

Mécanique d'un système de culture en serre sur deux niveaux

ROMAIN GUAY et ROGER THÉRIAULT

Département de génie rural, Université Laval, Sainte-Foy, Québec, QC, Canada. G1K 7P4. Reçu le 9 septembre 1988, accepté le 4 avril 1989.

Guay, R. et R. Thériault. 1989. **Mécanique d'un système de culture en serre sur deux niveaux**. *Can. Agri. Eng.* 31: 239-243. Un prototype a été conçu et construit à l'Université Laval. Son fonctionnement, c'est-à-dire le déplacement des plantes, l'allumage des lampes et l'irrigation, est entièrement automatisé. Le prototype occupe une superficie de plancher de 2,7 m × 10,5 m et permet d'utiliser 132% de la superficie occupée. Certaines modifications proposées permettraient de porter ce chiffre à 155%. Le présent article décrit la mécanique du système et son fonctionnement. A prototype of a two level greenhouse growing system has been developed at the Université Laval. Plant rotations as well as lighting and irrigation systems are all automated. This paper presents a technical description of the mechanical aspects of the prototype and its operation.

INTRODUCTION

Parmi les nombreux champs de recherche qui trouvent aujourd'hui une application dans le domaine de la serriculture, la mécanisation, l'économie d'énergie et l'utilisation optimale de l'espace sont prédominants (Aldrich et Bartok 1985). Le concept de culture multi niveaux cherche à intégrer ces trois aspects.

En 1964, O. Ruthner présentait à l'exposition horticole internationale de Vienne une serre tour de 23 m de hauteur et de 37 m² de superficie, équivalente à 280 m² de serre conventionnelle (Nelson 1981). Cette serre, équipée de convoyeurs circulant en serpentins de bas en haut, était destinée à la culture de légumes en continu et à l'année longue. Les murs de cette serre ont aujourd'hui été recouverts de panneaux isolants et opaques pour faire place à la culture sous éclairage artificiel uniquement (Ruthner 1980). On veut ainsi régulariser l'apport d'énergie lumineuse pour faciliter la production pendant toute l'année tout en réduisant considérablement les coûts de chauffage. La culture se fait sur différents convoyeurs selon le stade de développement de la plante. Tout le système, incluant le contrôle du climat, l'irrigation et l'enrichissement carboné, est automatisé. On effectue aussi la déshumidification et la recirculation de l'air et de l'eau. Les économies de chauffage, de main-d'oeuvre, d'eau et de CO₂ permettent à l'auteur d'être optimiste quant à l'avenir de ce système, principalement dans les régions nordiques et les zones arides.

Des systèmes de culture sur seulement deux niveaux se sont aussi développés; ceux-ci sont adaptés à la culture de plantes basses dans des serres conventionnelles. Stoffert (1985) présente un système de palettes mobiles disposées sur deux niveaux et qui permettent d'utiliser 172,5% de la superficie de la serre. Un chariot élévateur automatisé permet le transfert de niveau et le transport des palettes mobiles à l'endroit désiré. On dirige ainsi les palettes, soit à la salle de travail pour le chargement et le déchargement des plantes, soit à une zone destinée à l'application des pesticides. Le niveau inférieur est équipé de lampes fluorescentes et à chaque demi-journée les plantes sont changées de niveau pour qu'elles bénéficient également de l'éclairage

naturel et artificiel. L'évaluation économique de ce système montre un prix de revient inférieur à la culture conventionnelle sur un niveau.

Quelques compagnies hollandaises (Kombi Systems, Agridex et Th.Lek b.v.) fabriquent ou distribuent des systèmes de culture sur deux niveaux qui fonctionnent selon le principe d'un convoyeur; les plantes y sont cultivées dans des plateaux reliés entre eux par des chaînes qui circulent d'un niveau à l'autre.

On attribue généralement aux systèmes de culture sur deux niveaux les avantages suivants:

- augmentation substantielle de la superficie cultivée par rapport à la superficie de serre occupée.
- amélioration des conditions et de l'efficacité du travail par l'accès aux plantes en un seul endroit.
- réduction du coût spécifique de chauffage par plant.
- automatisation de l'irrigation; celle-ci se fait en un seul endroit, au passage des plateaux.
- utilisation optimale de l'éclairage artificiel, grâce à l'éclairage sur un seul des deux niveaux de culture.

