

Serres

par **Pierre BORDES**

Ingénieur agronome (Grignon)

Professeur à l'École Nationale Supérieure d'Horticulture de Versailles

1. Fonctions	C 4 145 - 2
1.1 Définition	— 2
1.2 Historique	— 2
1.3 Données économiques	— 2
1.4 Données techniques	— 2
1.4.1 Constitution	— 2
1.4.2 Calcul des serres	— 4
1.4.3 Normalisation des serres	— 7
2. Schéma et caractéristiques volumétriques	— 7
2.1 Articulations internes	— 7
2.2 Articulations externes	— 7
2.3 Caractéristiques géométriques	— 7
2.3.1 Dimensions globales	— 7
2.3.2 Dimensions modulaires	— 7
3. Caractéristiques climatiques	— 8
3.1 Température	— 8
3.1.1 Rôle	— 8
3.1.2 Effet de serre	— 8
3.1.3 Lutte contre les températures trop basses	— 9
3.1.4 Lutte contre les températures excessives	— 12
3.2 Lumière	— 13
3.2.1 Rôle	— 13
3.2.2 Éclairage naturel	— 13
3.2.3 Éclairage artificiel	— 13
3.2.4 Calcul des installations	— 14
3.3 Eau	— 14
3.3.1 Rôle	— 14
3.3.2 Actions sur l'eau	— 14
3.4 Dioxyde de carbone (CO ₂)	— 15
3.4.1 Rôle	— 15
3.4.2 Concentration	— 15
3.4.3 Enrichissement	— 15
Pour en savoir plus	Doc. C 4 145

La serre doit assurer la protection contre les **accidents mécaniques** et notamment ceux d'origine climatique (vent, neige, grêle) et, à ce titre, doit avoir des caractéristiques de construction lui permettant de résister aux charges susceptibles de lui être appliquées. Mais elle vise essentiellement à **modifier les conditions de milieu** (rayonnement, température, teneur de l'atmosphère en vapeur d'eau, dioxyde de carbone et produits néfastes) pour les rendre plus favorables à la production.

1. Fonctions

1.1 Définition

La norme AFNOR NF U 57-001 (1984) définit la serre comme une « enceinte destinée à la culture ou à la protection des plantes en exploitant le rayonnement solaire. Les dimensions de cette enceinte permettent à l'homme de travailler aisément à l'intérieur ».

Les serres sont à distinguer, d'une part des abris trop bas pour permettre la circulation du personnel (châssis, petits tunnels, etc.), d'autre part des enceintes à climat intégralement artificiel utilisées en recherche, expérimentation, etc.

1.2 Historique

Succédant aux resserres à végétaux du 17^e siècle, à faible surface vitrée, du type « orangerie », les véritables serres, initialement destinées à l'acclimatation des plantes exotiques et aux collections, naissent au début du 19^e siècle grâce aux progrès techniques dans

les domaines du chauffage, de la sidérurgie, de l'industrie du verre. La grande expansion des serres destinées à une production commercialisée commence dans les années 50.

1.3 Données économiques

La surface des serres en France, selon le recensement de 1989, ainsi que la répartition selon le matériau de couverture, le type de culture et le mode de chauffage sont données sur la figure 1.

Un ordre de grandeur des coûts de serres et de leurs équipements est donné en [Doc. C 4 145].

1.4 Données techniques

1.4.1 Constitution

Les serres ont des parois extérieures (et éventuellement des cloisonnements) très perméables au rayonnement visible, avec une ossature opposant le moindre obstacle à la lumière solaire.

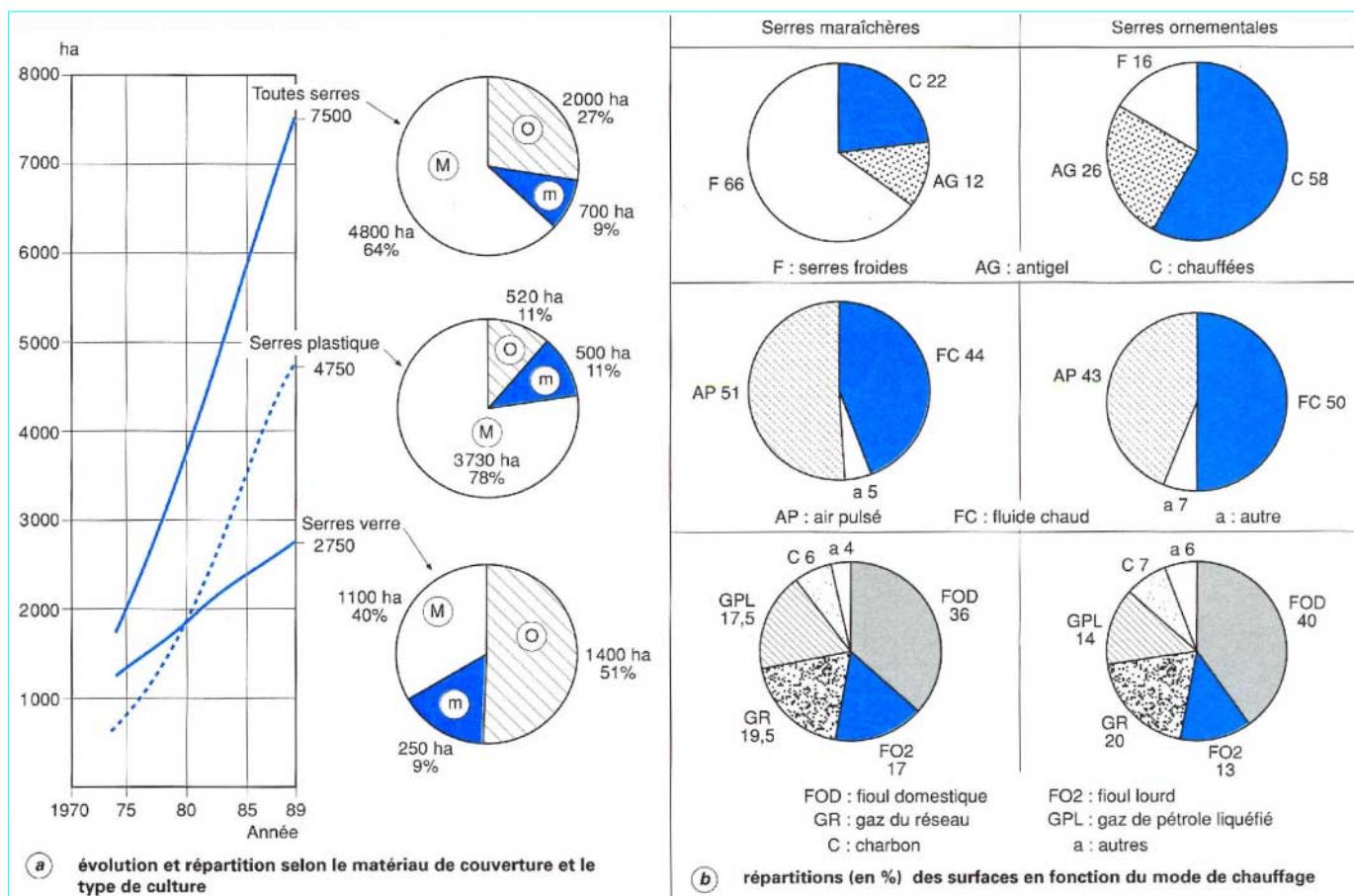


Figure 1 – Surface des serres en France selon le recensement de 1989 (d'après [1])

1.4.1.1 Charpente

C'est un assemblage de cadres porteurs reliés par des pannes et des pièces de triangulation (contreventement).

■ Cadres porteurs

Ils sont de deux types principaux (figure 2a) correspondant aux deux grandes familles de serres :

— les **serres à vitrages plans** (figure 2b), dont les cadres porteurs sont constitués de poteaux surmontés d'une ferme (ou pseudo) à arbalétriers droits ;

— les **serres recouvertes de matériau souple** (film) ou cintrable à froid, dont les cadres porteurs sont généralement des arceaux reposant soit sur des poteaux verticaux comme précédemment, soit directement sur le sol (serres tunnels, figure 2b).

L'espace compris entre les quatre appuis au sol de deux cadres successifs constitue l'élément **technologique** de base, appelé **module**. L'ensemble des cadres porteurs admettant une même ligne de faîteage définit l'unité **fonctionnelle**, appelée **chapelle** (figure 2c). Une serre peut comporter une seule chapelle (serre **unichapelle**), ou plusieurs accolées parallèlement aux lignes de faîteage (serre **multichapelle**). L'association des tunnels se limite généralement à deux (**bitunnel**, figure 2d). L'espace compris entre deux alignements successifs de cadres porteurs est appelé **travée**. Le module est donc l'intersection d'une chapelle et d'une travée.

On désigne par **chapelle double** l'ensemble de deux chapelles accolées, avec suppression du poteau intermédiaire et renforcement corrélatif de la poutre jouant le rôle d'entrait. Ce type d'association va jusqu'à quatre.

