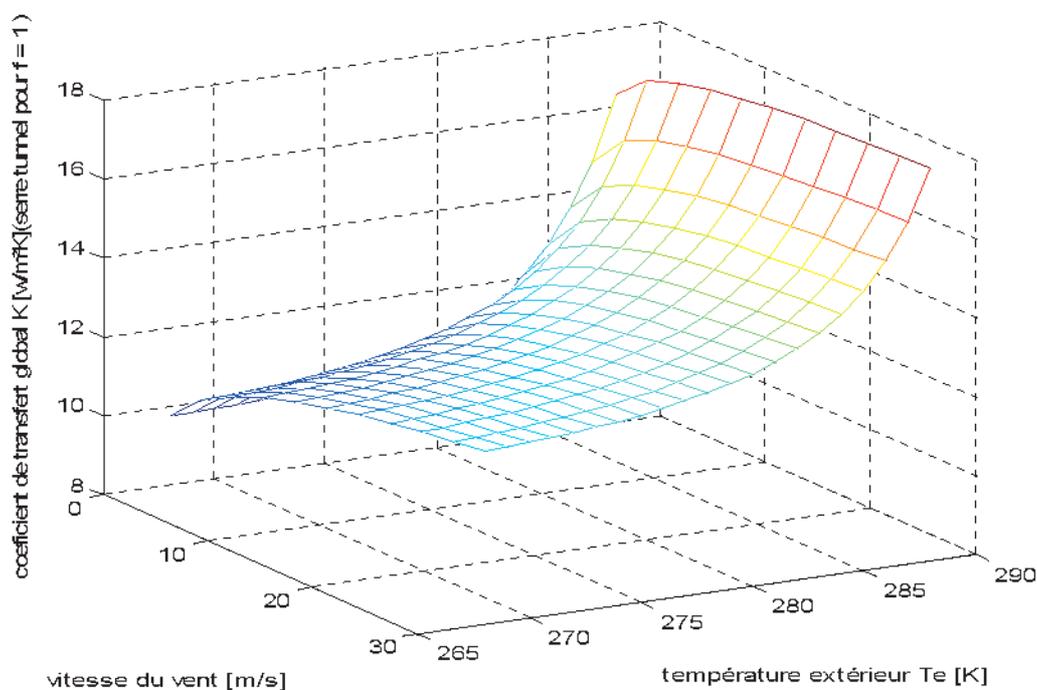


Fig. V.6. Diagramme de la variation du coefficient globale de transfert de chaleur $K [W / m^2 .k]$ à travers la paroi en PE de la serre tunnel en fonction respectivement de l'évolution de la température extérieure $T_e [k]$ et de la vitesse du vent $v [m/s]$ pour $f = 1$

3.1.3. Les déperdition thermiques Q_p pour $f = 0$

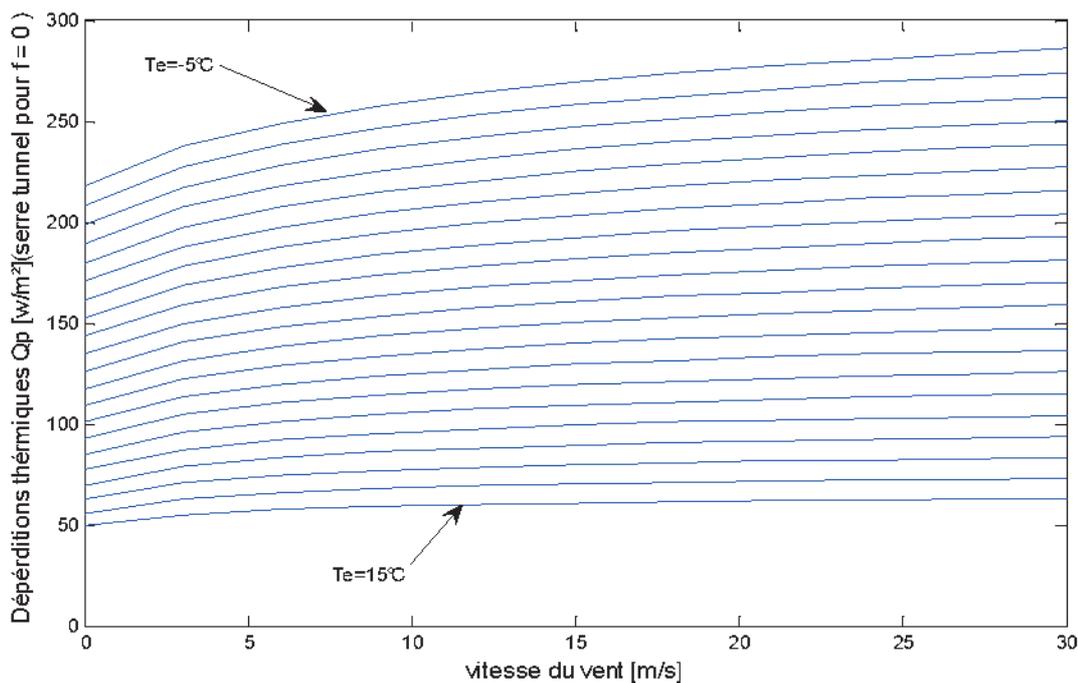


Fig. V.7. Diagramme des déperditions thermiques Q_p [W/m²] à travers la paroi en PE de la serre tunnel en fonction de la vitesse du vent v [m/s] pour $f = 0$

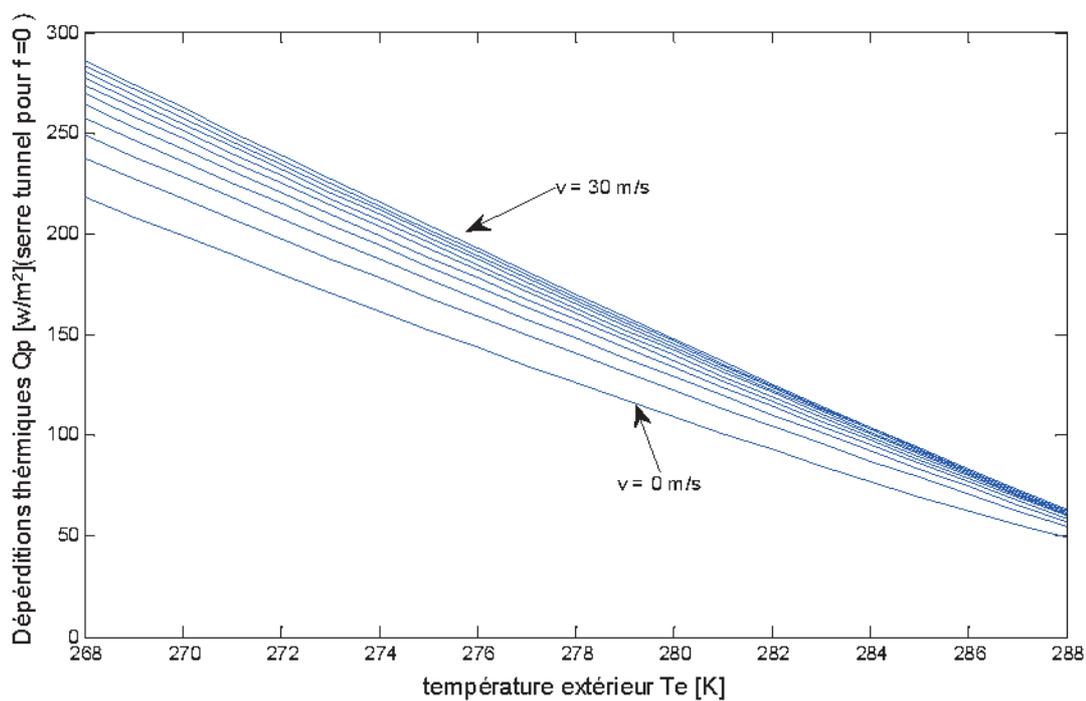


Fig. V.8 Diagramme des déperditions thermiques Q_p [W/m²] à travers la paroi en PE de la serre tunnel en fonction de la température extérieure T_e [K] pour $f = 0$

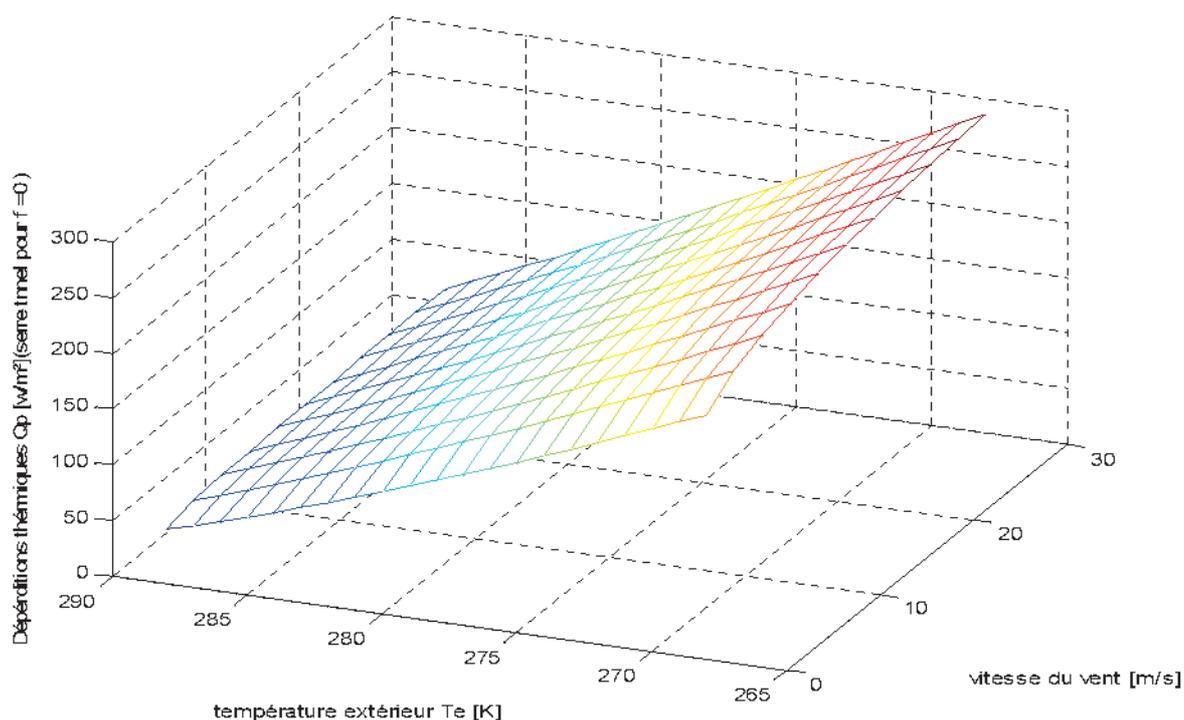


Fig. V.9 Diagramme de la variation des déperditions thermiques Q_p [W/m²] à travers la paroi en PE de la serre tunnel en fonction respectivement de l'évolution de la température extérieure T_e [k] et de la vitesse du vent v [m/s] pour $f = 0$

3.1.4. Les déperdition thermiques pour $f = 1$

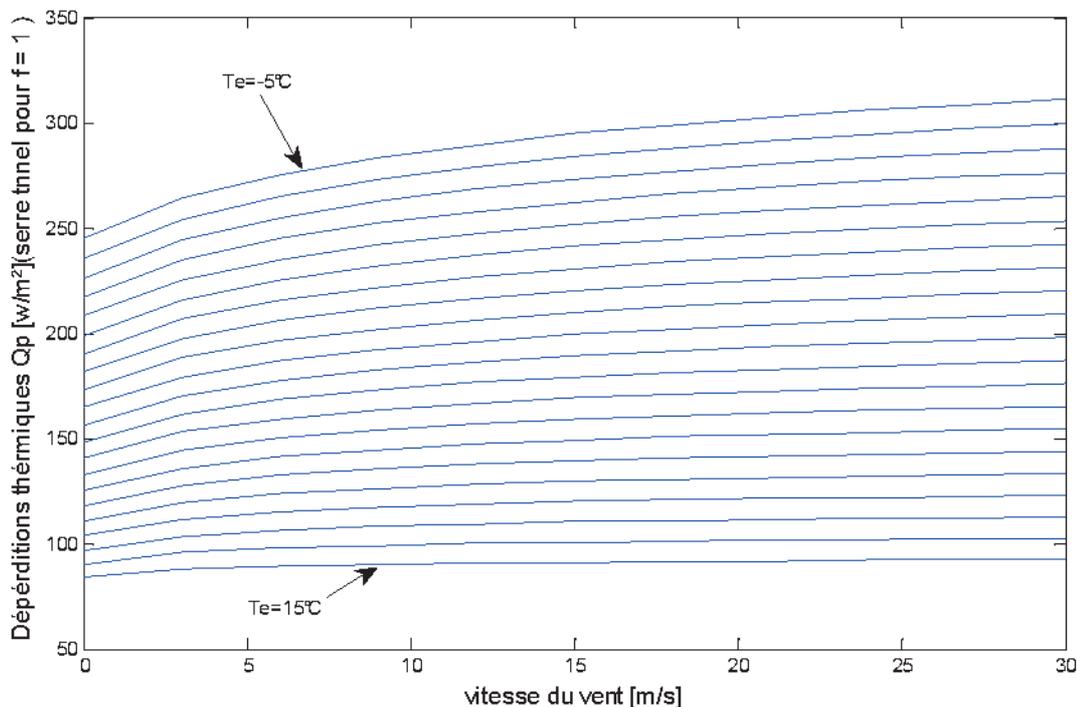


Fig. V.10. Diagramme des déperditions thermiques Q_p [W/m²] à travers la paroi en PE de la serre tunnel en fonction de la vitesse du vent v [m/s] pour $f = 1$

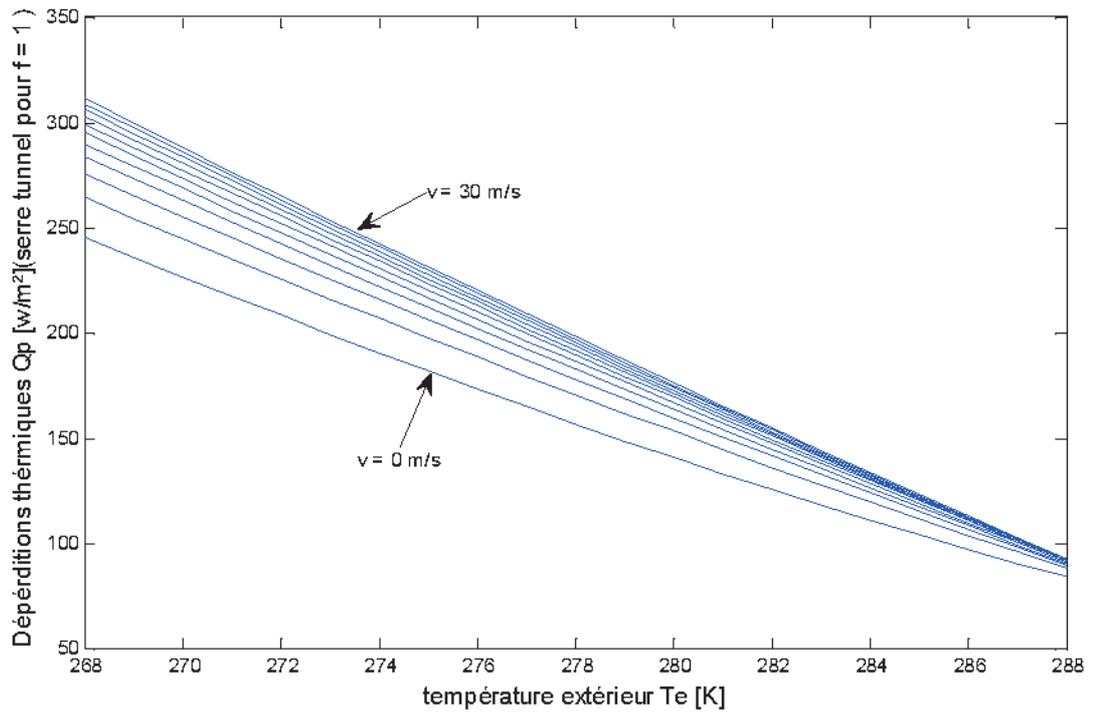


Fig. V.11. Diagramme des déperditions thermiques Q_p [W/m²] à travers la paroi en PE de la serre tunnel en fonction de la température extérieure T_e [k] pour $f = 1$