OBJECTIFS

Le présent projet de recherche a été entrepris pour pallier la rareté des résultats scientifiques obtenus avec des systèmes de culture sur deux niveaux et pour vérifier le potentiel intéressant qu'ils semblent offrir. Les objectifs globaux sont: (a) concevoir et construire un système de culture en serre sur deux niveaux dont le fonctionnement sera automatisé et qui intégrera l'éclairage artificiel et un mode d'irrigation adaptés; (b) réaliser une étude agronomique et économique évaluant le système sur le plan de la productivité et de l'économie de main-d'oeuvre et de chauffage, par rapport à la culture conventionnelle pour le même type de plantes.

Les objectifs spécifiques de la première partie de l'étude présentée ici sont la conception et la mise au point mécanique d'un prototype appelé "module de culture en serre sur deux niveaux". Ce dernier a été construit dans une serre du Centre de spécialisation des cultures abritées de l'Université Laval à Sainte-Foy (Québec). La présentation porte sur les contraintes liées au design du système, la façon dont ces contraintes ont été abordées, les problèmes rencontrés et les solutions déjà apportées ou recommandées.

DIMENSIONS DU PROTOTYPE

Le module (figures 1 et 2) a été conçu pour une serre conventionnelle de 30 m × 6,4 m et 3 m de hauteur libre, dont il occupe 2,7 m × 10,5 m. En ce qui concerne la hauteur du module, il s'agissait de trouver une combinaison qui satisfasse à la fois la hauteur maximale des plantes auxquelles est destiné le module, la hauteur libre dans la serre et une distance suffisante

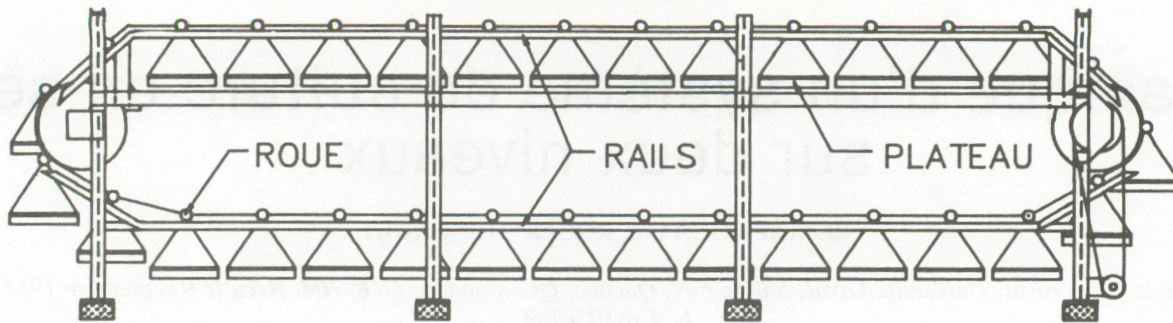


Figure 1. Vue de profil du module de culture en serre sur deux niveaux.