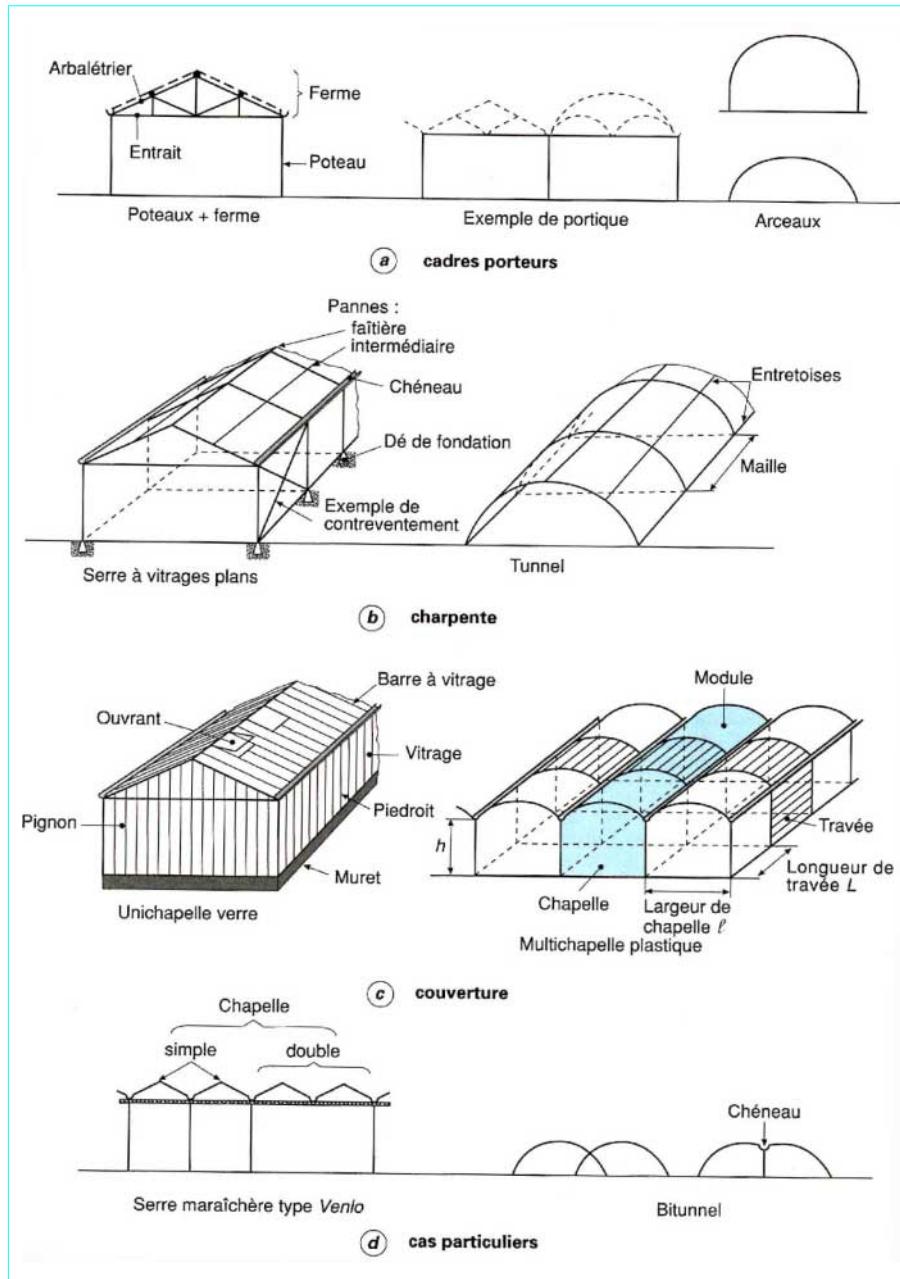


Figure 2 – Technologie des serres

■ Pannes

Lorsque les serres sont munies de chéneaux, ce qui est obligatoire dans le cas des multichapelles et fréquent pour les unichapelles à vitrages plans, ils tiennent lieu de pannes.

Les pannes faîtières, qui supportent directement le vitrage et servent souvent d'articulation à des châssis ouvrants, ont un profil spécialement conçu à cet effet et variable selon les modèles. Les chapelles des serres type **Venlo** (figure 2d) sont étroites (3,20 ou 4 m) et ne comportent pas de fermes : les barres à vitrage s'appuient directement sur le chéneau et la panne faîtière.

Les chapelles de grande largeur (celles-ci pouvant dépasser 20 m) ont des pannes intermédiaires.

■ Matériaux utilisés pour l'ossature

Le bois ne sert plus que pour quelques constructions artisanales. L'**acier galvanisé** domine de très loin. Les produits sidérurgiques sont utilisés soit tels (profilés, tubes, etc.), soit après formage (chéneaux), soit pour constituer des poutres treillis de plus en plus employées, car diminuant les ombres portées.

Afin de réduire l'entretien, la galvanisation est généralisée et réalisée à chaud (article *Galvanisation à chaud* [M 1 534] dans le traité Matériaux métalliques), soit, selon les constructeurs, par le procédé Sendzimir (article *Galvanisation et aluminage en continu* [M 1 536] dans le traité Matériaux métalliques), ou après usinage. Les alliages à base d'aluminium sont très employés pour obtenir, par étirage, les profils compliqués des pannes faîtières.

1.4.1.2 Couverture

■ Serres à couverture rigide

Le **verre** reste, de très loin, le matériau le plus utilisé, et pratiquement toujours en simple paroi ; il est le plus souvent clair, parfois martelé ou trempé, quelquefois traité en surface pour réduire l'émissivité. Les plaques sont soutenues par des barres à vitrage fixées aux pannes et constituées, le plus souvent, par des profilés en alliage d'aluminium assurant résistance mécanique et isolation thermique (un joint en matière plastique, amovible, est souvent fixé sur la face extérieure).

Leur épaisseur nominale standard est de 4 mm (les verrières ne normalisant plus les autres dimensions) et elles ont le plus fréquemment 0,60 ou 0,75 m de large sur 1,65 m de long en toiture, mais la largeur peut dépasser le mètre sous réserve d'une conception spéciale des appuis.

Les **verres organiques** ne couvrent que de très faibles surfaces. Le polychlorure de vinyle (PVC) et le polyester armé de fibres de verre sont utilisés en simple paroi alors que le polycarbonate (PC) et le polyméthacrylate de méthyle (PMMA) le sont souvent en double paroi (plaques alvéolées ayant des résistances thermique et mécanique bien supérieures : intérêt en cas de grêle). Toutes ces plaques sont directement fixées aux pannes ou entretoises grâce à des dispositifs permettant la dilatation, notamment dans le cas du PMMA ; des joints spécifiques assurent l'étanchéité entre plaques et entre celles-ci et l'ossature.

■ Serres à couverture souple

Les matériaux sont des films en matière plastique de caractéristiques particulières pour l'emploi agricole et tenant compte des cultures envisagées et du climat : longévité, transmission lumineuse et thermique, modalité de condensation de l'eau, etc.

Les produits à base de polyéthylène basse densité (PE bd) dominent de très loin, dans des qualités et avec des additifs spécifiques. En France, la norme NF T 54-190 remplace la marque de qualité PF qui donne lieu à un marquage obligatoire des films « certifiés ». L'épaisseur est très généralement de l'ordre de 180 µm sauf pour les tunnels étroits (< 3 m) où elle est réduite à 80 µm et pour le film intérieur des doubles parois gonflables : 150 à 160 µm. Les films « longue durée » sont conçus pour résister trois ou quatre saisons.

Les films doivent rester fortement tendus et pouvoir être remplacés facilement ; selon les cas, ils sont enfouis latéralement dans le sol (tunnels) ou fixés sur les armatures grâce à des dispositifs de fixation rapide et facile (clipsage).

1.4.1.3 Fondations

Les poteaux des serres reposent sur des dés en béton répartissant la charge ; les dés périphériques sont souvent incorporés à un muret. En revanche, les arceaux des tunnels reposent directement sur le sol auquel ils sont ancrés par des dispositifs de type tire-bouchon qui, s'ajoutant à l'enfoncement du film, empêchent le soulèvement ou le renversement par le vent.

1.4.2 Calcul des serres

1.4.2.1 Généralités

Si les méthodes ne sont pas spécifiques des serres, certaines prescriptions et valeurs numériques le sont, et en particulier les charges climatiques.

Ces données de construction sont rassemblées dans des normes dont la dernière révision date de 1991. Ces règles de stabilité concernent la construction :

- des serres à vitrages plans : NF U 57-060 ;
- des serres couvertes de matériaux plastiques souples ou cintables à froid :
 - serres tunnels : NF U 57-063,
 - autres serres : NF U 57-064.

Chacune de ces normes définit :

- les charges à prendre en compte dans le calcul de l'ossature et de la couverture ;
- les matériaux utilisables avec leurs prescriptions d'emploi (dispositions constructives, mode de protection, etc., en précisant éventuellement les normes ou DTU correspondants) ;
- des spécifications particulières aux serres concernées (fondations, etc.).

1.4.2.2 Charges à prendre en compte

■ Charges permanentes

À noter l'importance relativement élevée de la masse des équipements de climatisation.

■ Charges d'exploitation

- 1) Cultures supportées par la charpente ; on distingue :
 - a) les cultures sur tablettes suspendues (« tablards ») ;
 - b) les cultures palissées.

Sauf cahier des charges spécifique, prendre :

- pour a : 1 000 Pa à appliquer à la surface des tablards ;
- pour b : 150 Pa pour cultures suspendues (tomate, concombre) ;
- tenir compte des charges horizontales et verticales supplémentaires dues au palissage.

2) Personnel se déplaçant sur la toiture : calculer les chéneaux en tenant compte d'une masse de 100 kg appliquée à mi-distance de deux appuis.

■ Charges climatiques

Neige et vent (la grêle n'est pas prise en compte)

● Neige

Les régions sont indiquées sur la figure 3a. Le document initial est la carte « Neige » 1984 des Règles Neige et Vent NV 65 ; des modifications spécifiques aux serres y ont été apportées, affectant certains départements signalés par un point noir •.

Les charges sont données figure 3b.

● Vent

Les régions sont celles que définissent les Règles NV 65 (figure 4a).