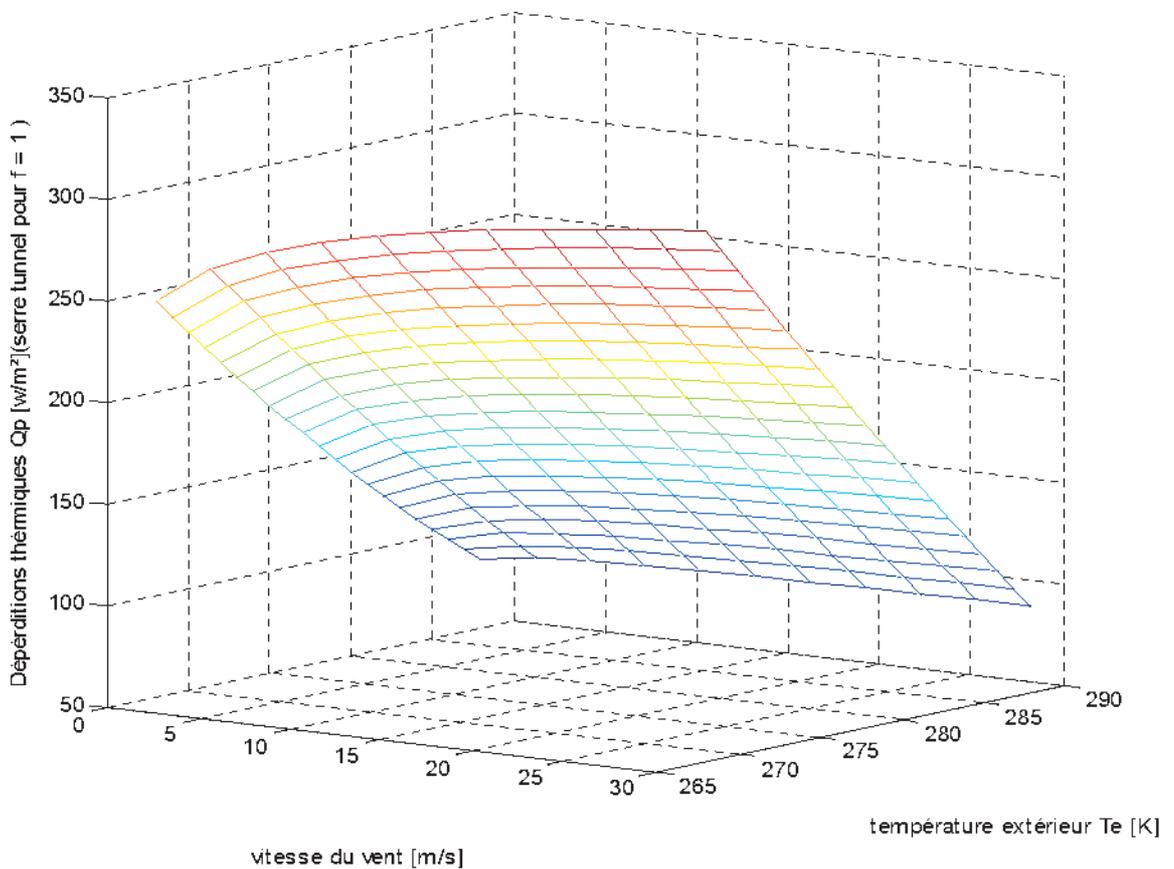


Fig. V.12. Diagramme des déperditions thermiques Q_p [W/m²] à travers la paroi en PE de la serre tunnel en fonction respectivement de la température extérieure T_e [k] et de la vitesse du vent v [m/s] pour $f = 1$

3.2. Serre chapelle

3.2.1. Coefficient K pour f=0

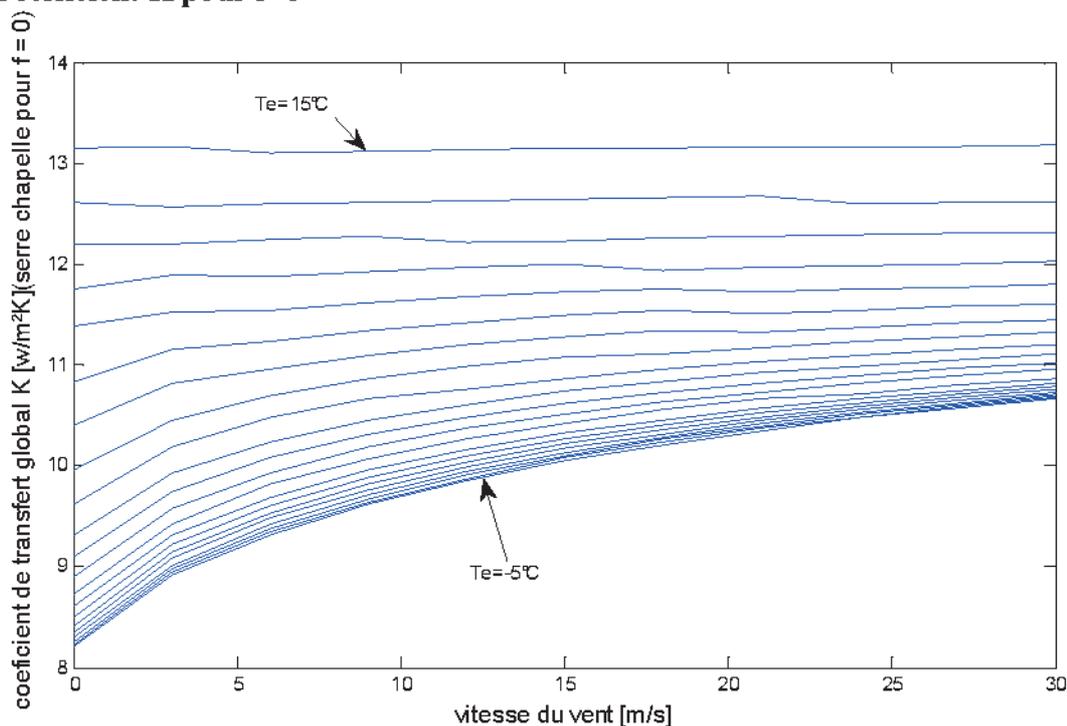


Fig. V.13 Diagramme de la variation du coefficient globale de la transmission de chaleur K [$W / m^2 \cdot k$] à travers la paroi en verre de la serre chapelle en fonction de la vitesse du vent pour $f = 0$

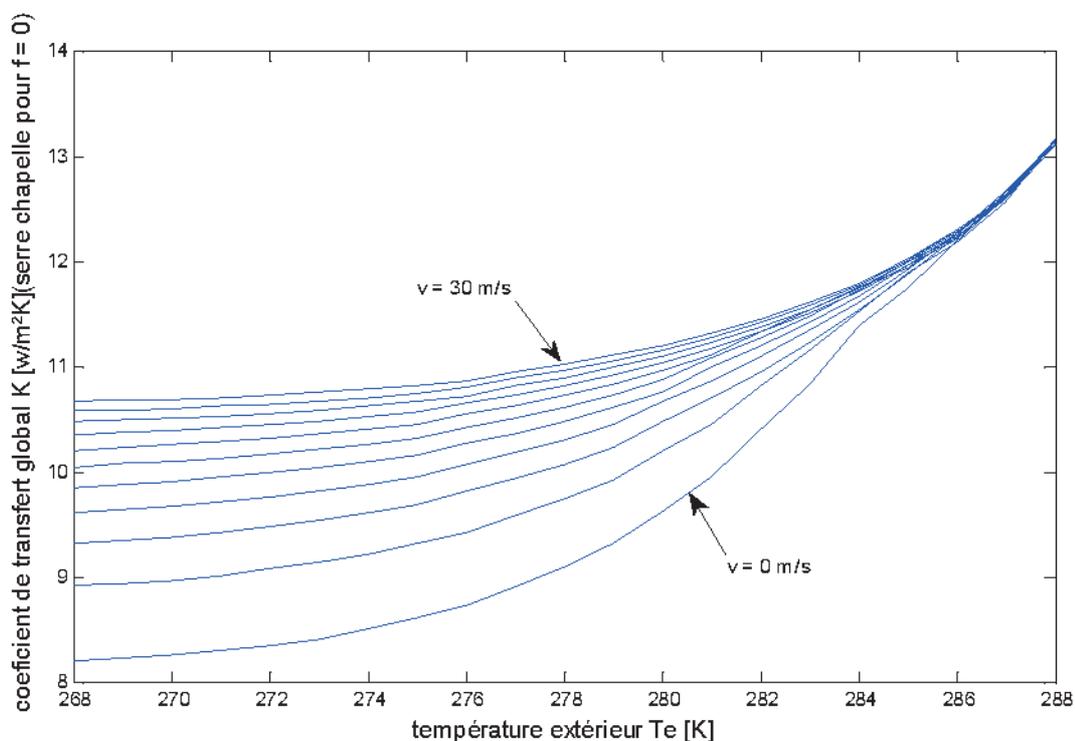


Fig. V.14. Diagramme de la variation du coefficient globale de la transmission de chaleur K [$W / m^2 \cdot k$] à travers la paroi en en verre de la serre chapelle en fonction de la température extérieure T_e [k] pour $f = 0$

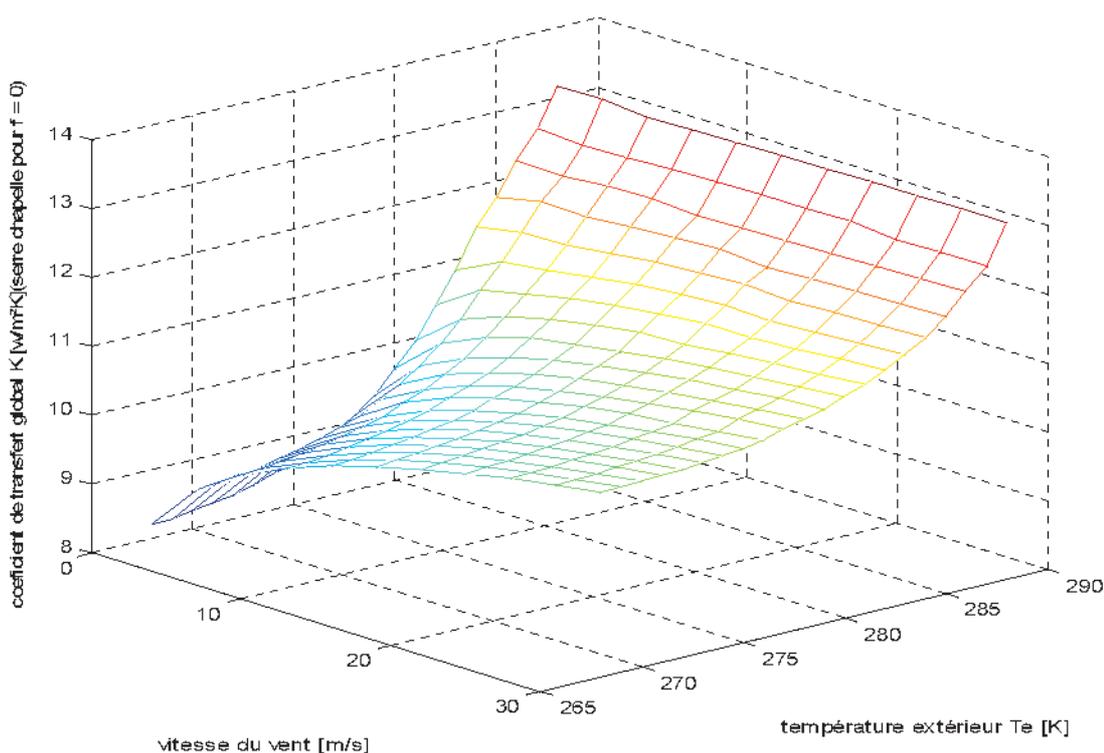


Fig.15 V. Diagramme de la variation du coefficient globale de transfert de chaleur K [W / m².k] à travers la paroi en verre de la serre chapelle en fonction respectivement de l'évolution de la température extérieure T_e [k] et de la vitesse du vent v [m/s] pour $f = 0$

3.2.2. Coefficient K pour $f=1$

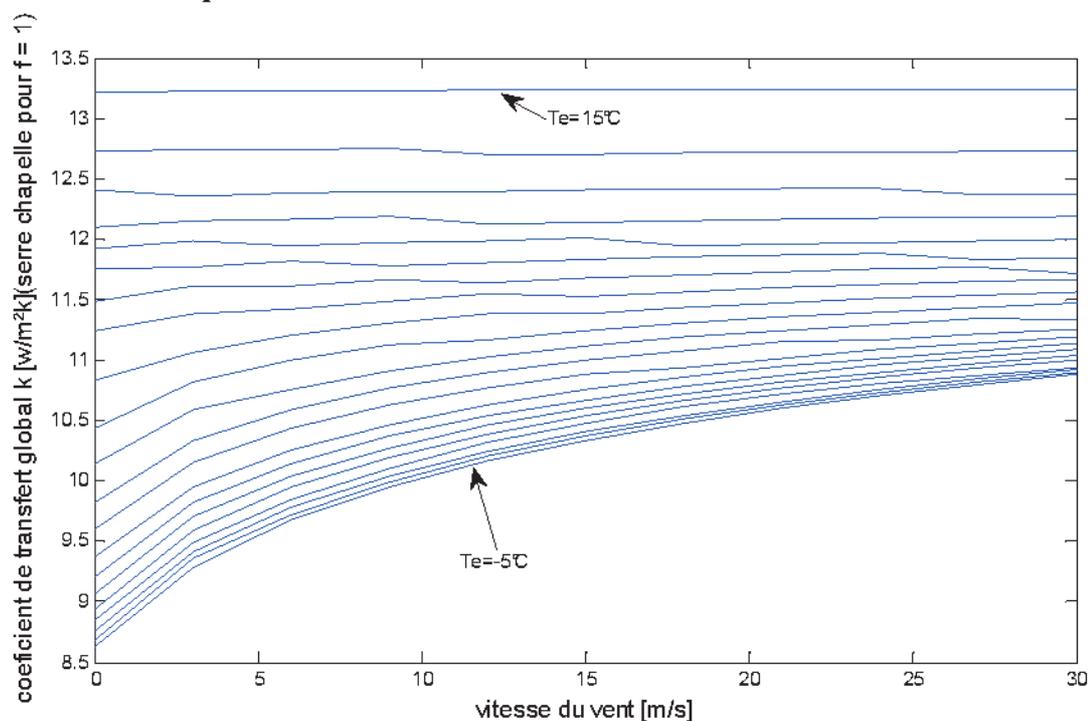


Fig. V.16. Diagramme de la variation du coefficient globale de transfert de chaleur K [W / m².k] à travers la paroi en verre de la serre chapelle en fonction de la vitesse du vent v [m/s] pour $f = 1$