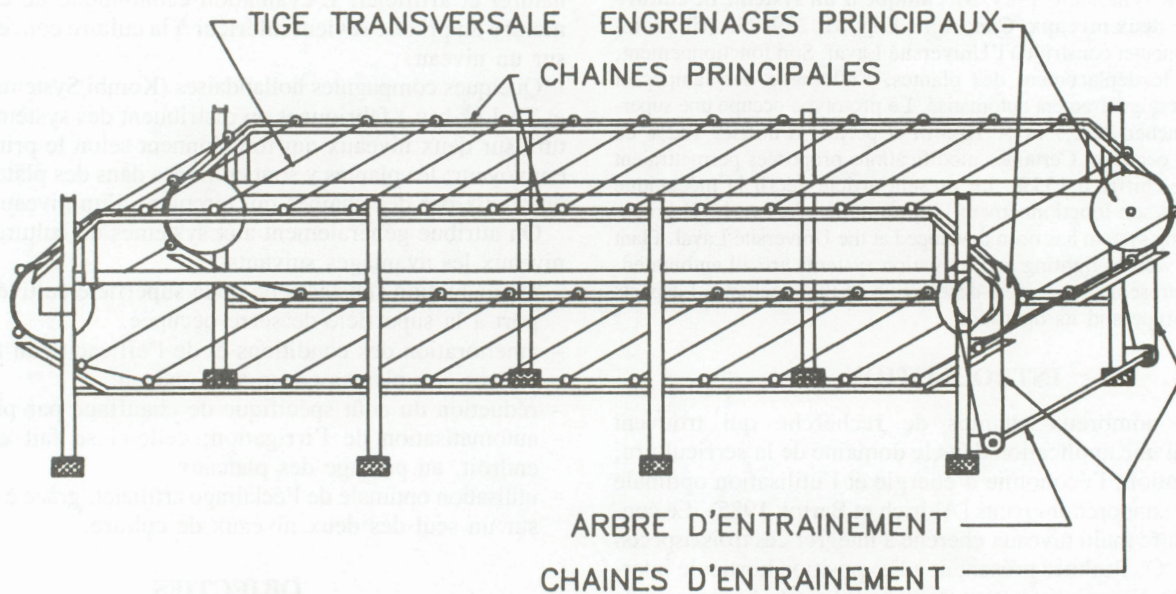


Figure 2. Vue isométrique du module, sans les plateaux.

entre les deux niveaux pour pouvoir y installer l'éclairage artificiel. La solution retenue conduit à une hauteur totale du module de 2,55 m et un éloignement maximal des lampes par rapport au niveau inférieur de 1,32 m. Le module permet ainsi la culture de plantes d'une hauteur maximale de 35 cm (à partir de la base du pot); cette limite permet d'englober une bonne variété de potées fleuries, de transplants de légumes et de plants forestiers.

DIMENSIONS DES PLATEAUX

Les plateaux (figure 3) dans lesquels sont déposées les plantes sont composés d'une base en acier suspendue aux tiges transversales du module par des crochets rigides et d'un plateau en plastique (ABS) déposé sur cette base. Les dimensions des plateaux doivent tenir compte de trois aspects, à savoir leur manutention, la facilité d'accès aux plantes et l'interférence entre les plateaux lors du transfert de niveau.

Dimensions vs. manutention

Dans un système de production incorporant le module à deux niveaux, la manutention des plantes (chargement, déchargement, transport) se fera en plateaux complets. Ainsi, les plateaux remplis de plantes, par leur poids et leurs dimensions, doivent pouvoir être manipulés facilement.

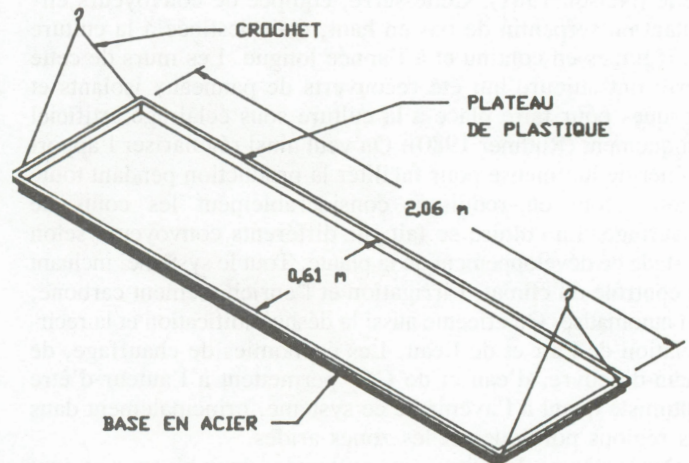


Figure 3. Plateau.