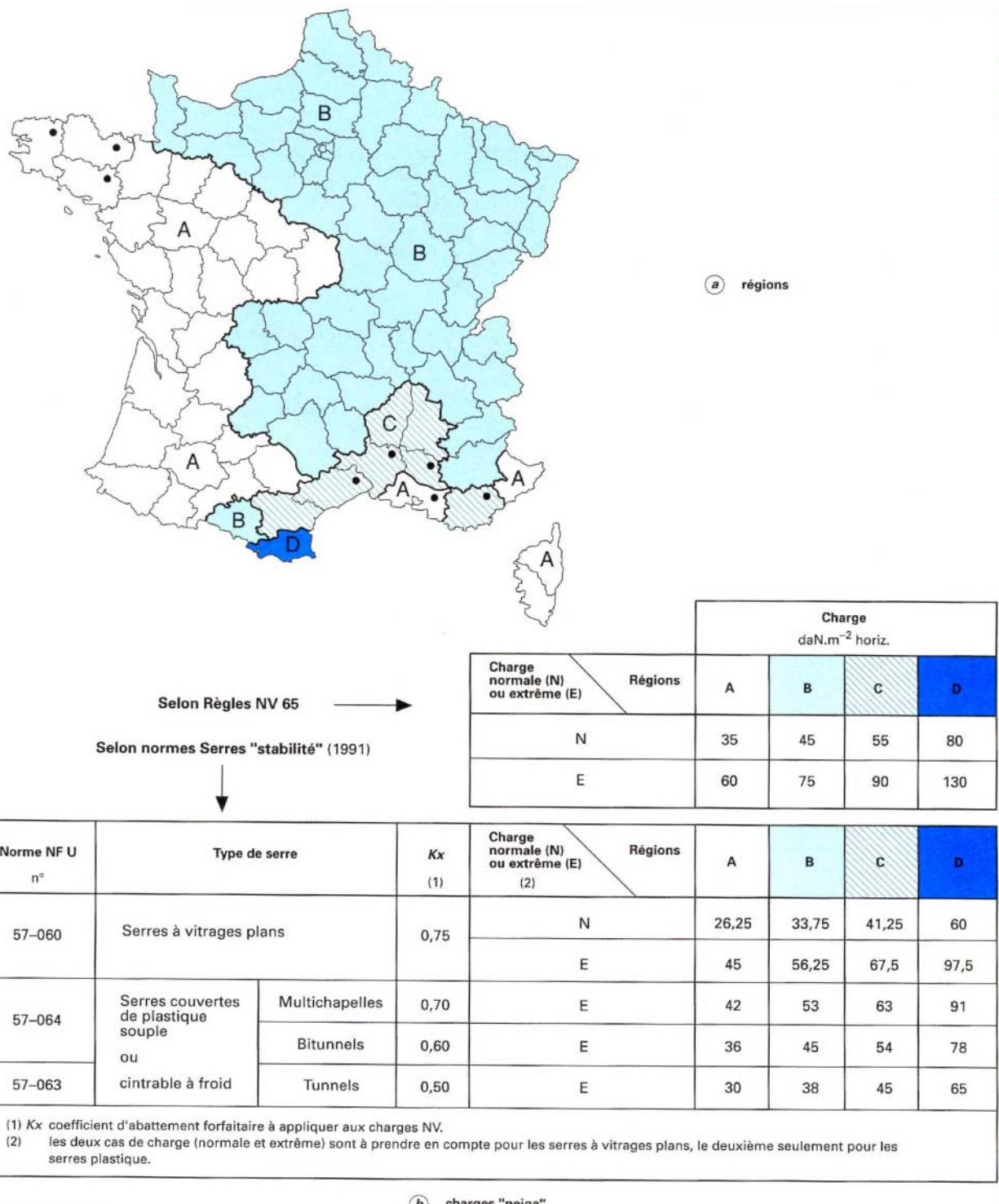


Figure 3 – Charges climatiques « neige »

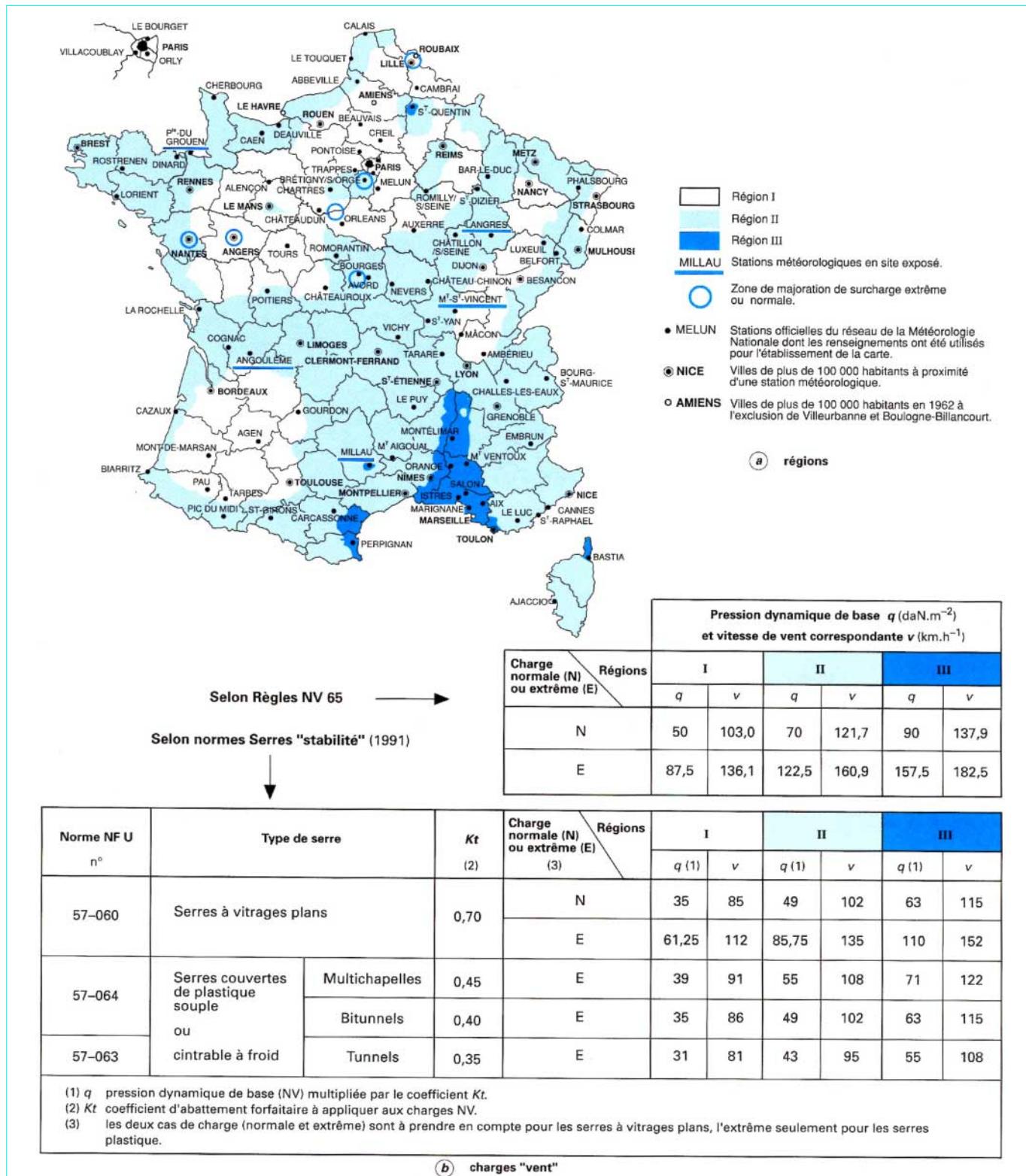


Figure 4 – Charges climatiques « vent »

Concernant les charges, les différences aux Règles NV concernent :

- les charges elles-mêmes (figure 4b) ;
- la hauteur d'application de la pression dynamique : prendre la hauteur du milieu du rempart pour les serres à vitrages plans et celle du faîte pour les autres ;
- les coefficients de pression.

1.4.3 Normalisation des serres

Outre celles de stabilité mentionnées ci-dessus, d'autres normes ont été établies. Une liste est donnée en [Doc. C 4 145].

À noter qu'une normalisation européenne est en cours.

2. Schéma et caractéristiques volumétriques

La diversité des exploitations ne permet pas de définir un schéma type ; la spécificité découle des caractéristiques des différentes activités :

- préparation de la culture (semis, repiquage, etc.) ;
- culture proprement dite ;
- récolte et conditionnement en vue de la commercialisation ;
- approvisionnement, parfois avec stockage, de produits divers ;
- gestion des différents facteurs de production.

Ces opérations sont effectuées totalement ou partiellement sous serre. Leur bon déroulement implique, outre des contraintes géométriques ou climatiques (§ 2.3 et 3), une organisation rationnelle des différentes unités fonctionnelles et de leurs interrelations.

2.1 Articulations internes

Les **productions maraîchères** ne demandent pas une organisation interne poussée. Les chapelles, groupées par vastes unités climatiques, sont cultivées uniformément et il est seulement nécessaire d'accéder indépendamment et facilement à chacune d'entre elles. Dans les multichapelles, très souvent la travée centrale et les travées extrêmes sont affectées aux circulations et bétonnées. Quelques modules d'une chapelle latérale sont utilisés pour les services techniques généraux (chaufferie, préparation des solutions nutritives, pilotage, etc.). Le cas des tunnels n'en diffère pas fondamentalement ; disposés en batterie, ils s'ouvrent aux deux extrémités sur de larges allées extérieures.

Les **productions ornementales** sont beaucoup plus diversifiées et, si certaines cultures peuvent être conduites comme les précédentes (fleurs coupées, par exemple), les plantes en pot demandent de nombreuses manipulations nécessitant des équipements spécifiques : les **tablettes** facilitent les soins ; elles sont surélevées de 0,80 m, larges de l'ordre de 1 ou 2 m selon qu'elles sont accessibles par un ou deux côtés.

Les tablettes traditionnelles sont fixes, largement écartées (0,80 m), d'où une surface utilisable pour la culture faible par rapport à la surface couverte ($\approx 2/3$).

Elles sont peu à peu remplacées par des tablettes « mobiles » pouvant, soit être accolées lorsqu'un accès n'est pas nécessaire, soit circuler entre différents espaces spécialisés selon les opérations à effectuer ou les conditions climatiques à respecter. L'idéal consisterait à pouvoir déplacer une tablette quelconque de n'importe quel emplacement vers n'importe quel autre. Cette dernière formule a commencé à donner lieu à quelques réalisations dont l'organisation interne a été étudiée spécifiquement.