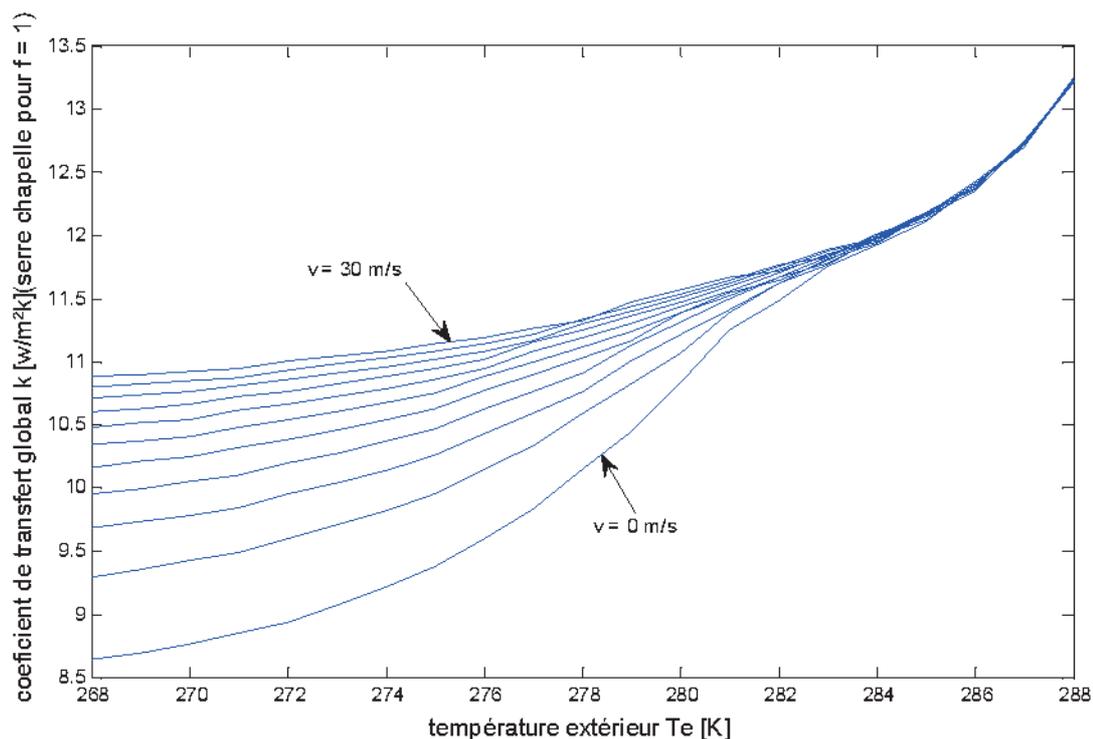


Fig. V.17. Diagramme de la variation du coefficient global de transfert de chaleur K [$W / m^2.k$] à travers la paroi en verre de la serre chapelle en de la température extérieure T_e [K] et pour $f = 1$

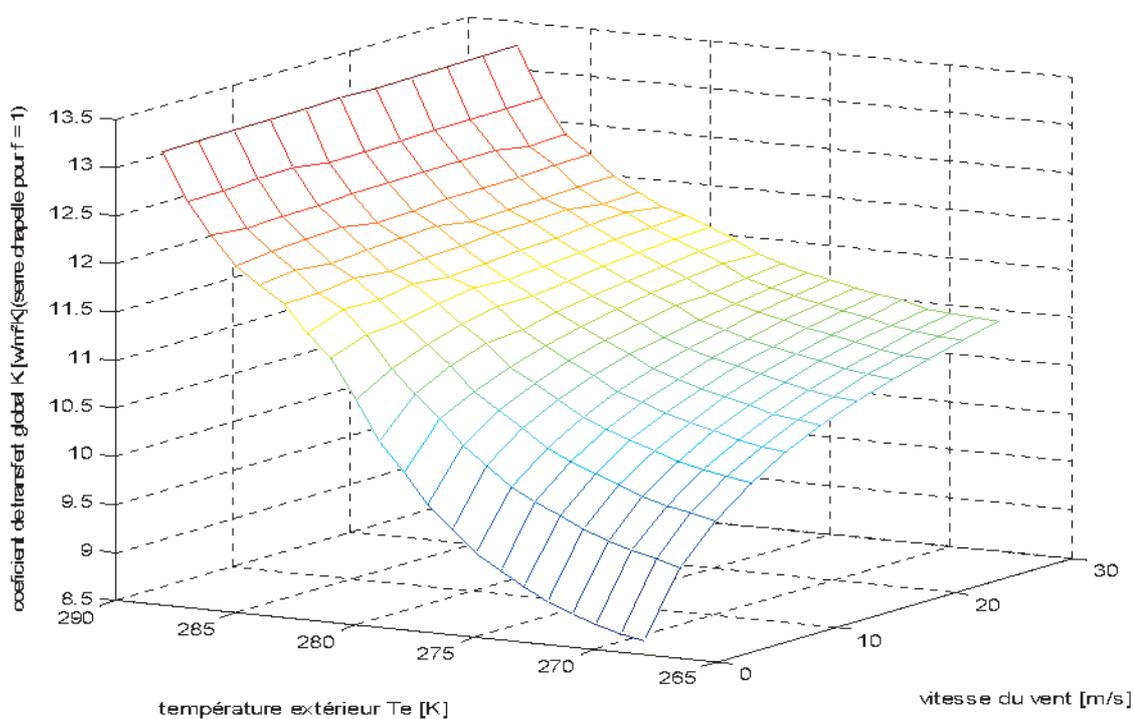


Fig. V.18 Diagramme de la variation du coefficient globale de transmission de chaleur K [$W / m^2.k$] à travers la paroi en verre de la serre chapelle en fonction respectivement de l'évolution de la température extérieure T_e [K] et de la vitesse du vent v [m/s] pour $f = 1$

3.2.3. Les déperditions thermiques pour $f = 0$

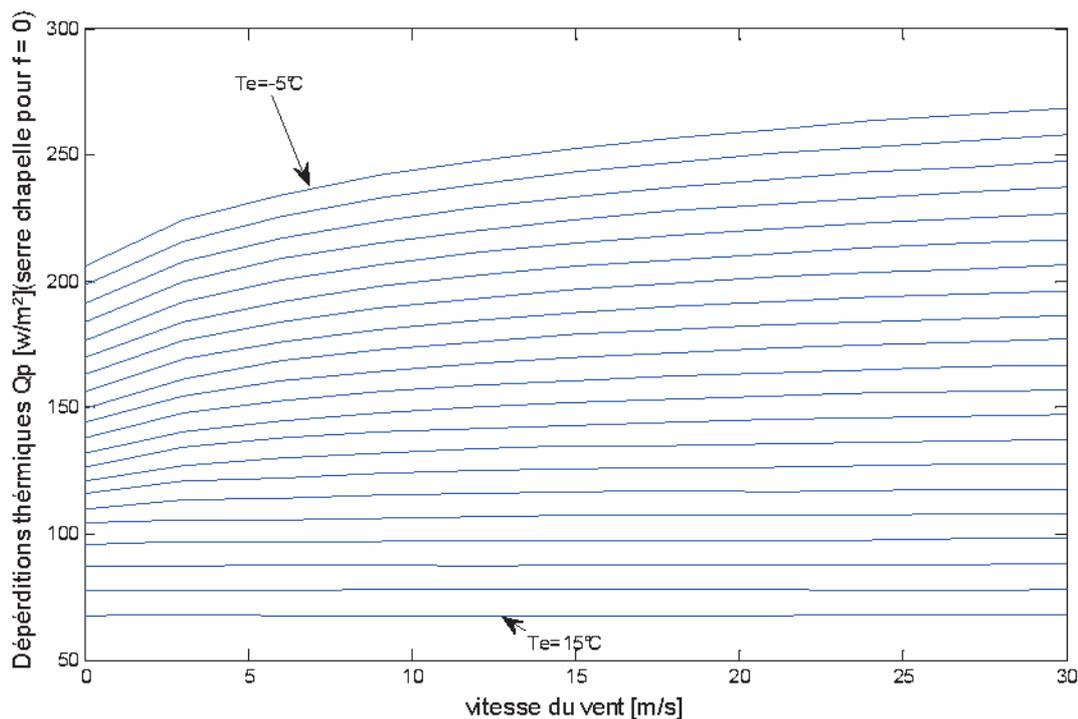


Fig. V.19 Diagramme des déperditions thermiques Q_p [W/m^2] à travers la paroi en verre de la serre chapelle en fonction de la vitesse du vent v [m/s] pour $f = 0$

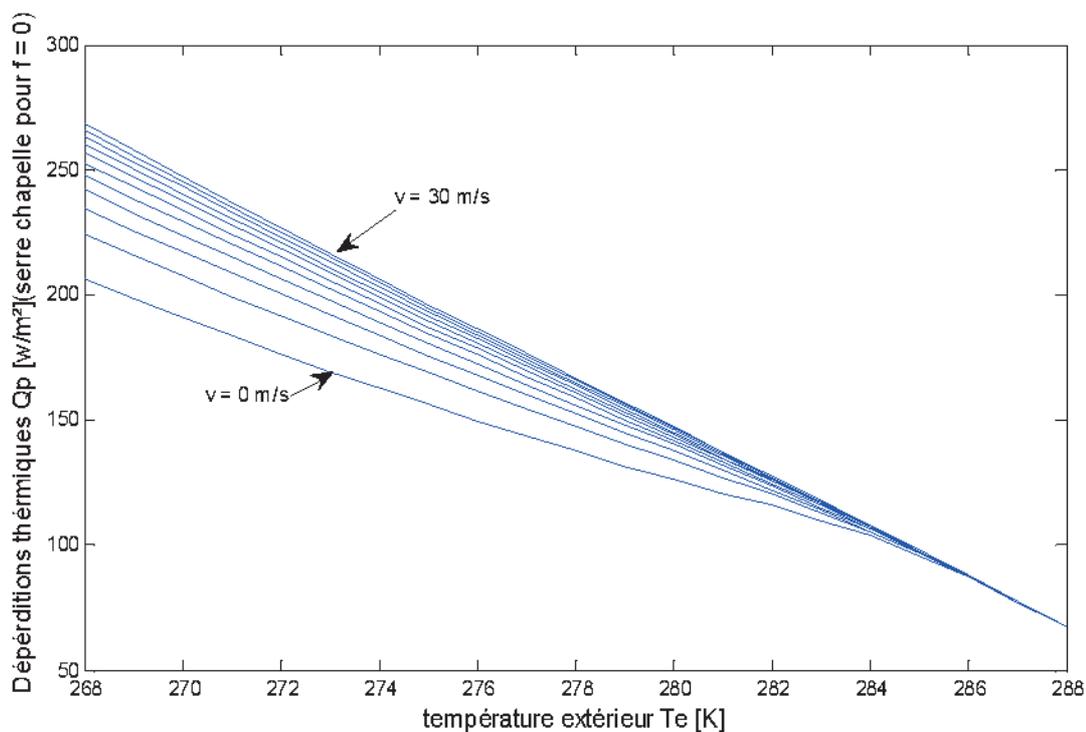


Fig. V.20. Diagramme des déperditions thermiques Q_p [W/m^2] à travers la paroi en verre de la serre chapelle en fonction de la température extérieure T_e [K] pour $f = 0$

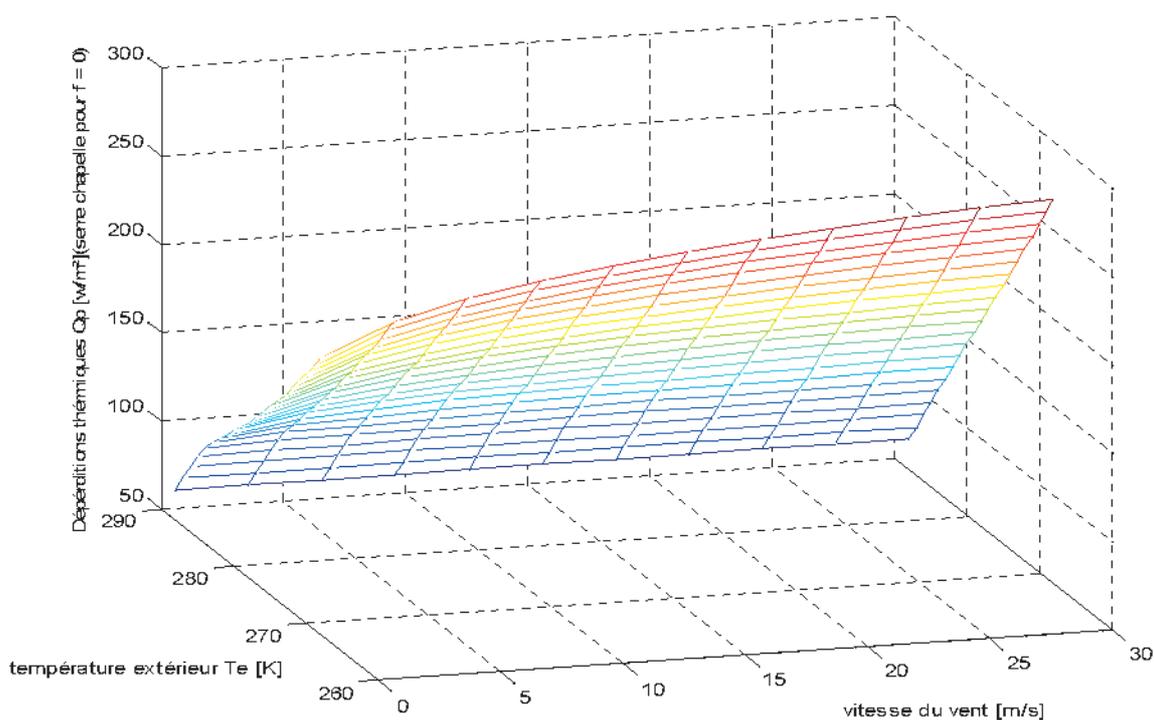


Fig. V.21. Diagramme de la variation déperditions thermiques Q_p [W/m²] à travers la paroi en verre de la serre chapelle en fonction respectivement de l'évolution de la température extérieure T_e [K] et de la vitesse du vent v [m/s] pour $f=0$