Dans leur version actuelle, les bases de plateaux ont été surdimensionnées. Au stade expérimental, ceci ne pose pas de problèmes sérieux, mais on peut envisager diverses alternatives qui permettraient une manutention plus facile des plateaux. On pourrait simplement considérer une base dimensionnée plus exactement pour réduire son poids au minimum. Le critère pour le dimensionnement devrait être le poids d'un plateau lorsque rempli d'eau jusqu'au trop-plein localisé à 2 cm du fond (environ

30 kg). De plus, l'ajout d'un crochet supplémentaire au centre, qui réduirait la portée libre de la base, serait à envisager. On pourrait aussi songer à un plateau renforcé qui ne nécessiterait pas de base en acier et qui pourrait être suspendu directement aux tiges du module. Des chaînes pourraient remplacer avantageusement les actuels crochets rigides solidaires de la base des plateaux. Ces chaînes seraient plutôt solidaires des tiges transversales du module et permettraient d'accrocher les plateaux munis de simples anneaux.

En ce qui concerne la manutention, un design amélioré des plateaux vise donc à minimiser leur poids, à optimiser leurs dimensions et à faciliter leur accrochage au module. L'option choisie devra aussi tenir compte de la disponibilité des composants sur le marché, particulièrement les plateaux de plastique qui ne sont pas fabriqués commercialement dans tous les formats.

Dimensions vs. accès aux plantes

Les dimensions des plateaux sont aussi dictées par la dimension des pots et des plantes qu'ils contiennent et de l'espace entre ces pots. La largeur des plateaux est toutefois limitée à un maximum d'un mètre si l'on désire maintenir la facilité d'accès aux plantes. L'accès aux plantes est nécessaire pour l'application de pesticides et diverses manipulations.

Dimensions vs. interférence entre les plateaux

Une contrainte supplémentaire est imposée à la dimension des plateaux. Elle concerne l'interférence entre les plateaux lors du changement de niveau. En effet, les plateaux se croisent lors du transfert de niveau et il en résulte un contact entre les plantes et la base du plateau situé juste au-dessus. On observe, à la figure 4, la trajectoire qu'effectue le plateau 2 par rapport au plateau 1. Si les plantes du plateau 1 ont leur feuillage qui déborde à l'extérieur de l'enveloppe formée par cette trajectoire, leur feuillage sera relevé ou abaissé lors du transfert de niveau. Les plantes se trouvent ainsi endommagées, ce qui est inadmissible. Dans l'état actuel, l'espace utile aux plantes, c'est-à-dire l'espace où il n'y a pas d'interférence du plateau avec les plantes, est illustré à la figure 5a. Ainsi les plantes, lorsqu'elles atteignent une certaine hauteur, doivent être déplacées vers l'intérieur du plateau pour éviter d'être abaissées. Ceci conduit à une utilisation moindre de l'espace disponible.

Les figures 5a et 5b ont été dessinées par un logiciel de simulation graphique qui permet de visualiser le déplacement des plateaux dans toutes les conditions de géométrie voulues. Ce logiciel, combiné à une analyse détaillée de la géométrie du système, a permis de constater que cet espace utile peut être optimisé en faisant un choix judicieux de la largeur des plateaux, de l'espacement entre ceux-ci et de l'angle que prend le rail vers l'engrenage. Cette analyse a conduit à proposer un design amélioré qui permet l'utilisation de 155% de la superficie de serre occupée comparativement à 132% dans l'état actuel. L'espace utile aux plantes avec ce nouveau design est illustré à la figure 5b. Ce nouveau design implique l'augmentation de la largeur des plateaux de 61 cm à 81,4 cm, le maintien de l'espacement entre les plateaux à 7,5 cm et la réduction de l'angle que prennent les rails vers l'engrenage de 43° à 18°. Les 45% manquants, pour doubler la superficie de culture, sont occupés par la structure de support du module; celle-ci pourrait être réduite sensiblement dans un futur système.

Une procédure de design a été établie pour établir les dimensions optimales des plateaux et du module pour une plante d'un format donné. On pourrait ainsi penser à un système de production composé de plusieurs modules, dont les dimensions

seraient optimisées pour les divers stades de croissance des plantes.