2.2 Articulations externes

Elles varient avec le type de culture, l'importance de l'exploitation et son niveau de perfectionnement.

L'approvisionnement, les expéditions, la mise en œuvre des matériels nécessitent que la serre dispose de portes de grandes dimensions donnant sur des aires extérieures permettant l'évolution de camions de gros tonnage ou de grand volume, ainsi que de stockages souvent volumineux.

La circulation des personnes demande une surveillance visuelle depuis le bureau du responsable.

La surveillance à distance (surtout la nuit) des paramètres climatiques extérieurs et intérieurs et du fonctionnement des équipements utilise de plus en plus téléphone, minitel, radio.

2.3 Caractéristiques géométriques

2.3.1 Dimensions globales

Elles varient considérablement, selon les exploitations, de moins de 100 m² à plusieurs hectares d'un seul tenant.

En général, les très grandes unités sont du type *Venlo*, compactes (homogénéité du climat, réduction des déperditions thermiques).

La longueur des chapelles (des multichapelles comme des tunnels) dépasse rarement 100 m (pour différentes raisons : organisation du travail, évacuation des eaux pluviales, climatisation).

Les dimensions caractéristiques sont donc celles du module.

2.3.2 Dimensions modulaires

Elles ne sont pas fixées et tendent nettement à être augmentées pour faciliter la maîtrise du climat (lumière, température : aération, écrans), accroître la polyvalence et parfois même réduire le coût de construction.

2.3.2.1 Serres à vitrages plans

Une largeur de chapelle de 3,20 m (ou multiple) est courante : elle résulte de l'utilisation des anciennes plaques de verre industrielles de longueur normalisée ; à la base de la conception des serres *Venlo*, elle s'est perpétuée jusqu'à aujourd'hui. La norme dimensionnelle française NF U 57-020 de 1982 tenait compte de cette habitude et l'avait associée à l'organisation interne des serres pour fixer la largeur des chapelles à :

$$\ell(\text{m}) = 6,40 + 3n \quad (n = \text{nombre entier})$$

mais cette règle n'a pas été vraiment appliquée.

Les serres **maraîchères** (type *Venlo*) sont le plus souvent à chapelle double, avec pour dimensions :

- largeur de chapelle : $\ell = 3,20 \text{ m} \times 2 = 6,40 \text{ m}$
- longueur de travée : $L = 3 \text{ m}$
- hauteur des poteaux : $h = 3 \text{ ou } 3,50 \text{ m}$

De nouveaux modèles apparaissent avec :

$$\ell = 3,20 \text{ m} \times (3 \text{ ou } 4) \text{ ou } \ell = 4 \times 2 = 8 \text{ m}$$

$$L = 4 ; 4,5 ; 5 \text{ m}$$

$$h = 3,5 ; 4 \text{ m}$$

Les serres **horticoles**, utilisées pour beaucoup de cultures ornementales, sont généralement à chapelles simples de largeur de l'ordre de 6,40 m ou 9,60 m, bien que certaines dépassent 20 m :

$$6,40 \text{ m} \leq \ell \leq 25 \text{ m}$$

$$3 \text{ m} \leq L \leq 5 \text{ m}$$

■ **En définitive** l'effet de serre est parfois favorable (en saison froide, de nuit), parfois néfaste (par fort ensoleillement), et des interventions sont nécessaires pour contrôler la température en jouant sur les apports et les déperditions.

3.1.3 Lutte contre les températures trop basses

3.1.3.1 Réduction des déperditions

Elle est toujours essentielle : pour les serres « froides », elle est le seul moyen d'intervention et, pour celles chauffées, elle permet de substantielles économies (pouvant dépasser 50 %).

On distingue les déperditions par rayonnement et les déperditions à travers les matériaux des parois.

■ **Déperditions par rayonnement** : elles sont diminuées par des matériaux de paroi absorbant ou réfléchissant le rayonnement IR long (verres, films « thermiques » à base de PE, PVC), ou par des matériaux à émission différentielle (verre à faible émissivité) ou encore double paroi.

■ **Déperditions à travers les matériaux des parois** : vu la très faible épaisseur de ces dernières, les échanges superficiels (convection) jouent un rôle prépondérant par rapport aux échanges à travers le matériau lui-même (conduction).

Le coefficient de transmission thermique globale est :

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

avec h_i , h_e coefficients de convection aux faces interne et externe.

Elles sont amoindries par diminution des ponts thermiques (barres à vitrage, ossature...), par abaissement de l'agitation de l'air au contact de la paroi (brise-vent), mais surtout par accroissement de la résistance thermique de la paroi obtenu principalement par doublage de celle-ci ; cela est réalisé de multiples façons, parfois en permanence (films plastiques constituant une « double paroi gonflable », matériaux alvéolés, double paroi en verre...), parfois temporairement (doublage par films, écrans thermiques, association d'abris...).

■ **Déperditions par « fuites »** : le taux de renouvellement de l'air diminue lorsque l'étanchéité de la serre augmente.

3.1.3.2 Accroissement des apports : le chauffage

3.1.3.2.1 Modes de chauffage des serres

Les serres ne sont, en pratique, chauffées que de deux façons : par eau chaude (ou tiède) circulant dans des canalisations aériennes ou enterrées, ou par air chaud pulsé.

■ **Le chauffage par air chaud** utilise deux procédés :

— soit des **générateurs d'air chaud**, appareils à combustion comportant un échangeur lorsque la teneur en soufre du combustible (fioul) nécessite de rejeter les fumées à l'extérieur, ou bien sans échangeur (injection directe) dans le cas contraire (gaz du réseau GDF ou gaz de pétrole liquéfié : propane) ;

— soit des **aérothermes**, alimentés en eau chaude.

Quel que soit le procédé, le flux d'air ne doit être ni trop rapide (de l'ordre de $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), ni trop chaud (de l'ordre de 30 à 40 °C) pour éviter un stress ou une hétérogénéité climatique préjudiciable à la culture. Or la puissance d'un appareil est proportionnelle au produit de la vitesse de l'air sortant par sa température ; par ailleurs, la portée du flux croît avec le débit.

Enfin, comme la commande de ces appareils (ventilateurs, brûleurs...) est du type **tout ou rien**, la régulation de la température dans la serre, spatiale comme temporelle, n'est satisfaisante que si les émetteurs sont nombreux et de puissance modérée, par exemple un appareil de 50 kW par 200 m^2 .

Le coût des installations est abaissé par la réduction du nombre d'émetteurs, par exemple un seul par tunnel. Afin de mieux répartir l'énergie de ces émetteurs de forte puissance, on utilise

des gaines de répartition d'air chaud réalisées en film plastique transparent et disposées parallèlement aux rangs de culture (souvent en leur sein). L'expérience a montré que la **longueur** ainsi chauffée devrait rester **inférieure à 100 m**.

Notons enfin que les systèmes à air chaud :

— étant purement convectifs, favorisent les déperditions par les parois et réchauffent très mal le sol ;

— étant à faible inertie, sont bien adaptés aux climats variables.

Par ces deux caractères, ils conviennent bien aux climats méditerranéens.

■ **Les chauffages à eau chaude** se différencient par la température de l'eau.

— Dans les installations traditionnelles (dites à thermosiphon), cette dernière approche 100 °C (en période de besoins maximaux) et circule dans des tuyaux métalliques (acier surtout) disposés souvent au-dessus des cultures ; les déperditions élevées qui en résultent ont conduit à leur régression au profit des suivantes.

— Dans les systèmes à eau tiède, de l'ordre de 30 à 50 °C, celle-ci circule dans des canalisations offrant une surface (par m^2 de serre) très supérieure aux tuyaux précédents et disposées le long des planches de culture ou des tablettes, au voisinage immédiat des plantes, éventuellement sur toute la hauteur de celles-ci, y compris les racines (substrat).

La chaleur est émise, par ces canalisations aériennes, sensiblement à égalité par rayonnement et par convection.

La grande homogénéité spatiale obtenue, surtout avec les eaux tièdes, résulte de la bonne répartition et plus encore de la grande densité des canalisations dans toute la serre, ce que les matières plastiques ont permis de réaliser à un coût acceptable. L'eau tiède est produite sur l'exploitation :

— soit par mélange d'eau chaude de chaudière classique et d'eau de retour (vannes 3 ou 4 voies) ;

— soit directement par des chaudières spéciales, à condensation, utilisant des combustibles exempts de soufre (gaz) et acceptant ainsi des eaux de retour à basse température.

Quelques exploitations utilisent des rejets industriels (centrales EDF notamment) fournissant, selon les cas, eau tiède (surtout) ou eau chaude.

■ Eau chaude et air chaud sont souvent associés pour une adaptation fine au climat et à la culture.

3.1.3.2.2 Calcul des installations de chauffage

■ Généralités

Ce calcul repose, classiquement, sur celui des déperditions en période de pointe, en adoptant :

— comme **température intérieure** θ_i , la température de consigne à respecter lorsque la température extérieure est bien celle définie ci-dessous. Elle dépend de la culture et de son programme et se situe généralement entre + 10 et + 20 °C ;

— comme **température extérieure de base** du DTU, bien qu'il paraisse plus judicieux d'adopter la **température de base de sécurité** (fréquence de 1 jour/an au lieu de 5 pour la première), à cause de la grande sensibilité de la serre aux facteurs climatiques externes (vent, pluie...).

Des modèles mathématiques de serre ont été élaborés depuis 20 ans et leur calage a permis de préciser paramètres et coefficients. Des logiciels en ont été dérivés, d'une part pour le dimensionnement des éléments et en particulier des équipements de climatisation, d'autre part pour les prévisions de consommation énergétique par utilisation de fichiers météorologiques. Ils sont couramment utilisés par les bureaux d'études. Citons Deperserre (ENITHP Angers), Thermiserre (AFME/CEMAGREF).

