

**CE PROJET A ÉTÉ RENDU POSSIBLE GRÂCE AU FINANCEMENT DU
PROGRAMME D'APPROVISIONNEMENT EN EAU CANADA-QUÉBEC (PAECQ).**

Il s'agit d'une initiative fédérale-provinciale issue du
Cadre stratégique pour l'agriculture dont la livraison a été confiée au
Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec.

PROGRAMME D'APPROVISIONNEMENT EN EAU CANADA-QUÉBEC

Ce programme est issu du Cadre stratégique pour l'agriculture.

Pour plus d'information :

| | | | |
|---|--|---|---|
|  Agriculture et Agroalimentaire Canada |  Agriculture and Agri-Food Canada |  Agriculture, Pêcheries et Alimentation Québec |  CDAQ CONSEIL POUR LE DÉVELOPPEMENT DE L'AGRICULTURE DU QUÉBEC www.cdaq.qc.ca |
|---|--|---|---|

Le CDAQ et les bailleurs de fonds ne sont pas responsables du contenu ou de l'exactitude de
l'information contenue dans ce rapport.

Étude d'acquisition de connaissances du pilotage de l'irrigation par tensiométrie et de la gestion du microclimat par micro-aspersion dans la production de la fraise à jours neutres à l'île d'Orléans

5009 PAECQ

Demandeur :
Syndicat de l'UPA de l'île d'Orléans

Rapport final

Mars 2006 à mars 2008

Rédigé par
Carl Boivin, M.Sc., agr. - IRDA



Avec la collaboration de
Daniel Bergeron, agr. - MAPAQ
Julie Bouchard, agr. - IRDA
Aline Germain, tech. - IRDA

Mai 2008

PROGRAMME D'APPROVISIONNEMENT EN EAU CANADA-QUÉBEC

Ce programme est issu du Cadre stratégique pour l'agriculture.



Agriculture and
Agri-Food Canada

*Agriculture, Pêcheries
et Alimentation*

Québec

Pour plus d'information :