MÉCANISME D'ENTRAÎNEMENT

Une unité hydraulique munie d'un moteur électrique de 3,75 kW actionne le moteur hydraulique qui transmet le mouvement au système. L'emploi d'un moteur hydraulique s'est avéré utile pour faciliter le réglage et l'inversion de la vitesse de rotation. Le mouvement est communiqué à l'arbre d'entraînement par une transmission qui réduit 50 fois la vitesse de rotation du moteur hydraulique. Cet arbre entraîne à son tour les engrenages principaux par le biais des chaînes d'entraînement. Notons que les engrenages principaux sont installés en porte-à-faux sur leur arbre respectif. Ceci est nécessaire puisque les plateaux croisent le centre de ces engrenages lors du transfert de niveau.

L'unité hydraulique est munie d'un diviseur de débit qui permet d'ajuster la vitesse de rotation du module. La vitesse d'avancement des plateaux a ainsi été fixée à 3,17 cm/s. A cette vitesse, le moteur électrique consomme 23 A, la pression hydraulique moyenne est de 2 MPa et il faut 11 min et 17 s pour effectuer un tour complet. Dans un complex comptant plusieurs modules de culture sur deux niveaux, une seule unité hydraulique pourrait être utilisée pour actionner successivement chaque module.

Tous les arbres sont montés sur des paliers en bronze auto-lubrifiants. Ceux-ci sont efficaces vu les faibles vitesses de rotation, mais sont difficiles d'installation à cause de la nécessité d'un alignement parfait.

Des guides pour les chaînes principales ont été installés aux endroits où le rail change de pente pour rejoindre l'engrenage (figure 6). Ces guides permettent de maintenir une tension égale dans les chaînes principales en maintenant constante la longueur de parcours des chaînes. La présence de ces guides est essentielle puisque, sans ces derniers, les variations brusques de tension dans les chaînes causent un sérieux problème de stabilité des plateaux.

Le moteur électrique, de même que la valve solénoïde qui met le moteur hydraulique en mouvement, peuvent être actionnés manuellement ou par le biais du micro-ordinateur qui gère le système. Par mesure de sécurité, une alarme sonore et lumineuse s'active quelques secondes avant que l'ordinateur ne donne la commande à l'unité hydraulique de mettre le module en marche.

Le mécanisme d'entraînement a démontré, après un an d'utilisation, une bonne fiabilité. Celui-ci devra cependant être simplifié pour en réduire les coûts, si on envisage son application à l'échelle industrielle. Des développements en cours apporteront des modifications importantes, dont le remplacement des engrenages principaux par un rail recourbé et l'entraînement effectué sur la section horizontale avec de plus petits engrenages.

SYSTÈME D'IRRIGATION

Un mode d'irrigation adapté au module et entièrement automatisé a été conçu conformément à l'un des objectifs du projet. L'irrigation comporte deux aspects, à savoir l'installation physique et le programme de contrôle automatisé. Seule l'installation physique retient ici notre attention.

Le principe retenu consiste à peser les plateaux à intervalles réguliers et à irriguer en fonction du besoin en eau déduit de la pesée. La pesée s'effectue à un endroit sur le module où le rail qui supporte les roulettes a été percé et remplacé par une plaque reliée à une cellule de charge (figure 7). Deux cellules

de charge ont ainsi été installées pour supporter les deux roulettes de chaque plateau. Le suivi du poids des plateaux sert d'abord au calcul des besoins en eau et fournit aussi de l'information sur l'évapotranspiration.

Une pompe submergée dans le réservoir d'irrigation et une valve solénoïde actionnées par l'ordinateur assurent l'amenée d'eau aux plateaux. La fréquence des irrigations varie principalement avec le type de plante et la saison. Elle est facilement ajustable avec un tel système. Notons que les fertilisants sont dissous dans l'eau d'irrigation.

L'irrigation par capillarité est le type d'irrigation qui s'adapte le mieux au système. En effet celui-ci permet, contrairement à l'aspersion, d'éviter le mouillage des feuilles qui est mal supporté par certaines espèces florales (ex. géranium et bégonia).