À défaut, la méthode « manuelle » présentée ci-après est toujours utilisée.

■ Calcul des déperditions

● Déperditions à travers les parois extérieures

— Toiture et faces latérales :

$$D_p = \sum S_i K_i (\theta_{ai} - \theta_{ae}) \quad (1)$$

avec D_p (W)	déperditions pour l'ensemble de la serre,
S_i (m^2)	aire d'un élément homogène i de paroi,
K_i ($W \cdot m^{-2} \cdot {}^\circ C^{-1}$)	coefficient de transmission thermique globale pour l'élément i . Ce coefficient a été déterminé expérimentalement et tient compte des différents modes de transferts y compris le rayonnement (tableau 1),
θ_{ai}, θ_{ae} (${}^\circ C$)	température des airs respectivement intérieur et extérieur.

Tableau 1 – Coefficient de transmission thermique globale K pour quelques matériaux (d'après [10])

Paroi	K ($W \cdot m^{-2} \cdot {}^\circ C^{-1}$)	
	Ciel clair	Ciel couvert
Simple paroi		
PE bd	8,8 à 9	7,1 à 7,2
EVA	7,8	6,6
PVC	7,6	6,4
PE + VA + IR	7,1 à 7,3	6,2 à 6,3
Polyester	7,2	6,2
Verre horticole (4 mm)	6,1	5,5
Double paroi		
PE + PE	6,4	4,2
Verre + PE	4,3	3,9
PC 6 mm	3,5	3,2
PC 10 mm	3,2	
PMMA 8 mm	3,4	3,0
PMMA 16 mm	3,0	
Verre + verre	3,1	2,8

Conditions standard : $\theta_e = -10 {}^\circ C$; $\theta_i = +20 {}^\circ C$; vent $4 m \cdot s^{-1}$; ciel clair ou ciel couvert.

Les déperditions sont souvent rapportées au mètre carré couvert :

$$d_p (W \cdot m^{-2}) = \frac{\sum S_i K_i (\theta_{ai} - \theta_{ae})}{S_s} \quad (2)$$

— Sol :

$$D_s = S_s \lambda_s (\theta_{ai} - \theta_{sp}) \quad (3)$$

avec D_s (W)	déperditions totales par le sol,
S_s (m^2)	surface couverte par la serre,
λ_s ($W \cdot m^{-2} \cdot {}^\circ C^{-1}$)	conductivité du sol,
θ_{sp} (${}^\circ C$)	température du sol en profondeur.

Les déperditions du sol sont faibles relativement aux autres, ce qui justifie l'adoption, pour λ_s et θ_{sp} , de valeurs très approximatives, fixées généralement à 1,5 pour λ_s et $10 {}^\circ C$ pour θ_{sp} (ou $\Delta\theta = 10 {}^\circ C$).

On définit aussi les déperditions au mètre carré :

$$d_s (W \cdot m^{-2}) = \lambda_s (\theta_{ai} - \theta_{sp}) \quad (4)$$

● Déperditions par fuites (renouvellement d'air)

Elles sont calculées pour la serre entière :

$$D_f = \frac{n}{3600} V \rho_i (H_i - H_e) \quad (5)$$

mais sont aussi, souvent, directement rapportées au mètre carré couvert :

$$d_f = \frac{n}{3600} h_m \rho_i (H_i - H_e) \quad (6)$$

avec D_f (W)	déperditions totales,
d_f ($W \cdot m^{-2}$)	déperditions par mètre carré couvert,
n (h^{-1})	taux horaire de renouvellement de l'air ; on peut adopter :
— bonnes serres verre récentes : $n = 1$,	— serres verre anciennes : $n = 2$ à 3,
— serres plastiques : $n = 0,3$ à 0,5,	volume de la serre,
	hauteur moyenne = volume par m^2 ,
	masse volumique de l'air de la serre (conservation de masse des airs échangés),
V (m^3)	H_i, H_e ($kJ \cdot kg^{-1}$ air sec) enthalpie des airs intérieur (sortant) et extérieur (entrant) ;
h_m (m)	(ρ_i, H_i, H_e sont donnés par le diagramme de l'air humide ; article <i>Air humide</i> [B 2 230] du traité Génie énergétique).
ρ_i ($kg \cdot m^{-3}$)	

La relation suivante, approchée, est souvent utilisée :

$$D_f (\text{ou } d_f) = \frac{n}{3600} CV (\text{ou } h_m) (\theta_{ai} - \theta_{ae}) \quad (7)$$

avec C chaleur volumique moyenne de l'air ($0,293 \text{ kcal} \cdot m^{-3}$ soit $1225 \text{ J} \cdot m^{-3} \cdot {}^\circ C^{-1}$), mêmes unités pour les autres grandeurs ; d'où :

$$D_f (\text{ou } d_f) = 0,34 n V (\text{ou } h_m) (\theta_{ai} - \theta_{ae})$$

Remarques

1. Il est habituel de faire apparaître les déperditions par unité de surface couverte et par unité d'écart des températures interne et externe : elles sont, pour les serres de grande surface, de l'ordre de $10 W \cdot m^{-2} \cdot {}^\circ C^{-1}$.

2. En thermique de serre, l'importance primordiale des échanges surfaciques a conduit à ne pas considérer les déperditions par unité de volume (terme G des Règles Th - G).

■ Calcul des émetteurs (puissance installée dans la serre)

Ces corps de chauffe sont déterminés, classiquement, à partir des déperditions totales précédentes et de l'émission unitaire réelle de chacun d'eux en tenant compte des contraintes imposées par la géométrie de la serre, la culture et le procédé de chauffage lui-même (par exemple vitesse maximale de l'eau dans les canalisations, $\Delta\theta$ admissible).

Pour l'**émission unitaire des tubes et assimilés** (bandes émettrices), on peut adopter les valeurs de la figure 5 et du tableau 2.

Pour les **générateurs d'air chaud avec échangeur**, la puissance réelle disponible est de l'ordre de 85 % de la puissance nominale.

■ Calcul de la chaufferie (fourniture d'eau chaude ou tiède)

— Dans la relation générale :

$$\text{Puissance générateurs} = P = \frac{\text{Puissance serre} (P_s)}{\eta_{\text{transport}} \eta_{\text{réglage}} \eta_{\text{générateur}}}$$

les valeurs à adopter pour les rendements η sont de l'ordre de [8] :

$\eta_{\text{transport}}$ (ou distribution) d'un réseau isolé	: 0,98
$\eta_{\text{réglage}}$ (automatique)	: 0,98
$\eta_{\text{générateur}}$ (par rapport au PCI)	: 0,75

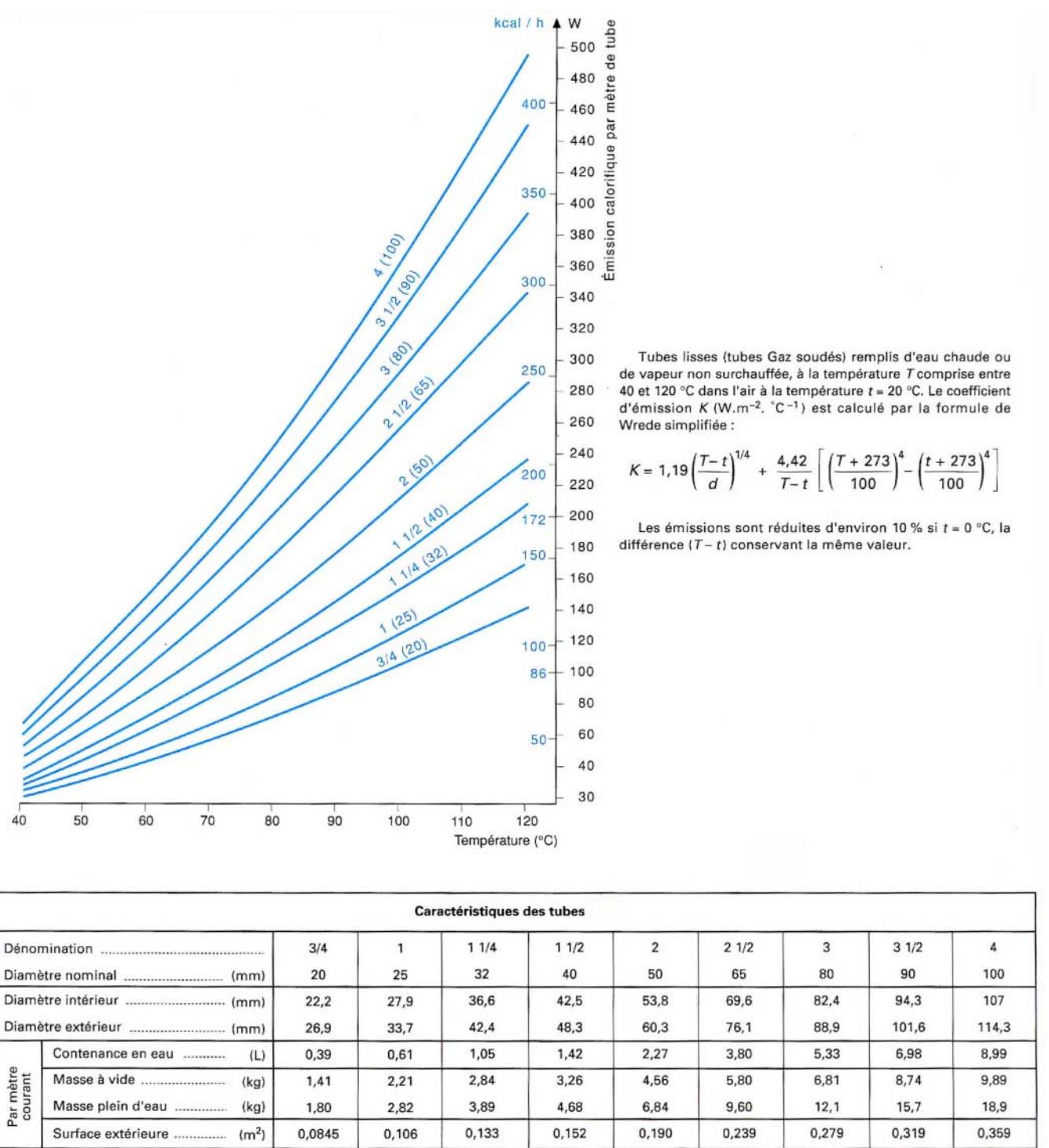


Figure 5 – Émission calorifique des tubes lisses dans l'air [12] pour les caractéristiques des tubes)

Tableau 2 – Émission calorifique de différents échangeurs selon leur nature et leur position dans la serre [8]

Position	Tubes		Bandes émettrices (moquette, plaque alvéolée)
	en plastique (W · m ⁻¹ · °C ⁻¹)	en métal (W · m ⁻¹ · °C ⁻¹)	
Posé sur le sol	1	11 à 13
Enterré.....	20 à 25 (1)	
Suspendu.....	1 à 1,5	1 à 2,5	
Tablette	1 à 1,5	12 à 14

(1) Sol naturel, température des tubes ≈ 35 °C,
profondeur : 20 à 40 cm, écartement : 40 à 60 cm.