TABLE DES MATIÈRES

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | DESCRIPTION DU PROJET..... | 4 |
| 1.1 | Introduction..... | 4 |
| 1.2 | Objectif général..... | 5 |
| 1.3 | Objectifs spécifiques..... | 5 |
| 1.4 | Atteinte des objectifs..... | 5 |
| 1.5 | Étapes et échéances..... | 6 |
| 2 | RÉSULTATS ET ANALYSE..... | 7 |
| 2.1 | Mise en place de l'expérience..... | 7 |
| 2.2 | Traitements..... | 7 |
| 2.3 | Dispositif expérimental..... | 7 |
| 2.4 | Collecte des données..... | 8 |
| 2.5 | Analyse des données..... | 8 |
| 2.6 | Résultats obtenus pour la saison 2007 selon les objectifs spécifiques..... | 9 |
| 2.6.1 | Déterminer la tension du sol où le déclenchement de l'irrigation serait optimal..... | 9 |
| 2.6.2 | Quantifier les modifications de la micro-asperion sur le microclimat..... | 10 |
| 2.6.3 | Évaluer l'efficacité de la régulation thermique sur les rendements en fruits..... | 14 |
| 2.6.4 | Évaluer l'intensité ou la durée de stress thermique qui pourrait induire l'inhibition de la formation de l'inflorescence chez le fraisier..... | 14 |
| 2.6.5 | Évaluer l'impact phytosanitaire de la micro-asperion sur le fraisier..... | 17 |
| 2.7 | Analyse des résultats obtenus pour l'ensemble du projet..... | 17 |
| 2.7.1 | Retour sur la saison 2006..... | 17 |
| 2.7.2 | Éléments qui ont assuré la réussite du projet..... | 17 |
| 2.7.3 | Biens livrés..... | 18 |
| 3 | IMPACT..... | 18 |
| 3.1 | Impact sur le secteur..... | 18 |
| 3.2 | Pérennité du projet..... | 18 |
| 3.3 | Diffusion des résultats..... | 19 |
| 4 | REMERCIEMENTS..... | 20 |
| 5 | RÉFÉRENCES..... | 20 |
| 6 | PLAN DE FINANCEMENT ET CONCILIATION DES DÉPENSES..... | 20 |
| | ANNEXE A. Pluviométrie..... | 21 |
| | ANNEXE B. Photos..... | 24 |
| | ANNEXE C. Revue de littérature..... | 25 |
| 1 | Métabolisme en C3, C4 ou CAM (Michaud, 2006; Raven et collab. 2000)..... | 28 |
| 2 | Réponses et adaptation au stress thermique..... | 29 |
| 2.1 | Cas de la culture de la fraise..... | 31 |
| 3 | Mécanisme du refroidissement par évaporation..... | 34 |
| 4 | Effet du refroidissement par évaporation sur la température du couvert végétal..... | 36 |
| 4.1 | Refroidissement de l'air et des fruits..... | 36 |
| 4.2 | Refroidissement des feuilles..... | 39 |
| 4.3 | Refroidissement des bourgeons..... | 40 |
| 5 | Effet du refroidissement par évaporation sur la qualité des fruits..... | 42 |
| 6 | Effet du refroidissement par évaporation sur le rendement..... | 43 |
| 7 | Discussion et synthèse..... | 44 |
| 8 | Conclusion..... | 46 |
| 9 | Bibliographie..... | 47 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau 1. Analyse de la variance des données relatives au rendement vendable et au poids moyen du fruit vendable | 9 |
| Tableau 2. Tension moyenne de l'eau dans le sol (mensuelle et saisonnière) pour les différents traitements à l'étude, soit l'irrigation déclenchée à 5, 18 et 33 cbar (I5, I18 et I33) en interaction avec la micro-aspersion, sans (NR) et avec refroidissement (R)..... | 9 |
| Tableau 3. Impacts sur certaines variables mesurées lors des 168 épisodes de micro-aspersion réalisées en juillet et août..... | 10 |
| Tableau 4. Coefficient de corrélation entre les variables à l'étude..... | 12 |
| Tableau 5. Analyse de la variance des données relatives au rendement vendable et au poids moyen du fruit vendable | 17 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1. Bloc 3 du dispositif expérimental (<i>split-plot</i>)..... | 8 |
| Figure 2. Température (°C) enregistrée au niveau du couvert végétal à 10 cm du sol dans les parcelles avec et sans refroidissement et à 1,5 m du sol (air ambiant) le 23 juillet 2007 entre 11 h et 14 h..... | 11 |
| Figure 3. Relation entre la diminution maximale de température de l'air au niveau du couvert végétal (DMTCV) et le taux d'humidité relative de l'air ambiant (HRAA) | 12 |
| Figure 4. Relation entre le différentiel de température entre l'air au niveau du couvert végétal et celle de l'air ambiant (DTCVAA) et le taux d'humidité relative de l'air ambiant (HRAA)..... | 13 |
| Figure 5. Relation entre le différentiel de température entre l'air au niveau du couvert végétal et celle de l'air ambiant (DTCVAA) et la température de l'air ambiant (TAA) | 13 |
| Figure 6. Poids moyen des fruits vendables (g) selon la période de récolte..... | 14 |
| Figure 7. Températures maximales journalières (°C) de l'air ambiant et de l'air au niveau du couvert végétal pour le mois de juillet 2007 | 15 |
| Figure 8. Températures maximales journalières (°C) de l'air ambiant et de l'air au niveau du couvert végétal pour le mois d'août 2007..... | 15 |
| Figure 9. Rendement en fruits vendables (kg/ha) selon la période de récolte | 16 |
| Figure 10. Pluviométrie mesurée sur le site expérimental du 27 mai au 30 juin 2007..... | 21 |
| Figure 11. Pluviométrie mesurée sur le site expérimental pour le mois de juillet 2007..... | 21 |
| Figure 12. Pluviométrie mesurée sur le site expérimental pour le mois d'août 2007..... | 22 |
| Figure 13. Pluviométrie mesurée sur le site expérimental pour le mois de septembre 2007..... | 22 |
| Figure 14. Pluviométrie mesurée sur le site expérimental pour le mois d'octobre 2007..... | 23 |
| Figure 15. Système utilisé pour la micro-aspersion..... | 24 |
| Figure 16. Valves électriques permettant de contrôler l'irrigation et la micro-aspersion. | 24 |