L'irrigation par capillarité nécessite que les plateaux soient étanches, qu'ils aient le fond très plat et qu'ils soient au niveau. L'utilisation de chaînes en remplacement des actuels crochets rigides, tel que proposé pour faciliter la maintenance des plateaux, trouve aussi son utilité dans le fait que ces chaînes

Figure 5. Résultats de simulation représentant les trajectoires de l'interférence avec les plantes. (a) Design actuel. (b) Design optimisé.

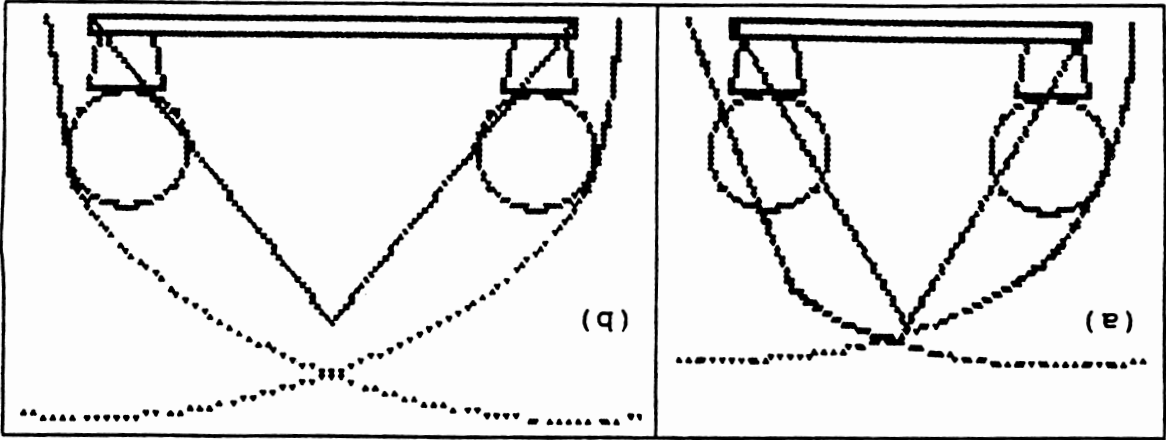
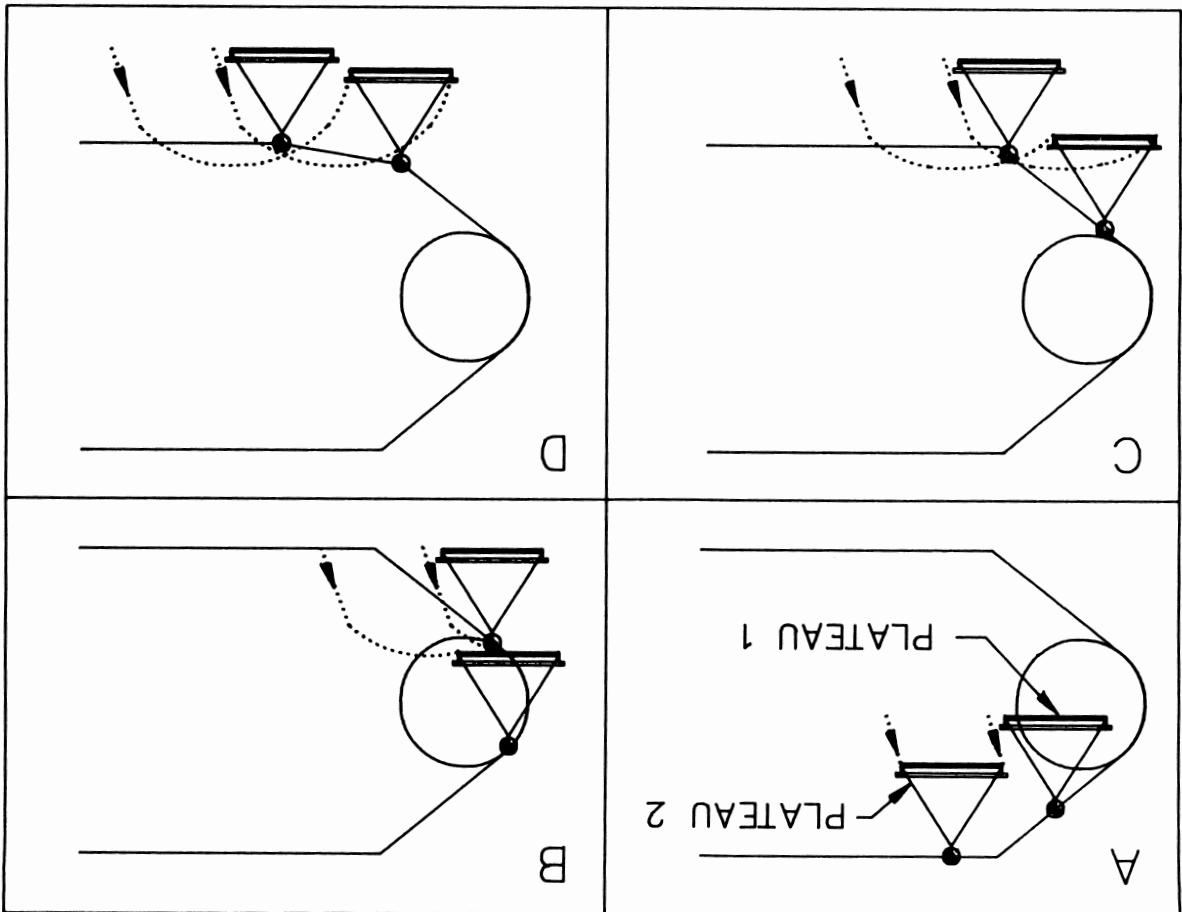