En pratique, l'adoption d'une température extérieure de base relativement élevée ainsi que le souci de pouvoir faire face aux variations de régime poussent très généralement les ingénieurs à prévoir une surpuissance, variable selon le climat local. Fréquemment aussi, à la fois pour des raisons de sécurité et pour maintenir tout au long de la saison de chauffe un taux de charge élevé des générateurs, ils proposent de dédoubler ces derniers dans le rapport $P/3$ et $2P/3$, P étant la puissance totale installée en chufferie.

— Calculs annexes.

Il s'agit essentiellement des calculs hydrauliques des installations à circulation d'eau. Ils ne présentent pas d'aspects particuliers.

3.1.4 Lutte contre les températures excessives

Hors même le plein été, où la serre peut recevoir du soleil jusqu'à 1 kW par m² horizontal, dont environ les 2/3 (≈ 600 W) « entrent », l'excès de chaleur est, dès la demi-saison, un souci majeur des producteurs, par ses effets directs (élévation de température des organes végétaux) ou indirects (abaissement de l'humidité relative de l'air).

La lutte consiste à réduire les apports d'énergie et/ou à accroître les déperditions.

3.1.4.1 Réduction des apports d'énergie

Après l'arrêt du chauffage, il ne reste que la réduction des apports solaires ; elle est réalisée :

- soit, pour toute la saison estivale, par badigeonnage de l'enveloppe de la serre au moyen d'enduits à base de chaux ;
- soit « à la demande », c'est-à-dire au moyen d'écrans souples (dits d'ombrage) déployés généralement automatiquement dans la serre au-dessus des cultures et agissant essentiellement par réflexion. Il n'y a pas de véritable calcul mais un choix, en fonction de la culture et du climat, du type d'agrotextile utilisé : nature, pourcentage de vides, taux de réflexion, etc.

3.1.4.2 Accroissement des déperditions

Il s'agit d'augmenter le taux de renouvellement de l'air en l'associant, ou non, à la vaporisation d'eau. Celle-ci est en effet particulièrement efficace étant donné une chaleur latente de vaporisation très élevée : 2 500 kJ · kg⁻¹.

Ainsi, pour absorber 600 W · m⁻², soit 2 160 kJ · h⁻¹ · m⁻², il suffit de faire évaporer 2 160/2 500 = 0,85 L d'eau par m² (soit 0,85 mm).

3.1.4.2.1 Ventilation naturelle

Elle est réalisée au moyen d'ouvertures (ouvrières) disposées en toiture ainsi que sur des faces latérales. Son efficacité dépend, en dehors du vent, de la disposition et de la surface relative des ouvertures, généralement rapportée à la surface au sol de la serre ; ce rapport, empiriquement fixé en fonction du climat et des cultures envisagées, est souvent de l'ordre de 20 %.

3.1.4.2.2 Ventilation forcée

Sur deux faces opposées de la serre sont disposés d'une part des ventilateurs, d'autre part des ouvertures obturables.

Les calculs visent à déterminer successivement :

- le débit d'air ou l'écart de température $\Delta\theta$ (positif ou négatif) entre airs intérieur et extérieur ;
- le taux de renouvellement et la longueur de balayage maximale ;
- la puissance des ventilateurs, le débit d'eau éventuel.

■ Débit d'air et $\Delta\theta$

Ils interviennent dans l'équation des échanges thermiques, en régime d'équilibre, par ensoleillement maximal. L'expression simplifiée, rapportée au mètre carré de serre et à la seconde, est :

$$R_{nc} + q_e H_e = q_i H_i + K (\theta_{ai} - \theta_{ae}) s_c \quad (8)$$

qui se simplifie en :

$$R_{nc} + q (H_e - H_i) - K (\theta_{ai} - \theta_{ae}) s_c = 0 \quad (9)$$

avec R_{nc} (kW · m ⁻²)	rayonnement net capté par la serre,
$q_e = q_i = q$ (kg · m ⁻² · s ⁻¹)	débit pondéral d'air entrant et sortant,
H_e, H_i (kJ · kg ⁻¹ air sec)	enthalpie respective des airs entrant et sortant,
K (kW · m ⁻² · °C ⁻¹)	coefficients de transmission thermique globale à travers le matériau de couverture,
s_c (m ²)	surface de couverture, par mètre carré de serre,
θ_{ai}, θ_{ae} (°C)	température des airs intérieur et extérieur.

Pour une serre et des conditions extérieures données, cette équation peut être résolue en prenant comme inconnue :

- soit q en se fixant $\Delta\theta$ (c'est-à-dire θ_{ai}) ;
- soit $\Delta\theta$ en imposant q .

Deux cas sont à considérer selon qu'un apport d'eau est fait, ou non, en vue de sa vaporisation.

— **Ventilation sans apport d'eau** : c'est le cas le plus simple : il est facilement résolu, par exemple au moyen du diagramme de l'air humide, puisque l'humidité absolue de l'air varie peu au cours de la traversée de la serre. L'augmentation de l'enthalpie de l'air due au rayonnement absorbé se traduit par celle de la température.

— **Ventilation avec apport d'eau** : la situation se complique sensiblement selon les modalités de l'apport car l'enrichissement de l'air n'est jamais total et est mal maîtrisé.

Un cas type est celui du *cooling system* : l'air est humidifié à son admission dans la serre par traversée d'un panneau poreux maintenu fortement humide.

Le calcul est mené par approximations successives à partir d'une valeur donnée de q .

■ Taux de renouvellement n et longueur de balayage L_b : limites

Une vitesse élevée de l'air dans la végétation est préjudiciable à celle-ci : la limite admise expérimentalement est de l'ordre de 1 m · s⁻¹. Il en résulte une limitation de n et/ou de L_b car la vitesse est proportionnelle au produit nL_b .

Supposons en effet le flux d'air balayant longitudinalement les chapelles sur toute leur longueur (cas général), d'où $L_b = L$ longueur de la chapelle.

Le débit horaire par m^2 , q , peut être exprimé :

— en fonction de la vitesse moyenne de l'air dans la serre :

$$q = \frac{Q}{S} = \frac{AU \times 3600}{\ell L} = \frac{\ell h_b U \times 3600}{\ell L} = \frac{h_b U \times 3600}{L} \quad (10)$$

— en fonction du taux de renouvellement :

$$q = n h_b \quad (11)$$

avec $Q (m^3 \cdot h^{-1})$ débit total à travers la serre,

$S (m^2)$ surface totale de la serre,

$A (m^2)$ section de passage moyenne de la veine d'air,

$h_b (m)$ hauteur moyenne de la veine d'air,

$U (m \cdot s^{-1})$ vitesse moyenne de l'air dans la serre,

$L, \ell (m)$ longueur, largeur de la serre,

$n (h^{-1})$ taux de renouvellement horaire de l'air.

L'association des deux expressions donne :

$$\begin{aligned} nL &= nL_b = 3600 U \\ U &= \frac{n}{3600} L_b \end{aligned} \quad (12)$$

En pratique, on adopte souvent $n = 60$ d'où une longueur maximale de balayage de l'ordre de 60 à 70 m.

À noter qu'en cas de balayage transversal (perpendiculaire aux chapelles) la hauteur moyenne de balayage est réduite à la hauteur des chêneaux : pour un même taux de renouvellement, la longueur de balayage doit être plus faible.

■ Puissance des ventilateurs - Débits d'eau

— **Puissance** : la relation de base :

$$P = \frac{\Omega g H}{\eta} \quad (13)$$

est adaptée au cas de la serre.

Rapportée au mètre carré de celle-ci, cette puissance est :

$$p = \frac{nh_b H' g}{3600 \eta} \approx \frac{nh_b H'}{360 \eta} \quad (14)$$

avec, outre les symboles précédents :

$p (W \cdot m^{-2})$ puissance, par m^2 , absorbée par le groupe de ventilation ;

$H' (\text{mm CE})$ hauteur de colonne d'eau ($H = H' \cdot \rho^{-1}$) ;

$\rho (kg \cdot m^{-3})$ masse volumique de l'air ;

η rendement du groupe.

L'ordre de grandeur est $p = 5 W \cdot m^{-2}$.

— **Débit d'eau** : il est le produit de l'accroissement de la teneur en vapeur d'eau dans la serre par le débit pondéral d'air.

L'ordre de grandeur est, en plein été, de $1 L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$, soit proche de la consommation des plantes.

3.2 Lumière

3.2.1 Rôle

La lumière est indispensable aux plantes vertes : elle en conditionne l'assimilation chlorophyllienne (photosynthèse) ainsi que la plupart des phénomènes de différenciation des organes (morphogénèse).

La **photosynthèse** n'est activée que par des radiations comprises entre 400 et 700 nm [plage PAR (*photosynthetically active radiations*), proche du visible] et exige un éclairement élevé : 5 à 20 $W_{PAR} \cdot m^{-2}$.