1 DESCRIPTION DU PROJET

1.1 Introduction

La production de fraises à jours neutres se fait principalement sur paillis de plastique noir avec un système d'irrigation goutte à goutte. L'utilisation d'un système d'irrigation œuvrant au niveau du sol permet de réaliser des économies appréciables d'eau, comparativement à un système par aspersion. Toutefois, même si les économies d'eau réalisées avec un système goutte à goutte peuvent être potentiellement importantes, elles sont largement tributaires d'une gestion efficace de l'irrigation. Afin d'assurer une bonne régie de l'eau, il est d'abord indispensable de connaître les besoins de la culture et la variation de ceux-ci en fonction du stade de développement. Aussi, il est impératif de mesurer régulièrement la teneur en eau du sol. Cette information permettra de préciser le moment où il faut irriguer et surtout si les volumes appliqués sont insuffisants ou en excès par rapport au type de sol et au besoin de la culture. Le tensiomètre permet une estimation fiable de la disponibilité de l'eau à la plante et de l'évolution de l'état hydrique du sol.

L'abandon de l'irrigation par aspersion dans la fraise à jours neutres, l'efficacité étant plus faible en présence de paillis de plastique, prive le couvert végétal d'un moyen de diminuer sa température par refroidissement évaporatif. De plus, l'énergie du rayonnement solaire captée par le paillis de plastique noir peut devenir une source de chaleur importante. Par conséquent, il en résulte une accentuation de la température du sol, de l'air et du plant. D'ailleurs, cet effet peut être particulièrement important durant les premières semaines qui suivent l'implantation, car la surface du paillis recouverte par les plants est limitée. En 2006, des températures de 39 °C ont été mesurées au niveau du couvert végétal en début de saison.

La plante dispose d'un moyen efficace pour réguler sa température interne, soit par la transpiration. Lorsque la température augmente, la plante peut augmenter son taux de transpiration pour perdre davantage de chaleur, mais en de telles situations la plante ne fait pas un usage optimal de l'eau. Ce système a aussi des limites : lorsque le taux de transpiration dépasse la capacité des racines à fournir l'eau, les stomates se ferment pour protéger la plante du dessèchement et la température interne de la plante augmente. Cette hausse de la température interne peut être responsable de baisses de rendements subséquentes aux désordres physiologiques telles l'inhibition de l'initiation de l'inflorescence, la diminution de la nouaison et du grossissement du fruit. À elle seule, la perte de la première inflorescence est suffisante pour occasionner une baisse de rendement de l'ordre de 20 % pour le plant.

Les systèmes d'irrigation par aspersion traditionnels ne sont pas déclenchés en fonction de la température du couvert végétal, mais plutôt selon l'état hydrique du sol. C'est pourquoi ce projet s'est intéressé à la gestion de l'irrigation, mais aussi au potentiel de la micro-aspersion comme méthode de refroidissement du couvert végétal par évaporation.

1.2 Objectif général

Le projet proposé vise à régulariser et à augmenter les rendements dans la production de la fraise à jours neutres. En utilisant la tensiométrie pour optimiser la fréquence des irrigations et la micro-aspersion pour maintenir le plant en situation idéale de production, on augmente le nombre d'unités produites (de fraises) pour un volume d'eau donné.

1.3 Objectifs spécifiques

- Déterminer la tension du sol où le déclenchement de l'irrigation serait optimal
- Quantifier les modifications de la micro-aspersion sur le microclimat
- Évaluer l'intensité ou la durée de stress thermique qui pourrait induire l'inhibition de la formation de l'inflorescence chez le fraisier
- Évaluer l'efficacité de la régulation thermique sur les rendements en fruits
- Évaluer l'impact phytosanitaire de la micro-aspersion sur le fraisier

1.4 Atteinte des objectifs

D'abord, les conditions d'humidité de sol relativement homogènes entre les différents traitements d'irrigation, conséquentes aux épisodes de pluie, n'ont pas permis de mesurer l'influence réelle des trois régies d'irrigation. En effet, comme les plants n'ont pas été véritablement soumis à des conditions différentes de disponibilité en eau du sol, il est impossible de déterminer la tension optimale pour le déclenchement de l'irrigation pour le fraisier sur le site en question.