Figure 4. Progression de la trajectoire du plateau 2 par rapport au plateau 1, lors du transfert de niveau.



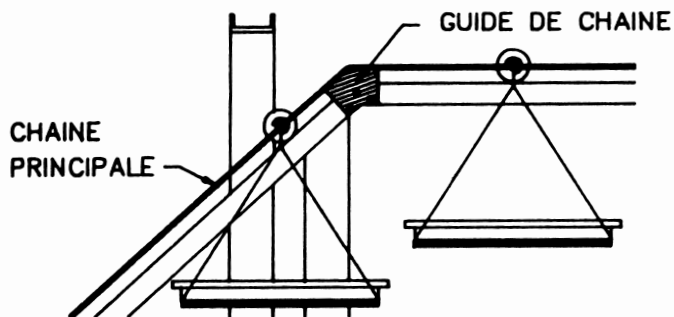


Figure 6. Détail du guide de chaîne.

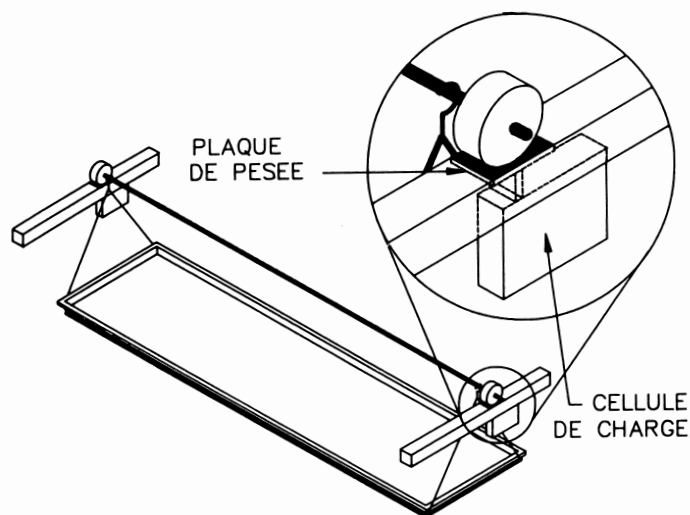


Figure 7. Arrangement des cellules de charge pour la pesée des plateaux.

peuvent être munies d'un ajustement qui permettrait le nivellement exact de chaque plateau.

La distribution uniforme de l'eau pose un problème supplémentaire. En effet, le plateau étant libre de balancer autour de l'axe de la tige qui le supporte, l'eau a tendance à s'accumuler d'un seul côté du plateau. Ceci a comme conséquences que l'eau est inégalement répartie entre les plantes et que le plateau ainsi dénivélé accentue les problèmes d'interférence lors du transfert de niveau. Des essais sont en cours pour trouver la façon de remédier à ce problème.