Nota : W_{PAR} = watts dans la plage PAR.

La **morphogénèse** demande :

- des éclairages très faibles (0,15 à 0,4 $W \cdot m^{-2}$) ;
- des radiations spécifiques souvent propres à l'espèce et au stade végétatif, et situées dans la plage précédente élargie ;
- parfois la modification des rythmes naturels jour-nuit (photopériodisme).

3.2.2 Éclairement 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.

■ Les dispositions favorisant l'éclairement naturel hivernal concernent :

- a) la forme et l'orientation des serres :
 - serres unichapelles :
 - orientation est/ouest et large écartement,
 - toit courbe ou à versants plans à forte pente ;
 - serres multichapelles :
 - 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,
 - propriété ;
 - les éléments opaques :
 - les plus réduits possible (ossature et barres à vitrage) ;
 - les obstacles internes :
 - équipements aériens les plus réduits possible (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.

3.2.3 Éclairage artificiel

Il est à concevoir en fonction de l'objectif.

■ Éclairage photosynthétique

Étant donné les éclairages 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.

■ Éclairage morphogénétique et notamment photopériodique

Les éclairages 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.

■ Éclairage d'appoint ou éclairage totalement artificiel

— **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.

— **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.

3.2.4 Calcul des installations

Outre l'aspect électrique (section des conducteurs, protection...) seulement rappelé, ce calcul vise à déterminer l'éclairage souhaité, le nombre et la disposition des luminaires choisis, en notant que :

— les éclairages à considérer sont ceux actifs sur les plantes ; aussi, les fabricants de lampes, spécialistes du domaine, indiquent-ils pour ces derniers leur émission PAR ;

— les éclairages doivent être très uniformes sur toute l'étendue de la culture éclairée : facteur d'uniformité (défini comme éclairage minimum / éclairage moyen) supérieur ou égal à 80 %, souvent 90 % ;

— il est possible de jouer, dans les limites imposées par les dimensions de la serre, non seulement sur l'écartement des luminaires, parallèlement et perpendiculairement à l'axe longitudinal des châssis, mais aussi sur leur hauteur au-dessus du toit de la végétation. La méthode générale de calcul est celle employée en éclairagisme. Retenons, comme ordre de grandeur pour les éclairages photosynthétiques, 1 lampe à vapeur de sodium haute pression de 400 W pour 10 m².

3.3 Eau

3.3.1 Rôle

L'eau est indispensable à la plante pour assurer diverses fonctions. La consommation dépend essentiellement de l'évaporation jointe à la transpiration. L'influence de ces phénomènes sur les échanges thermiques et la température ne se limite pas au végétal, mais concerne l'ensemble de la serre et de son contenu. Par ailleurs, les teneurs en eau de l'atmosphère et du substrat sont déterminantes dans le développement des maladies, prédateurs et adventices.

3.3.2 Actions sur l'eau

Les interventions portent sur les deux milieux sus-mentionnés et visent tant l'excès que l'insuffisance. Bien qu'elles soient spécifiques à chacun des milieux, des interactions existent.

3.3.2.1 Actions sur l'humidité du substrat de culture

Les techniques et principes généraux d'irrigation et de drainage étant supposés connus ne sont précisés ici que les aspects particuliers aux serres.

■ Irrigation

— L'absence de précipitations naturelles rend l'irrigation obligatoire.

— Seules quelques cultures au sol ont un enracinement suffisamment profond pour bénéficier d'une réserve en eau permettant des irrigations classiques à fréquence faible (plusieurs jours entre deux apports).

Le plus souvent, et notamment en hors-sol, la plante ne dispose que d'un très faible volume de substrat dont, de plus, la teneur en eau doit être maintenue dans des limites très étroites de tension (entre 10 et 100 cm de hauteur d'eau). Les apports d'eau sont en conséquence réalisés à doses très faibles mais très fréquentes (plusieurs fois par jour).

— Les besoins journaliers sont évalués à partir de l'évapotranspiration potentielle qui exprime la demande climatique. Celle-ci dépend essentiellement du rayonnement solaire global sous la serre, la ventilation et le chauffage n'ayant qu'une faible incidence.

En France, l'ETP (évapotranspiration potentielle) sous serre, à échelle de la journée, est généralement calculée grâce à la relation de De Villèle :

$$\text{ETP}_s = 0,67 \frac{R_{gs}}{L} - 0,2 \approx 0,7 \frac{R_{gs}}{L} \quad (15)$$

avec ETP_s (mm · jour⁻¹) évapotranspiration potentielle sous serre,

R_{gs} (kJ · m⁻² · jour⁻¹) rayonnement solaire global sous serre,
 L (2 500 kJ · kg⁻¹) chaleur latente de vaporisation de l'eau.

R_{gs} est soit directement mesuré, soit déduit du rayonnement extérieur R_{ga} , avec R_{gs}/R_{ga} :

- 0,75 pour les serres en verre ;
- 0,80 pour les serres en PE simple paroi ;
- 0,65 pour les serres en PE double paroi.

Le dimensionnement des installations tient compte, outre les besoins de pointe (juillet, en général, sous nos latitudes) et les modalités de l'irrigation (aspersion, goutte à goutte...), du débit disponible et de la surface totale à irriguer.

■ Drainage

La protection contre les remontées de nappe dues à des apports extérieurs est à traiter de façon classique au moyen de fossés de ceinture et éventuellement de drains profonds dans le sol de la serre.

Dans ces apports extérieurs, on peut compter l'eau des précipitations reçues par la toiture de la serre elle-même et qu'il est indispensable d'évacuer assez loin pour qu'elle ne nuise pas à la culture, mais aussi à la stabilité de la serre.

Un autre objectif du drainage est d'évacuer les eaux utilisées pour débarrasser la zone des racines des sels en excès (lessivage).

Le drainage des substrats hors sol est assuré, d'une façon générale, par des orifices ouverts à la base des récipients de culture.

3.3.2.2 Actions sur l'humidité de l'air

Bien que les scientifiques se réfèrent de plus en plus au déficit de saturation de l'air (exprimé le plus souvent en grammes de vapeur d'eau par kilogramme d'air sec), en pratique c'est l'**humidité relative** de ce dernier qui est d'usage le plus courant, facilité par la mise sur le marché, à coûts modérés, de capteurs d'humidité à réponse électrique, beaucoup plus précis et fiables que les hygromètres classiques à cheveux.

L'humidité relative optimale pour les cultures varie avec la plante, son stade de développement et l'objectif de production ; on admet qu'elle est, en général, de l'ordre de 75 %.

D'autres facteurs de production importants sont aussi influencés par l'humidité de l'air, sans qu'il soit possible de fixer de valeurs précises. Retenons que :

- une humidité faible favorise le développement d'une faune souvent néfaste (acariens...);
- les humidités élevées sont préjudiciables :
 - à l'état sanitaire, en favorisant les maladies cryptogamiques,
 - à la qualité des produits, lorsque la condensation sur les parois de la serre se fait sous forme de gouttes qui tombent sur le végétal, notamment sur les fleurs,
 - à la tenue des matériaux de la serre, le bois surtout mais aussi l'acier qui doit être durablement protégé (galvanisation),
 - au bilan thermique de la serre, par accroissement des déperditions à travers les parois sujettes à condensation.

■ Accroissement de l'humidité relative

Les deux possibilités que sont le refroidissement de l'air et l'enrichissement en vapeur d'eau sont généralement combinées, par exemple avec les pulvérisations très fines favorisant l'évaporation des gouttelettes.

■ Réduction

L'élévation de la température et l'élimination de vapeur d'eau sont le plus souvent associées ici aussi.

Le procédé le plus courant consiste dans la combinaison de l'aération et du chauffage.

Il met en œuvre les équipements existants et non calculés pour cet effet particulier ; leur pilotage, empirique, s'appuie sur la détection de la température et de l'humidité.

L'utilisation de pompes à chaleur se développe, avec des modèles spéciaux pour la déshumidification.

3.4 Dioxyde de carbone (CO_2)

3.4.1 Rôle

Matériau de base pour la photosynthèse, il est indispensable aux plantes chlorophylliennes. Prélevé dans l'atmosphère ambiante, il pénètre dans la feuille par les stomates ouverts.

3.4.2 Concentration

■ Unités

La concentration est exprimée de diverses façons :

- volume de CO_2 par volume d'air sec :
 - parties par million (ppm) en volume ;
 - masse de CO_2 par volume d'air sec :
 - g CO_2 par m^3 d'air ;
 - masse de CO_2 par masse d'air sec :
 - g CO_2 par kg d'air sec,
 - g CO_2 par g d'air sec : densité,
 - parties par million (ppm) en masse.

En pratique, et au risque de confusions fréquentes, « ppm » est souvent un rapport de volumes, d'où l'intérêt, dans ce cas, de la désignation « vpm ».

■ Correspondances

$$1\ 000 \text{ vpm} \approx 1\ 520 \text{ ppm} \approx 1,520 \text{ g } \text{CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ air sec}$$

$$\approx 2 \text{ g } \text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-3} \text{ air sec}$$

■ Concentration spontanée sous abri

Par la respiration, le végétal rejette, en permanence, du CO_2 dans l'atmosphère ; par la photosynthèse, il en absorbe, le jour, en quantité croissante avec l'éclairement PAR.

Il résulte du rapport de ces deux fonctions qu'en enceinte fermée la concentration varie fortement : croissance pendant la nuit, jusque vers 500 vpm, baisse depuis le lever du jour jusqu'à atteindre 150 vpm, valeur proche de la limite où la respiration suffit juste à satisfaire la photosynthèse (seuil de compensation, de l'ordre de 100 vpm).

L'enrichissement de l'atmosphère des serres est donc nécessaire à une photosynthèse très active.

■ Concentration souhaitable

Elle varie selon les cultures et le niveau des autres facteurs, en particulier l'éclairement PAR.