En ce qui a trait à l'impact de la micro-aspersion sur le microclimat de la plante, les résultats obtenus permettent de conclure que cette méthode est efficace pour réduire la température de l'air au niveau du couvert végétal. En 2007, la diminution moyenne de température de l'air au niveau du couvert végétal pour les mois de juillet et août était de 3,8 °C. Il existe une relation entre le taux d'humidité de l'air ambiant et l'efficacité de la micro-aspersion. En effet, au fur et à mesure que l'humidité relative de l'air ambiant augmente, l'efficacité du refroidissement par évaporation diminue. Toutefois, d'autres facteurs comme la vitesse des vents et le taux de couverture du couvert végétal sont à considérer.

Les résultats obtenus permettent d'attribuer les gains en rendement et en calibre des fruits vendables au traitement de refroidissement. Les fruits récoltés dans les parcelles avec refroidissement, pour les périodes comprises entre le 31 juillet et le 13 août ainsi que celles entre le 14 et 27 août, avaient un calibre respectivement plus élevé de 7,6 et 15 %. En ce qui a trait au rendement vendable, ce dernier a été supérieur de 2 595 kg/ha comparativement à celui obtenu dans les parcelles sans refroidissement.

Il est plus difficile d'identifier clairement quelle intensité ou durée et à partir de quelle température il y a un stress thermique pour le fraisier, et leur rôle dans l'inhibition de la formation de l'inflorescence. Cependant, en s'appuyant sur la littérature, il est possible de relier les gains mesurés dans les parcelles refroidies à l'épisode de chaleur observé durant la saison.

Jusqu'à maintenant, l'application d'eau répétée par micro-aspersion n'a pas influencé l'importance des maladies observées au champ.

Enfin, bien que cette technique ait donné des résultats intéressants en parcelles expérimentales, il faudrait l'expérimenter à grande échelle avant de pouvoir la recommander.

1.5 Étapes et échéances

Activités réalisées d'avril 2007 à mars 2008

Avril 2007

Réunion avec les collaborateurs au projet

Mise en place du dispositif

Automatisation des traitements d'irrigation et de micro-aspersion

Mai à octobre 2007

Conduite des essais et collecte des données

Décembre 2007 à mars 2008

Compilation, analyses et interprétation des données

Rédaction du rapport final

Diffusion des résultats (voir section)

2 RÉSULTATS ET ANALYSE

2.1 Mise en place de l'expérience

Le projet échelonné sur 2 ans, s'est déroulé à la Ferme Onésime Pouliot inc. située à Saint-Jean-de-l'île-d'Orléans. En 2007, les fraisiers (cv 'Seascape') ont été implantés le 13 mai, en rang triple et à une densité de 57 300 plants/ha. Dans les différents blocs, le pH du sol, un loam argileux, variait de 5,3 à 6,2 et le taux de matière organique, de 5,2 à 6,6. Les inflorescences ont été supprimées jusqu'au 14 juin. La première récolte s'est effectuée le 17 juillet et la dernière le 10 octobre.

2.2 Traitements

Les trois traitements d'irrigation étaient gérés en fonction de la tension en eau du sol. La tension correspondant à la capacité au champ était de trois centibars (cbar)¹. Le seuil de déclenchement du 1^{er} traitement était très près de cette capacité au champ, soit 5 cbar. Le seuil de déclenchement des 2^e et 3^e traitements était respectivement de 15 et 30 cbar de plus que la tension à la capacité au champ, soit 18 et 33 cbar.

Les deux traitements de refroidissement étaient constitués d'un témoin sans refroidissement et d'un traitement où le système de micro-aspersion était déclenché durant 15 minutes lorsque la température de l'air au niveau du couvert végétal atteignait 27 °C. Le système pouvait fonctionner entre 8 h et 18 h et une contrainte de 45 minutes était imposée au système avant qu'il ne puisse être actionné de nouveau.