ÉCLAIRAGE

Dans un système de culture sur deux niveaux, il faut inévitablement penser à l'apport d'éclairage artificiel au niveau inférieur. Cet éclairage d'appoint permet d'abord de maintenir un certain niveau d'éclairage aux plantes qui sont situées au niveau inférieur et aussi de produire la photopériode désirée. Pendant la journée, les plantes situées au niveau supérieur reçoivent la lumière du jour, celles au niveau inférieur et aux extrémités reçoivent la lumière des lampes et une partie de lumière solaire diffuse ou directe. Pour obtenir une croissance uniforme, il faut s'assurer que chaque plante reçoive une quantité comparable de rayonnement tant naturel qu'artificiel. Pour ceci, une bonne régie des rotations des plateaux doit être faite.

La simulation du système sur ordinateur a servi à établir la meilleure stratégie de rotation des plateaux (Guay et Thériault 1988). Diverses stratégies ont ainsi été évaluées. La stratégie très simple qui consiste à effectuer un demi-tour moins deux plateaux, une fois par jour, à 12:00 h, et un demi-tour exact à 24:00 h conduit aux meilleurs résultats. Un coefficient de variation de moins de 2% sur la radiation reçue par chaque plateau est atteint en moyenne avec cette stratégie. Le fait de soustraire deux plateaux à la rotation de 12:00 h permet d'assurer que les plateaux occuperont tour à tour les positions extrêmes sur le module, lesquelles reçoivent un éclairage moindre. La demi-rotation de minuit sert à combler successivement la photopériode des deux niveaux, les lampes demeurant allumées le temps nécessaire.

Bien que l'uniformité d'éclairage soit assurée, la quantité totale de rayonnement solaire reçu par les plantes sur un système à deux niveaux est tout de même près de la moitié de ce qu'elle est dans une culture conventionnelle sur un seul niveau. L'analyse des effets occasionnés par cette réduction de la quantité de rayonnement solaire sur la croissance des plantes, sera abordée dans une étape ultérieure du projet de recherche.

CONCLUSION

Un système de culture sur deux niveaux a été conçu et construit dans le cadre d'une étude qui cherche à évaluer le potentiel de cette approche pour la culture de plantes basses dans des serres conventionnelles. Le prototype, au terme de 12 mois d'expérimentation, s'est avéré fiable au point de vue mécanique.

Des améliorations, principalement au point de vue de la dimension et du mode de suspension des plateaux, sont proposées. Elles visent à faciliter la manutention des plateaux et à éviter les dommages causés aux plantes lors du transfert de niveau. Des développements sont aussi à venir au sujet de l'irrigation pour résoudre le problème d'uniformité de distribution de l'eau. L'allègement de la structure et la simplification du mécanisme d'entraînement sont aussi envisagés.

Une régie adéquate des rotations du système, de même que la présence d'éclairage artificiel au niveau inférieur, permettent d'atteindre une bonne uniformité de la radiation reçue par chaque plante et de combler la photopériode requise par celles-ci.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le fonds FCAR dont l'appui financier a permis la réalisation de cette étude.

RÉFÉRENCES

- ALDRICH, A. A. et J. W. BARTOK, Jr. 1985. Greenhouse engineering. Dept. of Agricultural Engineering, University of Connecticut, Storrs, CT.
- GUAY, R. et R. THÉRIAULT. 1988. Éclairage et régie des déplacements d'un module de culture en serre sur deux niveaux. Can. Agric. Eng.
- NELSON, P. V. 1981. Greenhouse operation and management. Reston Publishing Co. Inc., Reston, VA.
- RUTHNER, E. 1980. All-year-round continuous crop production. Proceedings of the Fifth Congress of the International Society for Soilless Culture. pp. 501-511.
- STOFFERT, G. 1985. The deliver system utilizes 172% of the cultivation area. Gb + Gw, Vol. 85, No. 6: 245-250.