3.2.4. Déperditions thermiques pour $f=1$

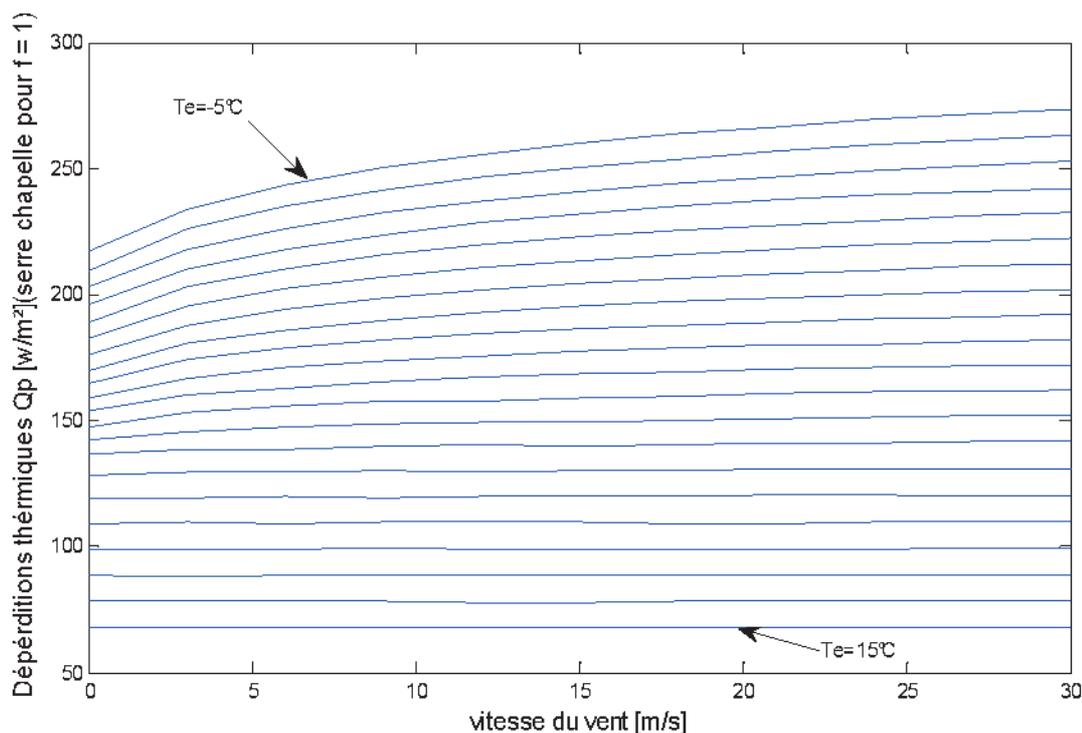


Fig. V.22 Diagramme des déperditions thermiques Q_p [W/m²] à travers la paroi en verre de la serre chapelle en fonction de la vitesse du vent v [m/s] pour $f=1$

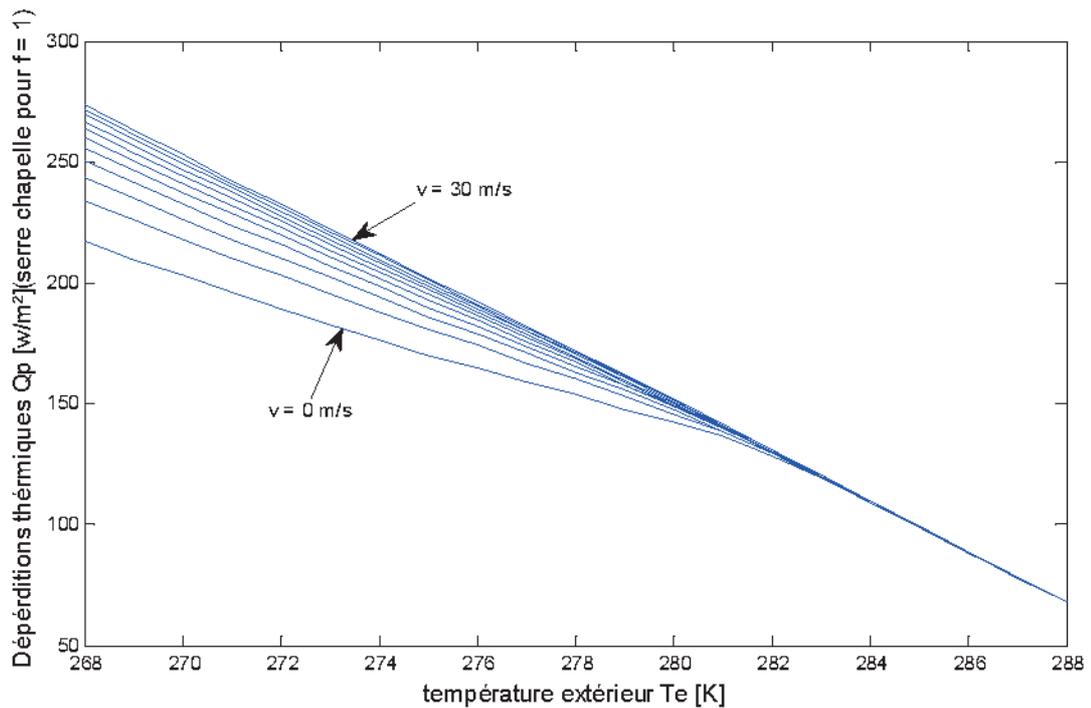


Fig. V.23 Diagramme des déperditions thermiques Q_p [W/m^2] à travers la paroi en verre de la serre chapelle en fonction de la température extérieure T_e [K] pour $f = 1$

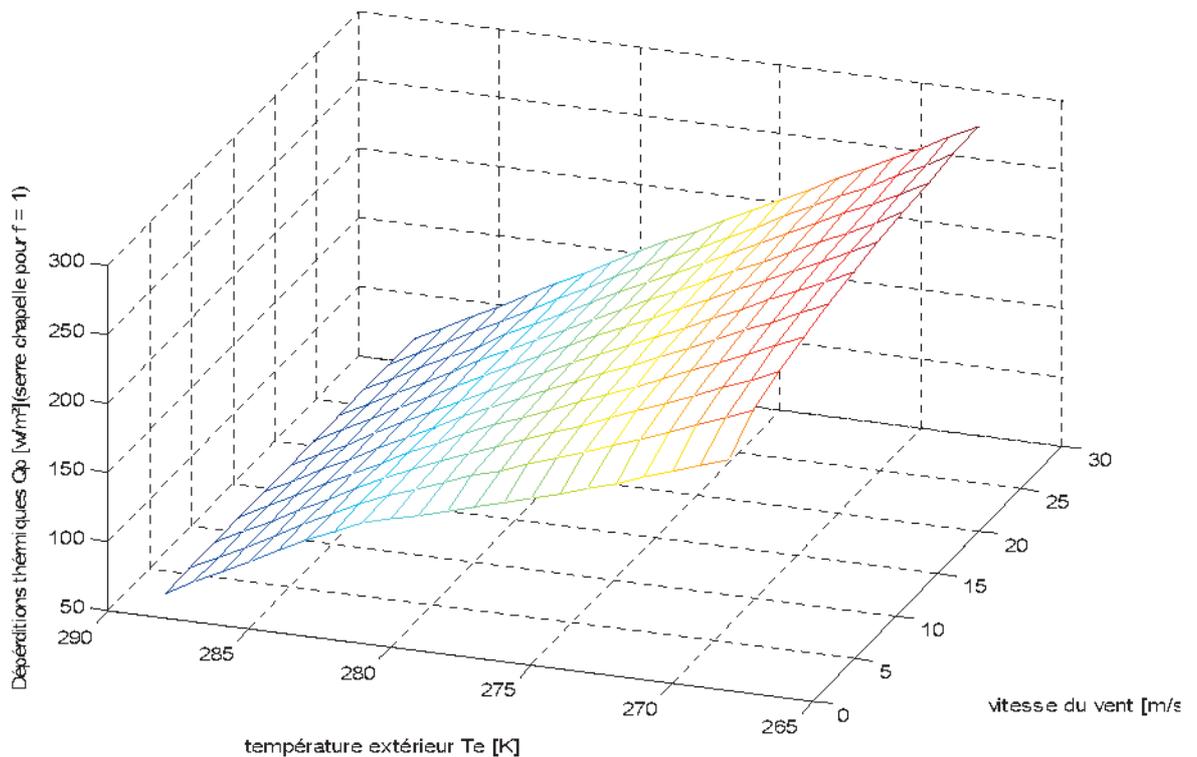


Fig. V.24. Diagramme en 3D de la variation déperditions thermiques Q_p [W/m^2] à travers la paroi en verre de la serre chapelle en fonction respectivement de l'évolution de la température extérieure T_e [K] et de la vitesse du vent v [m/s] pour $f = 1$

4. Comparaison

4.1. Comparaison entre les résultats de K

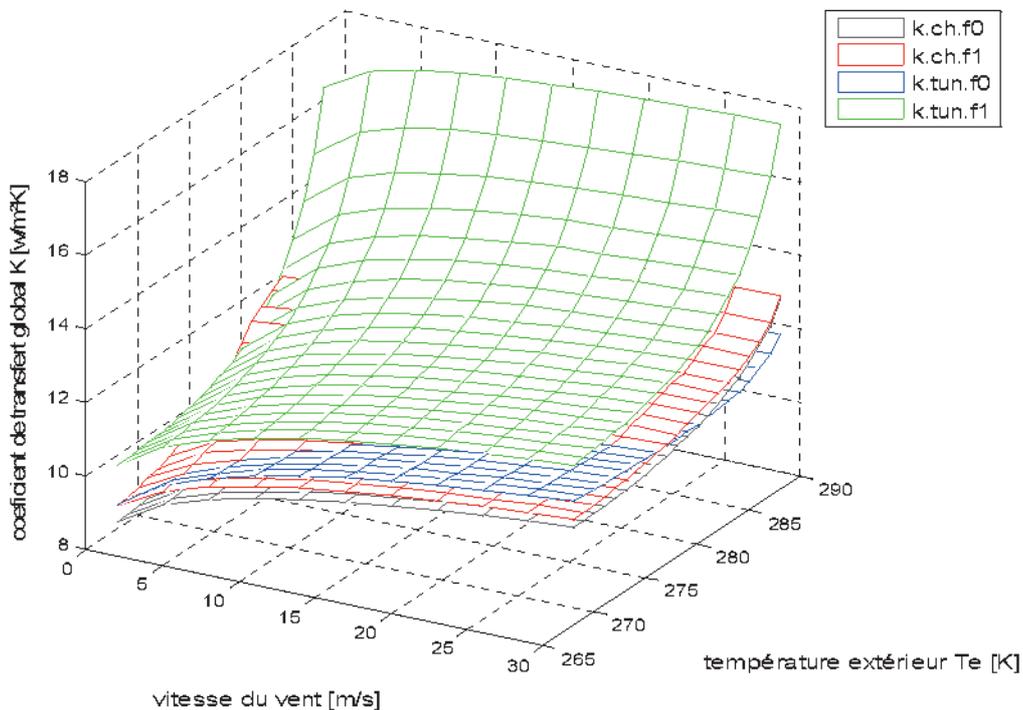


Fig. V.25. Représentation d'un diagramme en 3D de la variation du coefficient globale de transmission de chaleur K [$W / m^2.k$] à travers les parois en PE et en verre pour les serres tunnel et chapelle en fonction de la vitesse du vent v [m/s] et la température extérieure T_e [k] pour $f=0$ et 1.

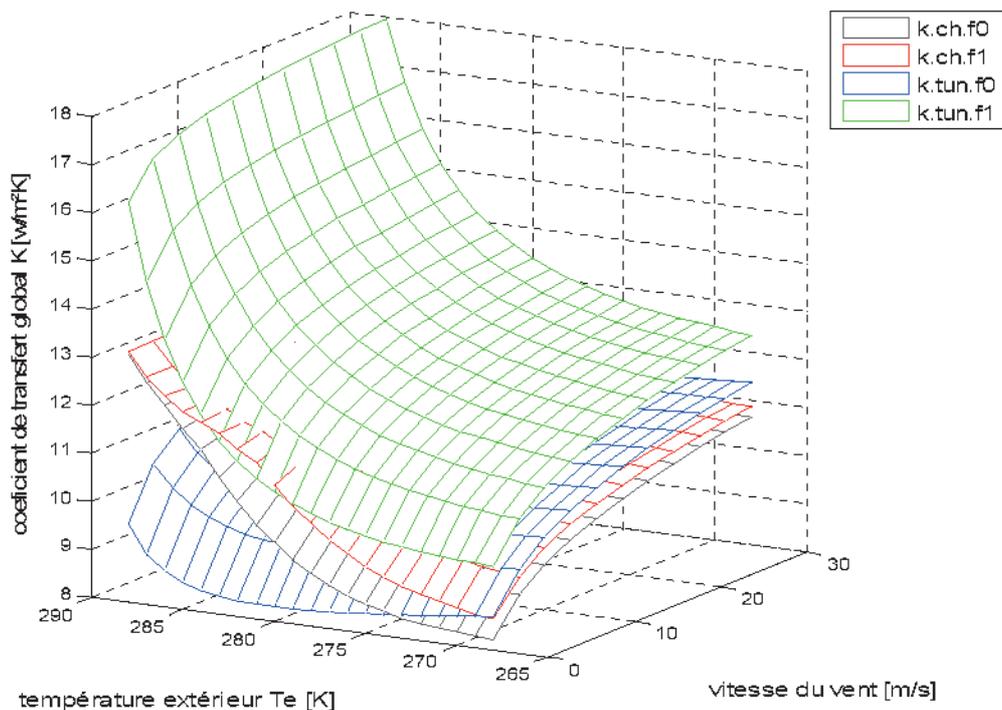


Fig. V.25 (vue de gauche)

4.2. Comparaison des déperditions thermiques

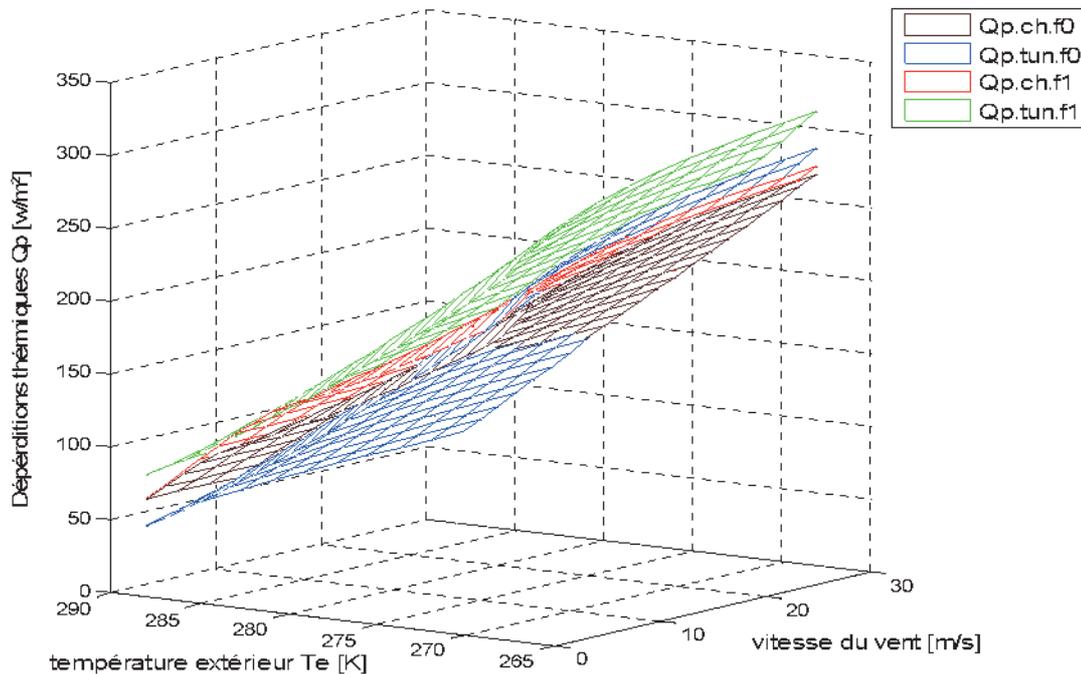


Fig. V.26. Représentation d'un diagramme en 3D de la variation déperditions thermiques Q_p [W/m^2] à travers les parois en PE et en verre pour les serres tunnel et chapelle en fonction de la vitesse du vent v [m/s] et la température extérieure T_e [k] pour $f=0$ et 1.