Les organismes professionnels [CNIH (Comité National Interprofessionnel de l'Horticulture florale et ornementale et des pépinières), CTIFL (Centre Technique Interprofessionnel Fruits et

Légumes)] ont établi des tableaux de concentrations préconisées : celles-ci sont généralement comprises entre 600 et 1 500 vpm. Il ne suffit donc pas, alors, par simple aération, de maintenir une concentration voisine de celle de l'atmosphère libre, voisine de 350 vpm, mais il faut faire des apports artificiels.

3.4.3 Enrichissement

En général, les apports dans la serre fermée (en principe) sont réalisés à débit constant, calculé en fonction de la concentration à maintenir. Le pilotage consiste à fixer la séquence d'apport dans le temps : il est fait à l'horloge ou mieux, par ordinateur, lorsque certaines conditions d'éclairage, de fermeture des ouvrants, de concentration... sont réalisées.

3.4.3.1 Débit

Il est souvent exprimé en grammes par mètre carré de serre et par heure :

$$D = A + V n \rho (C_i - C_e) \quad (16)$$

avec	$D (\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	débit d'apport,
	$A (\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	consommation des cultures ($A = 3$ à 4),
	$V (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} = \text{m})$	volume de la serre par m^2 au sol = h_m , hauteur moyenne de la serre,
	$n (\text{h}^{-1})$	taux de renouvellement horaire de l'air de la serre,
	$\rho (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	masse volumique de l'air sec ($\approx 1,3$),
	$C_i, C_e (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ air sec})$	concentration en CO_2 des airs intérieur et extérieur,

D est de l'ordre de 5 à 10 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$.

3.4.3.2 Sources de CO_2

Il y en a trois.

■ Combustion d'un combustible carboné avec dégagement direct des fumées dans la serre

Ces fumées doivent être exemptes de produits toxiques pour la culture ou le personnel, c'est-à-dire essentiellement de produits soit soufrés, soit résultant d'une combustion incomplète (monoxyde de carbone CO) : l'absence de soufre conduit à éliminer les fioul au profit du gaz du réseau GDF et des GPL : propane et butane ; la combustion complète exige dispositifs de sécurité et réglages.

À noter que cette combustion dégage aussi de la vapeur d'eau et de la chaleur, ce qui n'est favorable que si sa durée est faible : un fonctionnement quasi permanent assurant un chauffage de forte puissance (par exemple $300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) conduirait à une concentration excessive en CO_2 (et en vapeur d'eau).

On rappelle qu'en effet la combustion de 1 kg de propane pur dégage 3 kg de CO_2 , 1,64 kg de vapeur d'eau, 49 750 kJ (PCStm) et consomme 15,7 kg d'air.

Ces appareils sont donc actuellement pilotés en fonction de la teneur de l'air en CO_2 et non plus de sa température.

■ Récupération du gaz carbonique des fumées des générateurs de chaleur, à fioul ou à gaz

Mis à part les traitements que doivent subir ces fumées pour éliminer les mêmes produits toxiques que ci-dessus, cet apport est gratuit, mais il ne correspond pas en permanence aux besoins.

■ Injection de gaz industriel pur

Stocké sous pression dans des bouteilles ou des cuves, ce CO_2 est distribué dans la serre, à la demande, sans association, parfois antagoniste, avec le chauffage.

Serres

par **Pierre BORDES**

Ingénieur agronome (Grignon)

Professeur à l'École Nationale Supérieure d'Horticulture de Versailles

Données économiques

Coût des serres et de leurs équipements : ordre de grandeur pour une surface moyenne de 1 000 à 2 000 m² (en 1992) (1)

		Serres		
Serre verre lourde ≤ 12 m (2)		300 à 350	F/m ²	
Serre verre lourde > 12 m		350 à 400	F/m ²	
Serre légère (type Venlo)		250 à 300	F/m ²	
Supplément pour doublage de parois		40 à 50	F/m ²	
Multichapelle plastique/double paroi gonflable		200 à 250	F/m ²	
Bitunnel		50 à 60	F/m ²	
Bitunnel avec aération automatique et double paroi gonflable		100 à 120	F/m ²	
Tunnel		30 à 40	F/m ²	
		Chauffage		
Production				
— Chaufferie au fioul domestique ou au gaz :			250 à 300	F/th
• 0 à 200 th/h.....			180 à 220	F/th
• 200 à 600 th/h.....			140 à 160	F/th
• > 600 th/h.....				
— Générateur air chaud/chauffage air pulsé :			180 à 200	F/th
• 0 à 200 th/h.....			150	F/th
• > 200 th/h.....				
Distribution			100	F/m ²
— Système mixte : eau chaude pulsée dans tuyaux aériens (thermosiphon) + eau tiède localisée			40 à 60	F/m ²
— Chauffage eau tiède localisé au sol et/ou tablettes				
		Irrigation		
Subirrigation			40 à 50	F/m ²
Aspersion/brumisation			20	F/m ²
Goutte à goutte en ligne			10 à 15	F/m ²
Goutte à goutte pot à pot.....			40	F/m ²
Brouillard type fog.....			50	F/m ²
Aspersion sur toiture.....			10	F/m ²
Station de tête de ferti-irrigation.....			80 à 100	kF l'unité
Ordinateur ferti-irrigation			70 à 100	kF l'unité
		Ordinateur climatique		
1 à 3 compartiments de serres.....			100 à 120	kF l'unité
4 à 6 compartiments.....			150 à 170	kF l'unité
Au-delà, par compartiment supplémentaire.....			30	kF
		Autres équipements		
Hors sol			50	F/m ²
Écran thermique			60 à 100	F/m ²
Écran d'occultation.....			100	F/m ²
Éclairage photosynthétique			100 à 150	F/m ²
Éclairage photopériodique			30 à 50	F/m ²
Enrichissement en CO ₂			15 à 20	F/m ²
Tablettes mobiles			210 à 250	F/m ²
Ponts roulants (systèmes manuels).....			10 000	F l'unité
Bacs à œillets légers avec substrat			70 à 75	F/m ²
Groupes électrogènes :				
• 20 à 50 kVA.....			1 800	F/kVA
• 51 à 150 kVA.....			1 300	F/kVA
• 151 à 300 kVA.....			1 000	F/kVA

(1) source : étude des devis contenus dans les dossiers ONFLHOR, surface moyenne 1 000 à 2 000 m². Juillet 1992. CNIH.

(2) largeur de chapelle.

Références bibliographiques

- [1] BORDES (P.). – *La maîtrise du climat en production végétale : les bases*. P. 163-355 ; *Les serres*. P. 409-453 dans *Les plastiques en agriculture*, 583 p., CPA-PHM Revue Horticole (1992).
- [2] BORDES (P.) et de FORGES (J.M.). – *Serres*. Techniques agricoles, V bis (4200), 16 p. (1991).
- [3] CORMARY (Y.) et NICOLAS (C.). – *La thermique des serres*. Eyrrolles Paris, 357 p. (1985).
- [4] DOGNIAUX (R.) et NISEN (A.). – *Traité de l'éclairage naturel des serres et abris pour végétaux*. Institut Royal Météorologique, Éd. Duculot, Bruxelles, 198 p. (1975).
- [5] DUSSION (M.F.). – *Maîtrise de l'énergie dans l'agriculture. Serres et énergie*. CNIH-AFME, 96 p. (1989).
- [6] FEUILLOLEY (P.) et GUILLAUME (S.). – *La pompe à chaleur. Un outil pour contrôler l'humidité excessive des serres*. CEMAGREF-BTMEA, n° 54, 10 p. (1990).
- [7] INRA. – *L'INRA et les cultures sous serres*. 230 p. (1983).
- [8] ISSANCHOU (G.). – *Chauffage des serres. Dimensionnement des systèmes*. CEMAGREF-BTMEA (Bulletin Technique Machinisme et Équipement Agricole), n° 56, 9 p. (1991).
- [9] *Lumière et Plantes*. N° spécial de Lux, revue de l'éclairage, Éditions Lux (1981).
- [10] NISEN (A.) et DELTOUR (J.). – *Considérations pratiques sur la transmission du rayonnement solaire et de la chaleur pour les matériaux utilisés en serres comme couverture, ombrage et écran thermique*. IRSIA - Bruxelles, 96 p. (1985-1986).
- [11] Règles NV 65. *Règles définissant les effets de la neige et du vent sur les constructions et annexes*. Eyrrolles (1978).
- [12] *Manuel des industries thermiques et aérauliques*. COSTIC, Dunod.

Normalisation

Association Française de Normalisation (AFNOR)

NF T 54-190	2-92	Plastiques. Films à usage agricole. Spécifications et méthodes d'essais.	NF U 57-060	9-91
NF U 57-001	12-84	Serres et équipements. Vocabulaire.	NF U 57-063	9-91
NF U 57-010	1-84	Serres à vitrages plans. Plan type de devis descriptif.	NF U 57-064	9-91
U 57-012	2-72	Serres. Détermination de l'étanchéité d'une serre.		
NF U 57-013	3-83	Serres tunnels. Plan type de devis descriptif.		
NF U 57-020	3-82	Serres. Caractéristiques dimensionnelles.		

Serres et équipements. Règles de stabilité pour la construction des serres à vitrages plans.

Serres et équipements. Règles de stabilité pour la construction des serres tunnels couvertes de matériaux plastiques souples ou cintrables à froid.

Serres et équipements. Règles de stabilité pour la construction des serres multichapelles, unichapelles et bitunnels couvertes de matériaux plastiques souples ou cintrables à froid.

Organismes

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ex AFME).
CEMAGREF	Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts.
CNIH	Comité National Interprofessionnel de l'Horticulture florale et ornementale et des pépinières.
CTIFL	Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes.
ENITHP	École Nationale d'Ingénieurs des Travaux de l'Horticulture et du Paysage (Angers).
ENSH	École Nationale Supérieure d'Horticulture (Versailles).
ONIFLHOR	Office National Interprofessionnel des Fruits et Légumes et de l'Horticulture Ornamentale.