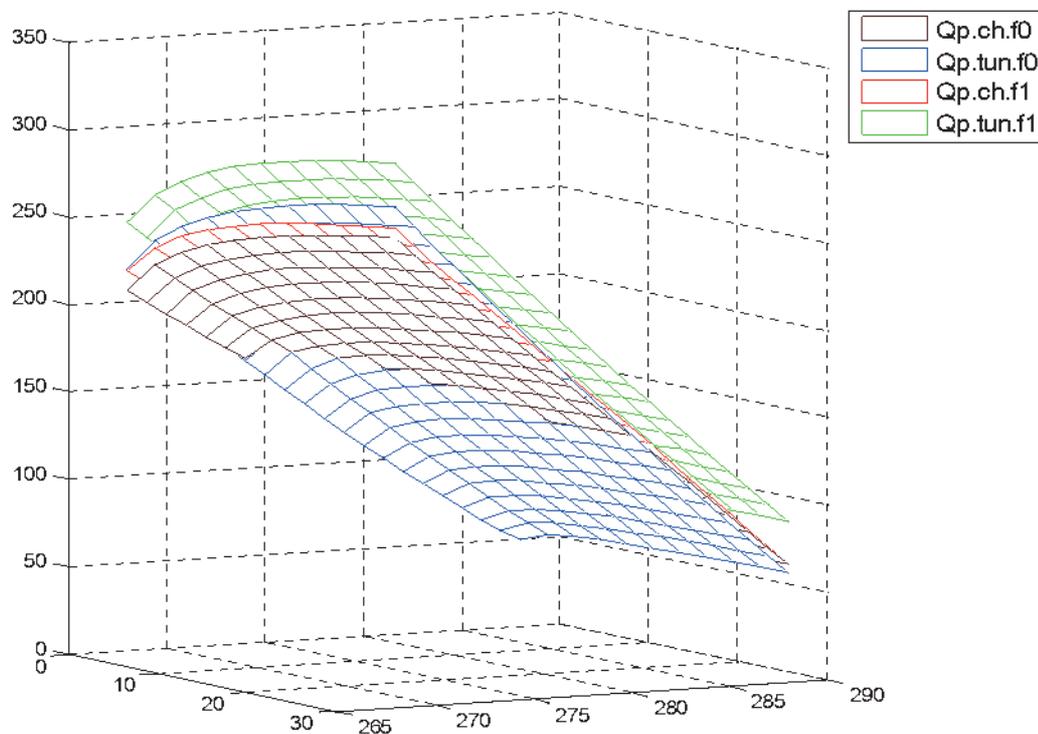


Fig. V.26 (vue de gauche)

5. Discussion générale

La variation du coefficient K ($W/m^2.k$) pour la serre tunnel à paroi en PE par une journée nuageuse, a une allure croissante accentuée jusqu'à la valeur de vitesse $v = 3$ m/s légèrement moins jusqu'à la vitesse $v = 10$ m/s et encore moins accentuée et linéarisée à partir de la vitesse de $v = 10$ m/s jusqu'à $v = 30$ m/s.

Alors que le coefficient de transmission de chaleur K ($W/m^2.k$) pour la serre chapelle à paroi en verre par une journée nuageuse a une allure plus stabilisé et moins accentuée que pour la serre tunnel.

Les valeurs de ce coefficient de transmission de la chaleur K ($W/m^2.k$) à travers la paroi de la serre sont plus grandes à ciel clair et plus petites lorsque le ciel est couvert.

Les valeurs de K ($W/m^2.k$) sont beaucoup élevées pour la serre tunnel, ayant une paroi en PE relativement transparente aux échanges radiatifs, alors qu'elles sont moins élevées pour la serre chapelle ayant la paroi en verre opaque aux échanges radiatifs.

Les valeurs de K augmentent quand l'écart entre les températures de l'ambiance interne à la serre et le milieu extérieur ($T_i - T_e$) diminue.

En d'autres termes, K augmente quand la température extérieure (T_e) se rapproche de la température intérieure (T_i).

Les déperditions thermiques à travers la paroi sont plus importantes à ciel clair et moins à ciel couvert.

Les déperditions thermiques à travers la paroi Q_p [W/m^2] de la serre sont plus élevées dans la serre tunnel que dans la serre chapelle.

Les déperditions thermiques à travers la paroi Q_p [W/m^2] sont plus importantes quand l'écart entre les températures intérieure et extérieure à la serre est grand et deviennent moins intense dans le cas contraire.

Les déperditions radiatifs sont plus intenses à travers la paroi en PE de la serre tunnel, relativement transparente aux radiations thermiques et d'une faible inertie par rapport à celle de la serre chapelle, ayant une couverture en verre d'épaisseur de 3 mm et opaque aux échanges thermiques ($\tau_{\text{ir}}=0$)

Conclusion générale

Conclusion générale

L'analyse théorique perçue d'une littérature scientifique spécialisée et sur la base de l'approche du modèle réduit et l'exploitation des modèles de connaissance nous ont permis d'exprimer les variations du coefficient de transfert de chaleur à travers la paroi des deux serres tunnel et chapelle en fonction de la vitesse du vent allant de $v = 0 \text{ m/s}$ à $v = 30 \text{ m/s}$ et pour une évolution d'une température extérieure T_e allant de 268 K à 288 K soit (de -5°C à 15°C).

Cette méthode, nous permet d'évaluer le coefficient global K , de maîtriser les déperditions thermiques et prévoir les besoins énergétiques nécessaires pour le bon fonctionnement du système serre, surtout de nuit où le refroidissement est prononcé, en fonction de paramètres climatiques facilement accessibles, de la température de l'air intérieur imposé par le serriste et des propriétés physiques et mécaniques des matériaux de la couverture et de la conception architecturale de la serre.

Cette méthode conduit à un affinement de l'estimation des déperditions thermiques, d'évaluation des besoins énergétiques du système serre. Elle permet aussi de classer et choisir le type de matériaux de la paroi le mieux adapté aux types de culture sous serre en tenant compte évidemment de l'aspect économique.

Il faut que :

- les serres revêtues de matériaux transparents aux radiations thermiques sont plus transparentes aux déperditions de la chaleur à travers la paroi
- l'influence de la vitesse du vent a un effet similaire pour tous les cas. Une augmentation de la vitesse du vent réduit une élévation du coefficient K

Conclusion générale

- un ciel couvert a un effet isolant pour la serre et limite les déperditions thermiques.

Cette méthode permet d'estimer les flux à travers la paroi en tenant compte des caractéristiques climatiques disponibles à partir des services de météorologie, de la technique culturale, du comportement des matériaux de couverture aux radiations thermiques et de la conception architecturales de la serre.

Elle permet aussi de séparer les différents de déperdition et d'évaluer leur importance.

ANNEXE

ANNEXE

1. Les mots clé de l'irrigation

Coefficient cultural (Kc) : Coefficients caractérisant les différents stades végétatifs de la plante.

Evapo-Transpiration Potentielle (E.T.P.) (mm) : Demande en eau du climat.

Le débit : Volume d'eau délivré par unité de temps exprimé le plus souvent en m³/heure ou litres/seconde. Un rappel important: 3,6 M³/heure = 1 litre/seconde.

L'efficacité de l'irrigation (%) : Rapport entre la quantité d'eau réellement efficace pour la culture, et la quantité d'eau apportée par l'irrigation.

L'efficacité du réseau d'irrigation (%) : Rapport entre la quantité d'eau délivrée par la borne et la quantité d'eau apportée par l'irrigation.

La maille (mètre par mètre) : Distances entre les organes de distribution (arroseurs, goutteurs). La première valeur correspond à l'espacement des organes de distribution sur la rampe, la seconde à l'écartement entre deux rampes.

Le Millimètre (mm) : Unité fondamentale caractérisant les termes du bilan hydrique
Un ordre de grandeur utile 1 mm = 10m³/hectare.

La perméabilité (mm/h) : Capacité d'un sol à laisser s'infiltrer l'eau.

La pluviométrie horaire (mm/h) : Hauteur d'eau distribuée en une heure. Elle doit être inférieure à la perméabilité du sol.

La portée (mètres) : Longueur du jet émis par un arroseur. Pour que la répartition de l'eau entre deux positions d'asperseurs soit homogène, il faut que la portée soit au minimum égale à 75 % de la distance qui les sépare.

La pression (Kg/cm² ou bar) : Force de l'eau sur une surface. En irrigation, c'est la force qui accompagne le déplacement de l'eau.

1 bar = 1 kg/cm².

1 bar = 1 Mètre de Colonne d'Eau (MCE). La pression peut se trouver sous deux états différents

- quand l'eau ne circule pas, on l'appelle pression statique.
- quand l'eau circule, on l'appelle pression dynamique; c est la pression de fonctionnement des distributeurs.

La Réserve Utile (R.U.) (mm) : Volume d'eau stocké dans le sol et utilisable par les plantes (racines).

Le tour d'eau (jour) : Durée entre deux irrigations sur le même secteur.

2. Tableau de conversion de l'intensité de la lumière

Source de lumière	$\mu\text{mol}/\text{m}^2.\text{d}$	Pied chandelle	Lux	W/m^2 (énergie totale)
Le soleil	1	5.0	54	0.51
Lampes au sodium haut pression	1	7.6	82	0.56
Lampes aux halogénures métalliques	1	6.6	71	0.59
Lampes fluorescentes blanc	1	6.9	74	0.54
Les lampes à incandescence	1	4.6	50	2.58

Tableau A.1 conversion de l'intensité de la lumière

3. Notions complémentaires sur la plante

3.2. Définition d'une hormone

Composé organique qui, synthétisé dans *une partie* de la plante et *transloqué* dans une *autre partie*, cause une réponse physiologique, à de *très faibles concentrations* ($1\mu\text{M}$ et moins). A titre de comparaison pondérale, les sucres, acides aminés, acides organiques et autres métabolites pèsent de l'ordre de 1 mM à 50 mM.

Il existe des composés qui entraînent des réponses physiologiques importantes mais qui ne sont pas des hormones naturelles, tels que :

- ion K^+ , inorganique,
- 2,4-D, auxine synthétique,
- saccharose, composé synthétisé puis transloqué mais jouant à forte concentration.

3.3. Nature et fonctions des hormones naturelles

Il existe cinq groupes d'hormones naturelles :

- au moins une auxine, ou acide indol-3-acétique (IAA),
- plusieurs gibbérellines (GA_1 , GA_2 ,..., GA_n),
- plusieurs cytokinines (CK),
- acide abscissique (ABA) et composés inhibiteurs,
- éthylène.

• **Les auxines.** Celles-ci sont essentiellement produites dans les méristèmes et régions de croissance active au niveau des parties aériennes. Elles se trouvent dans la plupart des tissus de la plante y compris dans les feuilles en sénescence. Le transport des auxines se fait dans le phloème, des parties aériennes vers les parties racinaires, mais également de cellule à cellule (transport orienté).

Les auxines activent l'élongation des coléoptiles et des tiges et favorisent le phototropisme et le géotropisme. Elles jouent un rôle important dans l'initiation et la formation des racines adventives et dans la différenciation du xylème. Par contre, elles inhibent l'élongation racinaire. La croissance des bourgeons axillaires est également inhibée par le maintien de la **dominance apicale**, qui est sous le contrôle des auxines. Enfin elles retardent la sénescence des feuilles et la chute des fruits.

La production des auxines est inhibée par la déficience en zinc et en phosphore, elle est favorisée par les gibbérellines et les cytokinines, qui en stimulent le transport.

ANNEXE

L'effet des auxines peut varier selon leurs concentrations, le type de cellules et le stade de développement de la plante.

• **Les cytokinines.** Celles-ci sont synthétisées dans les apex des racines, mais on les trouve aussi dans les parties aériennes, les semences et les fruits n'ayant pas atteint la maturité physiologique. Elles sont transloquées dans le xylème depuis les racines jusqu'aux parties aériennes. Au niveau de celles-ci, les cytokinines circulent lentement de cellule à cellule.

Les cytokinines jouent un rôle important dans la germination et favorisent la division cellulaire. Elles activent l'initiation des feuilles, des tiges et des stolons, et favorisent l'extension des feuilles et des cotylédons ainsi que la translocation des assimilés.

Leur rôle dans la transpiration est également rapporté. Les cytokinines inhibent la sénescence des feuilles et permettent la levée de la dormance des graines ainsi que celle de la dominance apicale des bourgeons axillaires chez certaines plantes.

Les facteurs affectant la synthèse, la translocation et l'activité des cytokinines sont peu connus. Cependant le stress hydrique, les hautes températures et les conditions d'hydromorphie inhibent la production des cytokinines dans les racines et leur transport vers les parties aériennes.

• **Les gibbérellines.** Celles-ci sont synthétisées dans les apex racinaires. On les trouve aussi dans les semences, les jeunes feuilles et les tiges. Leur transport des racines aux parties aériennes se fait dans le xylème. Le transport des gibbérellines au niveau des parties aériennes se fait aussi de cellule à cellule et, au niveau des feuilles, il se fait dans le phloème.

La germination des semences, l'élongation des tiges, l'expansion des feuilles, la floraison des plantes de jours longs et la croissance des fruits sont des processus physiologiques qui sont activés par les gibbérellines. Elles lèvent la dormance des semences et la dominance apicale. Mais elles inhibent la sénescence des feuilles et la maturation des fruits.

La synthèse des gibbérellines dans les racines et leur transport vers les parties aériennes sont inhibés par l'excès d'eau et par l'effet des jours courts.

• **L'éthylène.** Celui-ci est produit par toutes les parties de la plante, plus particulièrement, dans les régions apicales en croissance active et au cours de la maturation des fruits. Étant donné sa nature volatile, son transport est peu connu, mais il circule des racines vers les parties aériennes.

La maturation des fruits, la sénescence des feuilles et la chute des organes ainsi que la levée de la dominance apicale des bourgeons axillaires sont les principaux effets produits par l'éthylène. Cette hormone inhibe la division cellulaire ainsi que le géotropisme des tiges et des racines.

La production de l'éthylène est stimulée par la maturation des fruits, la sénescence des feuilles et des fleurs, le stress hydrique et l'effet des autres hormones. Sa production est inhibée par la lumière et par des conditions d'anaérobiose. Le métabolisme de l'éthylène et son transport au sein de la plante sont peu connus.

• **L'acide abscissique.** La synthèse de l'acide abscissique se fait essentiellement dans la partie terminale des racines. On le trouve aussi dans les feuilles, les bourgeons, les semences, les fruits et tubercules. Cette hormone circule facilement au niveau des cotylédons, des feuilles et des racines. Le transport se fait de cellule à cellule dans les parties aériennes.

La fermeture des stomates, la sénescence des feuilles, l'abscission, la dormance des bourgeons, et la formation des tubercules et des racines adventives sont des effets bien connus de l'acide abscissique. Son rôle dans la régulation stomatique en relation avec les réponses adaptatives des plantes au stress hydrique est essentiel.

L'acide abscissique inhibe la germination des semences, la croissance des bourgeons axillaires, l'élongation des tiges et des racines, et l'initiation florale.

Le stress hydrique, l'excès d'eau, la déficience en éléments minéraux et la salinité augmentent la production de l'acide abscissique. Mais le transport de cette hormone et son métabolisme ne sont pas encore clairement élucidés.

3.4. Régulation hormonale

Il est bien établi que les phénomènes de croissance et de développement dépendent de l'équilibre hormonal au sein de la plante. Cet équilibre est régi par :

- des rapports de concentrations,
- des gradients de concentrations.

*- La régulation hormonale de la croissance et du développement s'exerce aux niveaux suivants :

ANNEXE

- division cellulaire, expansion des cellules et leur différenciation,
- germination et dormance des graines et des bourgeons,
- initiation des feuilles, tiges, racines,
- production de grains, fruits et leur maturation,
- sénescence et mortalité des organes.

*- Aux hormones de croissance (IAA, GA, CK) dont les effets, à concentration normale dans la plante, entraînent la *promotion* de la croissance, on oppose les hormones de stress (ABA, éthylène) dont les effets, à concentration élevée, entraînent l'inhibition de la croissance.

*- A *même concentration* dans la plante, les hormones peuvent avoir des effets très contrastés sur les différents organes, en particulier sur la partie aérienne et racinaire.

3.5. Rôle des phytohormones en agriculture

Les activités promotrices et inhibitrices des différentes hormones naturelles, et leur implication dans la régulation de la croissance et du développement, ont suscité l'intérêt de fabriquer au laboratoire des molécules de synthèse ayant des effets spécifiques.

Le cas le plus spectaculaire est celui de l'auxine synthétique ou 2,4-D, largement utilisé comme herbicide. Plusieurs autres molécules de synthèse, de la famille des cytokinines, des gibbérellines et de l'acide abscissique sont actuellement disponibles pour diverses utilisations en agriculture : herbicides, régulateurs de croissance, inhibition de la germination, levée de la dormance, levée de la dominance apicale, retard de la sénescence, etc. L'application d'un produit tel que le cycocel (CCC) permet une meilleure répartition des assimilés entre les fruits qui sont, de ce fait, de tailles homogènes. Dans le cas des céréales, l'application des molécules de synthèse de cette nature permet un développement adéquat des épis et un remplissage homogène des grains.

3.6. Concepts de base

Malgré une large variabilité de comportement des plantes (plantes de lumière et plantes d'ombre, plantes de jours courts, de jours longs ou neutres, plantes à croissance déterminée ou indéterminée, ...etc.), les lois qui régissent leur croissance et par conséquent leur productivité ultérieure ont une validité très générale.

Pour comprendre le fonctionnement global d'une plante (ou d'un peuplement), l'analyse quantitative et le formalisme mathématique sont devenus, à partir des années 1920, des outils fondamentaux.

Durant la phase exponentielle, la croissance est analogue à une accumulation de capital selon la **loi des intérêts composés**. Le poids de l'embryon représente le "capital initial", W_0 , et l'efficacité photosynthétique de la plante représente le "taux d'intérêt",

$$\text{Soit : } W(t) = W_0(1+r)^t$$

$$\text{Si : } r \ll 1$$

$$\ln W(t) = \ln(W_0) + t \cdot \ln(1+r) \approx \ln(W_0) + rt$$

En échelle logarithmique, c'est une droite dont la pente correspond au taux d'intérêt, r . Ce concept est à la base de l'analyse quantitative classique de la croissance.

L'analyse requiert la détermination de 2 variables importantes :

- mesure de la biomasse présente à chaque instant, $W(t)$;
- mesure des surfaces assimilatrices à chaque instant, $L(t)$.

Dans la pratique, W et L peuvent représenter le poids sec et la surface foliaire d'une plante isolée, comme ils peuvent se référer à la biomasse par unité de surface de sol

(A) et à la surface foliaire par unité de surface de sol. Ce sont les fonctions de croissance de la biomasse et de l'indice foliaire (voir plus loin).

A partir des fonctions de croissance $W=f(t)$ et $L=f(t)$. On peut dériver les concepts qui suivent :

3.6.1 Vitesse absolue de croissance (CGR).

La vitesse absolue de croissance à chaque instant (*growth rate, crop growth rate*) se définit comme étant l'augmentation de biomasse (ou de poids sec de la plante) par unité de temps :

ANNEXE

$$GR = \frac{dW}{dt} \quad [kg / j] \text{ Plante isolée.}$$

$$GR = \frac{1}{A} \frac{dW}{dt} \quad [kg / (m^2 \cdot j)] \text{ peuplement A.1}$$

3.6.2. Vitesse relative de croissance (RGR).

La vitesse relative de croissance (*relative growth rate*) se définit pour une plante comme étant l'augmentation de poids sec par unité de poids existant par unité de temps :

$$RGR = \left(\frac{1}{W} \right) \frac{dW}{dt} = \frac{d(\ln W)}{dt} \quad [kg / (kg \cdot j)] \text{ ou } (j^{-1}) \dots \dots \dots A.2$$

Durant la phase de croissance exponentielle, RGR reste constant :

$$\ln W = \ln W_0 + rt \quad \text{soit : } RGR = \frac{d(\ln W)}{dt} = r = \text{constante.}$$

Une fois cette phase initiale de croissance terminée, RGR n'est plus constant et diminue progressivement avec l'âge des plantes.

3.6.3. Taux d'assimilation nette (NAR). Le taux d'assimilation nette (*net assimilation rate*) d'une plante se définit à chaque instant comme étant l'augmentation de biomasse par unité de surface assimilatrice existante par unité de temps :

$$NAR = \left(\frac{1}{L} \right) \frac{dW}{dt} = \frac{d(\ln W)}{dt} \quad [kg \cdot m^{-2} \text{ feuille} \cdot j^{-1}] \dots \dots \dots A.3$$

Noter que NAR est différent du taux de photosynthèse brute en ce sens qu'il représente l'investissement net des assimilés dans la croissance, c'est-à-dire la différence entre gain de carbone par photosynthèse et perte de carbone par respiration.

3.6.4. Surface foliaire massique (LAR).

Ce ratio, appelé *leaf area ratio*, se définit pour une plante (ou un couvert) comme étant le rapport instantané des surfaces assimilatrices, L, par unité de biomasse présente, W.

$$LAR = \frac{L}{W} \quad [m^2 / kg] \dots \dots \dots A.4$$

Ce ratio est aussi appelé "surface efficace pour la croissance de l'unité de poids de la plante".

On peut démontrer (Radford, 1967) que ces différents paramètres instantanés peuvent faire l'objet de mesures directes entre 2 états successifs de la croissance (t_1, W_1, L_1) et (t_2, W_2, L_2), et ont pour valeurs moyennes dans l'intervalle $[t_1, t_2]$:

$$\overline{CGR} = \frac{W_2 - W_1}{t_2 - t_1}$$

$$\overline{RGR} = \left(\frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t_2 - t_1} \right)$$

$$\overline{NAR} = \left(\frac{W_2 - W_1}{L_2 - L_1} \right) \left(\frac{\ln L_2 - \ln L_1}{t_2 - t_1} \right)$$

$$\overline{LAR} = \left(\frac{L_2 - L_1}{W_2 - W_1} \right) \left(\frac{\ln W_2 - \ln W_1}{\ln L_2 - \ln L_1} \right)$$

3.6.5. Surface foliaire spécifique (SLA).

La surface foliaire spécifique (*specific leaf area*) se définit par le rapport de la surface foliaire présente à chaque instant (L) au poids sec des feuilles correspondantes (WL) :

$$SLA = \left(\frac{L}{W_L} \right) \quad [m^2 / kg] \dots\dots A.5$$

Le SLA définit "l'épaisseur" des feuilles et revêt une signification écologique, physiologique et agronomique particulière. Selon certaines théories, toutes les réponses des plantes aux variations internes ou externes sont intégrées dans le SLA (Charles- Edward, 1981).

3.6.6. Poids foliaire spécifique (LWR).

Le poids foliaire spécifique (*leaf weight ratio*) se définit par le rapport du poids sec des feuilles (WL) au poids total de la plante (ou du couvert), W :

$$LWR = \frac{W_L}{W} \quad [en \% \text{ ou sans dim}] \dots\dots\dots A.6$$

Contrairement à SLA, LWR varie peu avec les fluctuations de l'environnement et avec les pratiques culturales.

3.6.7. Concept d'indice foliaire (LAI).

Par définition, l'indice foliaire (*leaf area index*) qui mesure la taille de l'appareil assimilateur représente le rapport entre la surface foliaire totale d'un couvert, L , et la surface de sol correspondante :

$$LAI = \frac{L}{A} \quad [sans \text{ dim}] \text{ ou } [m^2 \text{ feuille} / m^2 \text{ sol}] \dots\dots\dots A.7$$

Si WL est la masse foliaire (poids sec) contenue dans la surface A (sol), et SLA la surface spécifique des feuilles considérées, LAI est donné par le produit :

$$LAI = W_L \times SLA \dots\dots\dots A.8$$

Les méthodes de mesure de LAI sont diversifiées et leur précision est variable .On peut suggérer les méthodes suivantes:

- **Méthode des dimensions linéaires de Duncan.** Connaissant longueur (L) et largeur (l) des feuilles, on déduit leur surface $S = L \times l$ et on multiplie par un coefficient (voisin de 1 généralement). Cela donne la surface par plante ; il faut la densité de peuplement ou la surface de sol par plante pour calculer LAI. Cette méthode est typiquement utilisée sur maïs et sorgho.
- **Méthode du disque de Watson.** Elle est particulièrement utilisée pour les plantes à feuilles larges (Betterave, tabac). Pour une surface fixée (celle du disque), on détermine le poids sec correspondant et donc le SLA. L'indice foliaire se déduit en multipliant par le poids total des feuilles par unité de surface de sol.
- **Méthode de cartographie des feuilles de poids connu,** utilisée sur diverses graminées et basée sur le même principe que le planimétrage électronique.
- **Mesure de surface foliaire par planimètre électronique** d'un échantillon de feuilles de poids sec connu ; en déterminant SLA et en multipliant par la quantité de matière sèche des feuilles par unité de surface, on obtient le LAI. Très utilisée chez les céréales et graminées fourragères, cette méthode sert aussi à mesurer la surface racinaire de nombreuses cultures.

3.6.8. Durée d'action foliaire (LAD).

La durée d'action foliaire (*leaf area duration*) intègre l'indice foliaire et la durée de persistance de la surface foliaire. C'est tout simplement l'intégrale de LAI par rapport à la durée de croissance considérée.

ANNEXE

LAD représente la persistance du feuillage du couvert ou la durée photosynthétique de celui-ci, et de ce fait a une dimension de temps [j]. Si au lieu d'intégrer LAI on considère L (la surface foliaire), LAD admet pour dimension [m².j].

3.7. Lois fondamentales de l'analyse classique de la croissance

3.7.1. Décomposition du CGR.

Par définition, on a pour une communauté de plantes :

$$CGR = \frac{1}{A} \frac{dW}{dt} = \underbrace{\left(\frac{L}{A}\right)}_{LAI} \underbrace{\left(\frac{dW}{Ldt}\right)}_{NAR} \quad \text{Soit : } CGR = LAI \times NAR \dots\dots\dots A.9$$

3.7.2 Décomposition du RGR. Par définition :

$$RGR = \frac{1}{W} \frac{dW}{dt} = \underbrace{\left(\frac{L}{A}\right)}_{LAR} \underbrace{\left(\frac{dW}{Ldt}\right)}_{NAR} \quad \text{Soit : } RGR = LAR \times NAR \dots\dots\dots A.10$$

Remarques

- Les équations A.9 et A.10 sont valides à chaque instant mais les relations ne sont pas valables pour les valeurs moyennes des paramètres ($\overline{RGR} \neq \overline{NAR} \times \overline{LAR}$) sauf dans des situations particulières (phase de croissance exponentielle ; phase de croissance linéaire, s'il y a relation de linéarité entre W et L).
- La première équation ($CGR = LAI \times NAR$) est généralement utilisée pour analyser la croissance d'un peuplement (communauté de plantes) et la seconde est plus appropriée pour l'analyse de la croissance de plantes isolées.

3.7.3. Décomposition du LAR.

Le paramètre LAR qui définit les capacités assimilatrices d'une plante (d'un couvert) peut être décomposé en deux autres paramètres importants à considérer pour analyser les réponses des plantes aux facteurs de l'environnement (température, éclairage, etc.) ou aux pratiques culturales (densité de peuplement, fertilisation, etc.). On peut écrire :

$$LAR = \frac{1}{L} = \underbrace{\left(\frac{W_L}{W}\right)}_{LWR} \underbrace{\left(\frac{L}{W_L}\right)}_{SLA} \quad \text{Soit } LAR = LWR \times SLA \dots\dots\dots A.11$$

Les concepts de LWR et SLA permettent d'analyser les variations du LAR en termes de :

- variations de la distribution des produits de photosynthèse entre la croissance foliaire (WL) et la croissance des autres organes ;
- variations de "l'épaisseur" des feuilles (L/WL) c'est-à-dire de la surface foliaire par unité de poids sec de feuille.

Il est intéressant de noter que les équations fondamentales de l'analyse classique permettent d'analyser la croissance en termes de : taux de croissance = taux d'assimilation x taille de l'appareil assimilateur.

3.8. Développements récents

3.8.1. Relation entre CGR et RGR

Classiquement, on utilise les 2 équations fondamentales A.9 et A.10, l'une pour analyser la croissance de plantes isolées ou de communautés de plantes espacées, comme on les observe au début du développement du couvert avec l'absence de compétition :

$$RGR = LAR \times NAR, \quad (dW/dt) = (L/W) (dW/Ldt)$$

Et l'autre pour analyser la croissance d'un peuplement dense :

$$CGR = LAI \times NAR$$

ANNEXE

En considérant que W est le poids sec d'une plante, N le nombre de plantes par unité de surface et L la surface foliaire d'une plante, on peut écrire :

$$N \left(\frac{dW}{dt} \right) = (NL) \times (1/L) \left(\frac{dW}{dt} \right)$$

Soit $CGR = LAI \times NAR$

On peut aussi écrire par analogie :

$$N \left(\frac{dW}{dt} \right) = (NW) \times (1/W) \left(\frac{dW}{dt} \right)$$

soit $CGR = \text{biomasse} \times RGR$ A.12

Dans la pratique, un peuplement commence par être ouvert (plantes espacées) et progressivement tend à devenir dense (couvert fermé).

Cette formulation permet donc, en combinant les équations A.9 et A.12, de fournir un outil d'analyse valable durant tout le cycle de croissance. L'approche permet aussi de pousser le développement de l'analyse classique, pour l'étendre à la discussion d'autres processus.

3.8.2. Relation entre CGR et rayonnement incident

On peut écrire :

$$N \left(\frac{dW}{dt} \right) = (I_0) \left(\frac{NJ}{I_0} \right) \left(\frac{1}{J} \right) \left(\frac{dW}{dt} \right)$$

Où : I_0 = rayonnement incident (W/m^2 , ou MJ/m^2)

J = rayonnement intercepté par plante (W/m^2 ou MJ/m^2)

N = nombre de plantes/ m^2 .

Soit $CGR = I_0 \cdot Ei \cdot Eu$ A.13

Où : $Ei = NJ/I_0$ représente le rapport du rayonnement intercepté par rapport au rayonnement incident. C'est, par définition, l'efficacité d'interception (en %) de la lumière par le couvert végétal ;

$Eu = (1/J) (dW/dt)$ correspond à l'accroissement de la matière sèche accumulée par une plante ramené au rayonnement intercepté par cette plante. C'est, par définition, l'efficacité d'utilisation du rayonnement intercepté par le couvert végétal (g. $MS.M/J$), en considérant les N plantes.

Ce développement constitue un cadre analytique intéressant pour l'élaboration de modèles simples de la croissance et de la productivité des plantes cultivées.

3.9 Analyse quantitative du développement

3.9.1. Caractérisation du développement

Nous avons déjà souligné l'idée que le développement est un phénomène discret, repérable dans le temps et non directement mesurable comme c'est le cas pour la croissance. Ainsi, une semence germe ou ne germe pas, une plantule émerge ou n'émerge pas, une plante fleurit ou ne fleurit pas et un grain mûrit ou avorte. Après germination et émergence, la croissance des cellules primordiales et leur différenciation donnent naissance aux futures feuilles, tiges, inflorescences et racines, selon une chronologie génétiquement contrôlée. On caractérise alors le développement en termes de *durée* des périodes d'apparition des différents organes et de *vitesse* d'apparition de ces organes durant chacune des périodes considérées.

3.9.2. Échelles de développement

Conventionnellement, on utilise des échelles quantitatives permettant de caractériser les périodes de développement et les stades de développement dans chaque période par des nombres arbitrairement fixés, plus particulièrement dans le cas des céréales.

La fig. I.18 représente le **code décimal de Zadoks**, numéroté de 10 à 100, et l'**échelle de Feeke**, allant de 1 à 11.5. A titre d'illustration, l'échelle de Feeke permet de caractériser la période de tallage (*stades 1 à 5*), la phase de montaison (*stades 6 à 10*), la phase épiaison (*stades 10.1 à 10.5*) et la phase de maturation (*stades 10.5 à 11.4*). Il existe plusieurs variantes correspondant à

ANNEXE

des échelles modifiées pour faire apparaître de manière plus détaillée certaines phases comme la floraison (*stades 10.5.1 à 10.5.3*) mais elles sont toutes basées sur le repérage des caractères visibles extérieurement à l'oeil nu et la correspondance avec un nombre déterminé sur l'échelle. Ce type d'échelles est très utilisé en amélioration des plantes. Les agronomes utilisent plutôt **l'échelle de Jonard** basée sur la détermination des stades de l'apex, dont une variante est décrite dans la figure 6.1, plus haut. Des illustrations détaillées de ces échelles sont présentées dans Jonard et al. (1952), Large (1954) et Zadoks et al. (1974).

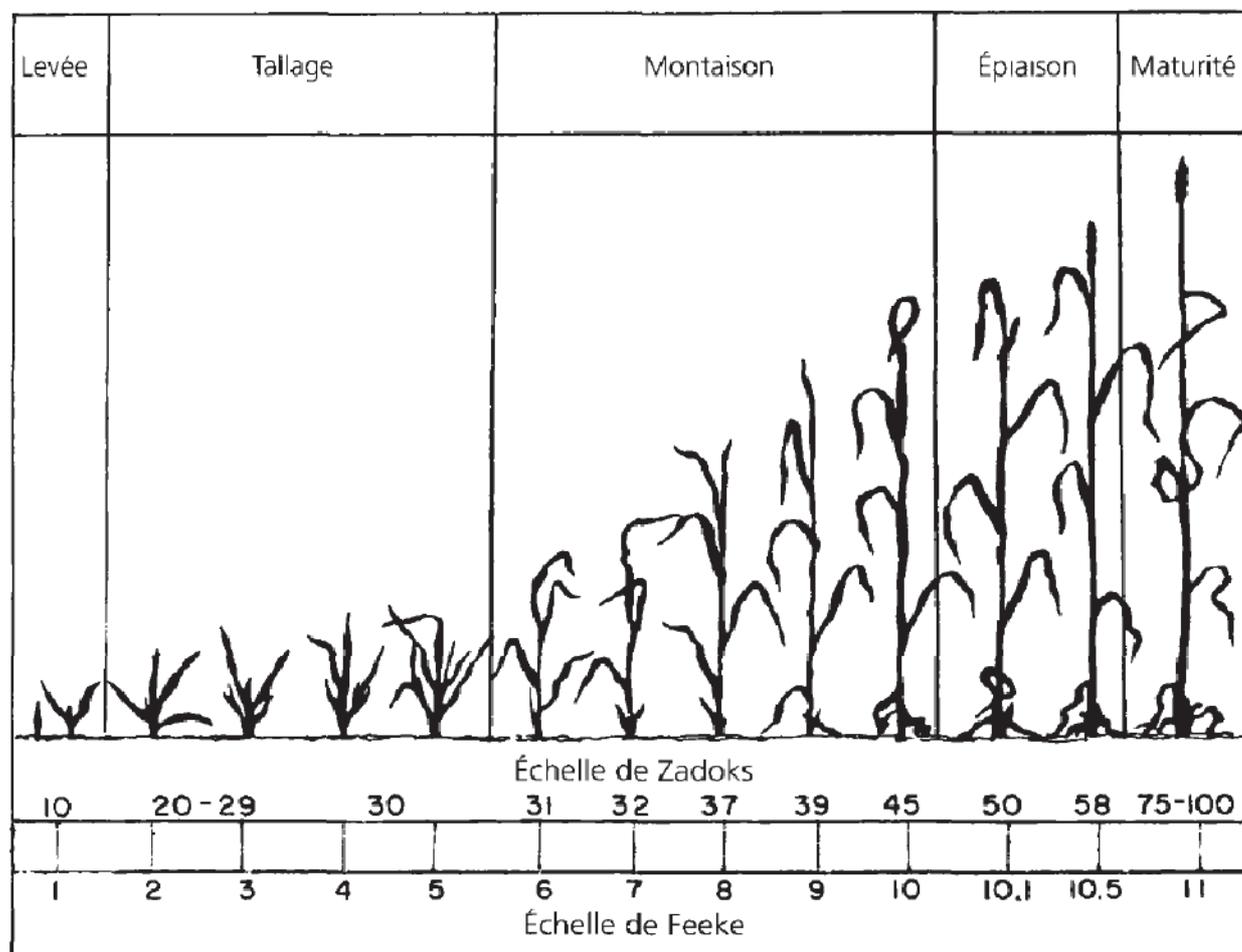


Fig. A.1 Appréciation quantitative des stades de développement des céréales par les échelles de Zadoks et de Feeke.

3.9.3. Développement et élaboration du rendement

La caractérisation des stades de développement est souvent couplée avec la méthode de l'analyse de l'élaboration du rendement et de ses composantes. Cela permet de situer les périodes de formation des composantes du rendement dans le cycle de développement de la culture. Un exemple de cette démarche est donné dans la fig. A.2 pour le blé et le soja.

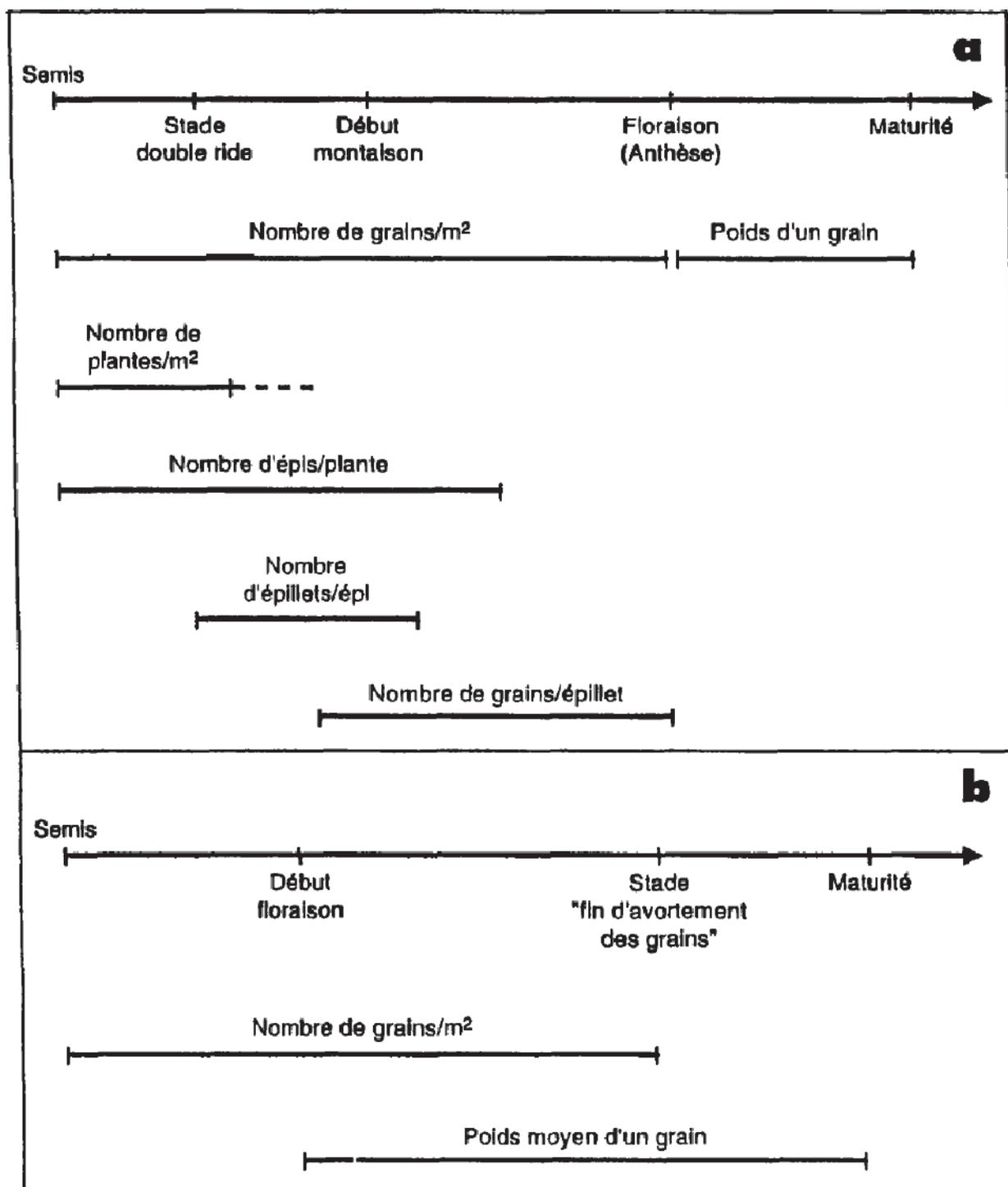


Fig. A.2. Périodes de formation des composantes du rendement du blé d'hiver (a) et du soja (b).

Pour le blé et de nombreuses autres espèces cultivées, on peut écrire :

$$\text{Rendement (grains/m}^2\text{)} = \text{NP} \times \text{NEP} \times \text{NGE} \times \text{PMG}$$

Où : NP = nombre de plantes par m²

NEP = nombre d'épis par plante

NGE - nombre de grains par épi

PMG = poids moyen d'un grain.

Chaque composante de rendement est influencée par les facteurs et conditions de milieu pendant sa phase de formation. Les effets (favorables ou défavorables) se manifestent le plus souvent au

ANNEXE

niveau de la durée des périodes de développement, de la vitesse des processus mis en jeu et des valeurs atteintes par chaque composante.

De ce fait, l'analyse des composantes du rendement constitue un outil intéressant de diagnostic des problèmes agronomiques pour chacune des périodes considérées.

La période de développement est généralement repérée à partir d'une date initiale qui correspond à la date de semis, à la date d'émergence des plantules ou à tout autre événement du cycle de croissance de la plante. La durée t de développement est celle de la période séparant deux événements successifs. La vitesse v est définie comme étant l'inverse du temps t , soit $v = (1/t)$ [jour⁻¹].

Pour la plupart des phénomènes biologiques, la vitesse de développement est fortement dépendante de la température. Le concept de somme de degrés x jour est utilisé pour rendre compte de cette dépendance et on considère que v est proportionnelle à la température moyenne journalière, T , diminuée d'une température de base T_b , de sorte que :

$$v = \alpha(T - T_b), \text{ tel que : } \alpha = \text{constante}$$

La somme de degrés x jour est alors $X(T - T_b)$, cumulé sur la durée des phases de croissance. On peut montrer que la vitesse de développement dépend de la photopériode de manière similaire. L'analyse quantitative de ces effets reste limitée.

GR=dW/dt	[kg.j ⁻¹]	Vitesse absolue de croissance (plante)
CGR = (1/A) (dW/dt)	[kg.m ⁻² .j ⁻¹]	Vitesse absolue de croissance (peuplement)
RGR = (1/W) (dW/dt)	[kg.kg ⁻¹ .j ⁻¹ ou j ⁻¹]	Vitesse relative de croissance (plante ou peuplement)
NAR = (1/L) (dW/dt)	[kg.m ⁻² feuille.j ⁻¹]	Taux d'assimilation nette
LAR = L/W	[m ² .kg ⁻¹]	Surface foliaire massique
SLA = L/W _L	[m ² feuille.kg ⁻¹]	Surface foliaire spécifique
LWR=W _L /W	[% ou sans dimension]	Poids foliaire spécifique
LAI = L/A	[m ² feuille/m ² sol]	Indice foliaire
LAD = Σ(LAI x D)	[m ² .jour, ou jour]	Durée d'action foliaire
Lois classiques		
CR = LAI x NAR, RGR = LAR x NAR ; LAR = LWR x SLA		
• Développements récents		
CGR = Biomasse x RGR Relation entre CGR et RGR		
CGR = E ₀ .E _I .E _u Relation entre CGR et rayonnement incident		
N	Nombre de plantes/m ²	
W(t)	Poids sec à l'instant t	[kg; kg/m ²]
W ₀	Poids sec initial, ou capital	[kg, kg/ m ²]
W _L	Poids sec des feuilles	[kg]
L(t)	Surface foliaire à l'instant t	[m ²]
A	Surface de sol correspondant à L	[m ²]
D	Durée de croissance	[jour]
T, t ₀	Temps instantané et temps initial t ₀	[jour]
I ₀ , J	Rayonnement incident ou intercepté	[Mj/m ²]
E _I	Efficiéce d'interception du rayonnement incident	[%]
E _u	Efficiéce d'utilisation du rayonnement intercepté	[g MS/Mj]

Tableau A.2 Analyse quantitative classique de la croissance et développements

4. Mesure de la dissipation thermique

La chaleur est une forme d'énergie et s'exprime en joules, BTU, tonnes ou calories. La dissipation thermique d'un équipement s'exprime couramment en BTU par heure, en tonnes par jour ou en joules par seconde (un joule par seconde est l'équivalent à un Watt). Il n'y a pas de raison logique à la diversité de ces unités de mesure, mais chacune d'elle peut être utilisée pour exprimer la puissance ou la capacité de refroidissement.

L'emploi simultané de ces mesures est une source de grande confusion, tant pour les utilisateurs que pour les spécialistes. Heureusement, les organismes de normalisation du monde entier cherchent à promouvoir une unité standard, le Watt, pour toutes les mesures de puissance et de capacité de refroidissement. Les BTU et les tonnes de réfrigération sont des unités archaïques qui finiront par disparaître.

En Amérique du Nord, les puissances et les capacités de refroidissement sont encore souvent exprimées en BTU (British Thermal Unit) et en tonnes. Pour cette raison, nous avons inclus un tableau de conversion des unités dans le but d'aider le lecteur :

Valeur en :	Multipliée par :	Donne :
BTU par heure	0,293	Watts
Watts	3,41	BTU par heure
Tonnes	3530	Watts
Watts	0,000283	Tonnes

Tableau A.3 conversion des unités de chaleur

Le terme « tonnes » fait référence à la capacité de refroidissement de la glace et remonte à la période 1870 - 1930, quand on mesurait la capacité des installations de réfrigération d'après leur production quotidienne de blocs de glace.

5. Éclairage naturel

En serre, il est extrêmement variable dans le temps comme dans l'espace, avec souvent des niveaux trop faibles pour une production élevée. Celle-ci suppose donc d'abord des serres captant le maximum de la lumière solaire, et d'autant plus que la saison est plus hivernale et la latitude plus élevée.

5.1 Les dispositions favorisant l'éclairage naturel hivernal concernent :

a) la forme et l'orientation des serres :

- serres uni-chapelles :
- orientation est /ouest et large écartement
- toit courbe ou à versants plans à forte pente

- serres multi-chapelles :

- orientation nord /sud ;
- toutes serres :
- grande hauteur des faces latérales ;

b) la transmission de la lumière par le vitrage :

- le matériau transparent :
- facteur de transmission du rayonnement PAR élevé et stable,
- propreté ;
- les éléments opaques :
- les plus réduits possibles (ossature et barres à vitrage) ;
- les obstacles internes :
- équipements aériens les plus réduits possibles (chauffage, écrans...).

Une réelle maîtrise de la production implique celle de l'éclairage : une grande « luminosité » naturelle ne suffit pas et des dispositifs complémentaires sont fréquemment utilisés pour l'accroître ou la réduire.

5.2 Éclairage artificiel Il est à concevoir en fonction de l'objectif.

5.2.1. Éclairage photosynthétique

Étant donné les éclairagements très élevés nécessaires, les lampes doivent émettre essentiellement dans le PAR et avec un bon rendement. Les plus utilisées actuellement sont :

- les lampes à vapeur de sodium haute pression, notamment celles de 400 W, consommant 440 W électriques et émettant 120 W dans le PAR ;
- les tubes fluorescents, lorsque la hauteur disponible est faible au-dessus des cultures : quelques décimètres.

5.2.2. Éclairage morphogénétique et notamment photopériodique

Les éclairagements nécessaires étant faibles et les radiations réparties dans une large plage (du bleu au proche IR et notamment le rouge clair), la gamme des lampes utilisables est beaucoup plus large :

- lampes à incandescence, surtout lorsque les durées d'éclairage sont faibles ;
- tubes fluorescents.

5.3. Éclairage d'appoint ou éclairage totalement artificiel

5.3.1. Éclairage d'appoint à la lumière du jour celle-ci fournissant les radiations à effet morphogénétique, le complément peut être apporté seulement par des lampes à grande efficacité photosynthétique, du moins lorsque cet appoint n'est pas de trop longue durée.

5.3.2. Éclairage totalement artificiel il doit couvrir toute la plage des rayonnements actifs et associe des lampes des deux groupes précédents. Des tableaux, établis conjointement par les constructeurs de lampes et les organismes d'expérimentation, précisent, pour de nombreuses cultures, les modalités d'éclairage (intensité, époque, durée...) en fonction de l'objectif.

6. Tableau des ordres de grandeur des caractéristiques principales de divers matériaux de qualité horticole utilisés en couverture de serres

	unités	Verre				Plastique				
		Verre à vitre 3mm	Vitrage double		en plaque			en film		
			Réfléchissant 2x4mm	Isolant 2x4mm	Polyesters 1 mm	Chlorure polyvinyle 1 mm	Chlorure de polyvinyle plastifié 0,15 mm 0,20 mm	Polyéthylène basse densité 0,10mm 0,15mm	Polyéthylène vinyle acétate 0,10 mm 0,15mm	
Propriétés optiques	indice de réfraction n_D	1,52	1,52	1,52 à 1,57	1,54	1,54	1,54	1,51	1,51	1,51
	facteur de transmission	a) rayonnement visible (0,38 - 0,76 μm)	0,87 à 0,90	0,70 à 0,40	0,70 à 0,80	0,85 à 0,93	0,77 à 0,80	0,80 à 0,87	0,70 à 0,85	0,70 à 0,85
		b) rayonnement solaire (0,3 - 2,5 μm) c) rayonnement I.R. (5-25 μm)	0,85	0,50 à 0,10	0,6 à 0,70	0,73	0,75	0,82	0,80	0,80
Propriétés physiques et mécaniques	masse volumique ρ	2,5	2,5	1,5 à 1,6	1,19	1,4	1,2 à 1,3	0,91 à 0,92	0,92 à 0,93	
	module d'élasticité (Young) E	7000 à 7500	7000 à 7500	800 à 1000	300	300	2 à 10	18 à 22	14 à 17	
	résistance à la traction	4 à 9	4 à 9	9 à 14	6 à 7	4,5 à 6,5	1,5 à 2,5	1,2 à 1,4	1,5 à 2	
	résistance à la flexion	4 à 5	4 à 5	1,5 à 2,5	11	8 à 12	—	1 à 1,2	—	
	allongement à la rupture	—	—	Très faible	Très faible	50 à 200	1,50 à 3,00	350 à 500	650 à 900	
	résistance à la déchirure amorcée	g	—	—	—	—	500 à 800 à 1000	400 à 700	400 à 900	
	résistance à la déchirure non amorcée	g	—	—	—	—	> 3200	1300 à 2600	1900 à 2600	
	résistance à l'impact	g	—	—	—	—	—	—	500 à 800 à 1200	
Propriétés thermique	coefficient de dilatation linéique α	8 à 9	8 à 9	40 à 50	73	60 à 80	60 à 80	200	100 à 200	
	coefficient de conductivité thermique λ	0,7 à 0,9	0,7 à 0,9	0,17 à 0,23	0,16 à 0,17	0,15	0,14	0,29	0,35 à 0,41	
	coefficient de transmission thermique K	5,9	1,5 à 2	5,8	5,5	5,3	5,8	5,8	6,0	
	tenu au froid et à la chaleur	°C	—	-20 à +100	-60 à +80	-20 à +70	-20 à +50	-20 à +50	-40 à +50	-40 à +70
durabilité	—	—	5 à 10 ans si absorbeurs UV et résine hort.	15 à 25 ans	5 à 10 ans si absorbeur UV	1 à 2 ans	0,5 à 1 année sauf fabrication spéciale	1 à 1,5 ans sauf fabrication spéciale	1 à 1,5 ans sauf fabrication spéciale	

TABLEAU A.4. Ordres de grandeur des caractéristiques principales de divers matériaux de qualité horticoles utilisés en couverture de serres.

Bibliographie

- [1] **ANSIAUX J.**, étude des composantes et du rendement de la photosynthèse ; Gembloux 1972
- [2] **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, 172pp,
- [3] **VSSAR R. et MAHER M. J.**,1982., Verification study of a numerical greenhouse microclimate model, Trans. ASAE, 25 1711-1720 pp.
- [4] **BAILEY B et COTTON.**, 1990., Glasshouse thermal screen: influence of single and double screens on heat loss and crop environment, 15-20 pp.
- [5] **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.
- [6] **BAILLE M., LAURY J. P., et BAILLE A.**, 1993., Influence du matériaux de couverture sur les échanges énergétiques d'une serre. Agronomie, 3 (3)/197- 206 pp
- [7] **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.L.H., 15,33-37 pp.
- [8] **BANDIERI 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
- [9] **BIBI-TRIKI(I.N, BENYAROU. F, BENYOUCEF. B et M.A.R. ELSAYED.**, 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
- [10] **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
- [11] **BOT G.P.A.**, 1993., Greenhouse climate: from physical process to a dynamic model. Thesis PH6D Dissertation Agric. Univ. Wageningen, The Netherlands.
- [12] **NISEN.**, 1987., Analysis of thermal performance of greenhouse as a solar collector. Energy in Agriculture, 6, 17. 26 pp.
- [13] **DIGNIAUX R.**, Distribution d'un rayonnement solaire en Belgique IRM publication série A n 71 Bruxelles 1973
- [14] **BOULARD T., BAILLE A.**,1993., A simple Greenhouse climate control, Model incorporating effects of ventilation natural ventilation measurements and modelling. Agricultural and Forest Meteorology, 65, 145 -157 pp.
- [15] **BOULARD T., FARGUES J., PONCET C., RIDRA y 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. CTIL, Paris (FRA).
- [16] **BRUNDEET E., et al.**, 1978., Energy conservation and solar heating system for new and existing greenhouse, Report N° ISSN # 705/7393 Dept. Mech. Eng., University of the Waterford, Ontario, Canada.
- [17] **BUSINGER J. A.**, 1963., The glasshouse (greenhouse) climate, Physics of plant Environment (ed. by W. R. van Wijk), North -Hold Publi. Co., Amsterdam, 277-318 pp.
- [18] **CHIAPALE J. p, KITTAS C. et de VILLELE O.**, 1981., Estimation régionale des besoins de chauffage des serres, Acta Horticultural 115, 493-502 pp.
- [19] **DEL TOUR. et al.**, 1985., Dynamic Modelling of heat and mass transfer in greenhouse, Acta Horticultural 174, 119-126 pp.
- [20] **GIRARD J. D.**, 1989, Système d'Analyse de Transfert Thermique, Thèse de l'institut National Polytechnique de Grenoble.
- [21] **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.
- [22] **JOLLIET O.**, 1988., Modélisation du comportement thermique d'une serre horticole thèse de Doctorat, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 247p.

- [23] **KIMBALL B. A.**, 1973., Simulation of the energy balance greenhouse. *Agric. Meteor.* 11,243- 26Opp.
- [24] **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.
- [25] **KINDELAN NI.**, 1990.. Dynamic modelling of greenhouse environment, *Trans. ASAE* 23, 1232-1239 pp.
- [26] **MAHER M. J. et O'FLAHERTY O.**, 1973., An analysis of greenhouse climate, *J. Agric. Enging. Res.* 18, 197-203 pp.
- [27] **MEDJAHDI RYAD**, contribution à l'étude du bilan thermique et énergétique d'une serre solaire. Détermination du coefficient globale de transmission de chaleur à travers la paroi d'une serre. Mémoire de magister en physique énergétique. Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen.
- [28] **MONTEIL C..**, 1985., Contribution informatique à l'analyse énergétique des serres agricoles. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 168 pp.
- [29] **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.
- [30] **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.
- [31] **SELCUK M. K.**, 1971., Analysis, design and performance evaluation of controlled environment greenhouses, *Am. Soc. Heating Refrig. Arcond Eng.Trans.* 77, 72-78 pp.
- [32] **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.
- [33] **TAKAKURA T., KURATA K. et HONJO T.**, 1985 Physical models and the greenhouse
- [34] **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
- [35] **TANT AU IL J.,**, 1995., Greenhouse climate control using mathematical models. *Acta Horticultural*, 174,449-459 pp. TEN
- [36] **UDINK TEN CATE A. J.**, 1993., Modelling and (adaptive) control of greenhouse climate Thesis PH-D Dissertation Agric. Univ. Wageningen, Netherlands..
- [37] **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.
- [38] **VON ELSNER B.**, 1982., Das Kleinklima der Warmeverbrauch von geschlossenen GewachshaÜsem, Institut fUr Technik in Gartenbau, Univ. Bannover, Beft 12. 197 pp.
- [39] **W ALKER J. N.**, 1965., Predicting temperatures in ventilation greenhouse. *Trans. ASAE* 8,445- 448pp.

Les symbols

Al et C	_	Paramètre du modèle de renouvellement d'air de la serre
Bo	_	Rapport de Bowen = $K_s(T_i - T_e) / K_l(P_i - P_e)$
y	_	Rapport = surface du sol de serre / surface de la paroi de serre
e	m	Epaisseur des matériaux de couverture
f_{pa} . f_{pp}	_	Facteur de forme paroi-atmosphère, paroi-paroi
G_v	m^3/s	débit d'air volumique
f_{psi} . f_{pse}	_	Facteur de forme paroi-sol intérieur . paroi-sol extérieur
h_i . h_e	$W/(m^2.K)$	Coefficient d'échanges superficiels au niveau de la paroi interne, de la paroi externe
h_{ci} . h_{ce}	$W/(m^2.K)$	Coefficient d'échanges convectifs paroi - air intérieur, Paroi - air extérieur
h_{ri} . h_{re}	$W/(m^2.K)$	Coefficient d'échanges radiatifs au niveau de la paroi interne, de la paroi externe.
f	_	Fraction d'insolation (= nombre d'heure d'insolation / durée du jour)
K	$W/(m^2.K)$	Coefficient global de transmission de chaleur à travers la paroi de serre.
K_c	$W/(m^2.K)$	Coefficient global de pertes convectives de la serre.
K_f	$W/(m^2.K)$	Coefficient des pertes de chaleur par fuites
n	_	Taux horaire de renouvellement de l'air de la serre.
Q_p	W/m^2	Flux de chaleur à travers la paroi de serre.
Q_r . Q_c	W/m^2	Déperditions radiatives, convectives de la serre.
Q_G	W/m^2	Déperditions globales de la serre
R_A	W/m^2	Rayonnement du ciel (= $\sigma . T_A^4$)
S_p . S_s	m^2	Surface de la paroi de serre, du sol de serre.
T_A	k	Température radiative du ciel.
T_i . T_e	k	Température sèche de l'air intérieur de la serre, de l'air extérieur.
T_{hi} . T_{he}	k	Température humide de l'air intérieur, de l'air extérieur.
T_p	k	Température moyenne de paroi.
T_{pi} . T_{pe}	k	Température de la face interne de la paroi. de la face externe de la paroi.
T_{si} . T_{se}	k	Température de la surface du sol intérieur, du sol extérieur.
U	$W/(m^2.K)$	Coefficient global de déperditions thermiques de la serre.
v	m/s	v : Vitesse du vent
V	m^3	V : Volume: de la serre.
ϵ	_	Facteur d'émission du matériau de couverture.
λ	$W/(m.K)$	Conductivité thermique du matériau de couverture.
σ	$W/(m^2.K^4)$	Constante de Stefan Boltzmann
τ_{IR}	_	Facteur de transmission du matériau de couverture pour les radiations thermiques.

Les Indices

i : intérieure
e : extérieur
p : paroi
s : sol
r: radiative
c : convective