Le suivi de la disponibilité en eau du sol était réalisé en continu dans chacune des parcelles à l'aide d'un tensiomètre à communication sans fil. Ces tensiomètres étaient reliés à un système de contrôle permettant de déclencher indépendamment l'irrigation dans chacune des parcelles. Les traitements de micro-aspersion étaient également contrôlés automatiquement à partir des mesures de température du couvert végétal effectuées par des thermocouples reliés à un CR10X (Campbell Scientific).

2.3 Dispositif expérimental

En 2007, deux facteurs étaient à l'étude dans ce projet, soient en parcelles principales, les trois régies d'irrigation et en sous-parcelles, les deux traitements ayant trait au refroidissement. Le dispositif expérimental était un plan à parcelles partagées (*split-plot*), les traitements d'irrigation disposés dans un plan en blocs aléatoires complets (3 blocs) et les traitements de refroidissement, assignés de façon complètement aléatoire aux sous-parcelles, pour un total de 18 unités expérimentales ou parcelles. Chacune des parcelles était composée de 21 plants de fraisiers disposés en rang triple (Figure 1).

¹ 1 centibar = 1 kilopascal (kPa)

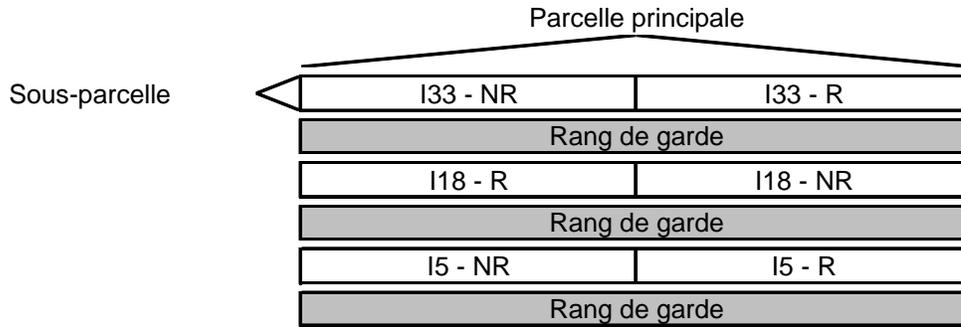


Figure 1. Bloc 3 du dispositif expérimental (*split-plot*).

En parcelles principales, les trois régies d'irrigation, soient l'irrigation déclenchée à 5 cbar (I5), 18 cbar (I18) et celle déclenchée à 33 cbar (I33). En sous-parcelles, les deux traitements de refroidissement, soient le témoin sans refroidissement (NR) et celui où la micro-aspersion est déclenchée lorsque la température de l'air au niveau du couvert végétal atteint 27 °C (R).

2.4 Collecte des données

Les teneurs en éléments minéraux, le pH, la matière organique du sol ont été déterminés dans chacune des 18 parcelles à partir d'échantillons composites prélevés au printemps. La pluviométrie (Pluviomètre HOBO, modèle RG3-M), la température et l'humidité relative de l'air ambiant (HOBO Pro v2, modèle U23-001), la température de l'air (Thermocouple cuivre-constantin) au niveau du couvert végétal, la température des feuilles (Thermomètre infrarouge, modèle OS101 d'Omega) et la mouillure de ces dernières (Sondes modèle 237-L de Campbell Scientific) ont été mesurées en continu pour la durée du projet. Outre les instruments de mesure HOBO qui sont autonomes, les autres appareils de mesures étaient reliés à des CR10X.

La disponibilité de l'eau dans le sol a été mesurée en continu avec des tensiomètres (Hortimètre, modèle T-80, d'HORTAU) dans chacune des parcelles. Le rendement total de chacune des 18 parcelles (21 plants/parcelle) a été mesuré et caractérisé. Ainsi, les fruits étaient pesés, comptés et classés par catégorie. Les fruits non vendables étaient ceux qui avaient un poids inférieur à 5 g ou qui présentaient de la difformité, des coups de soleil ou la présence de maladie. Enfin, à la fin de la saison le taux de matière sèche des plants a été mesuré.

2.5 Analyse des données

Les analyses statistiques ont été réalisées avec la procédure Mixte de SAS pour le rendement vendable, le poids moyen des fruits vendables et le taux de matière sèche des fraisiers et la procédure Glimmix pour la présence de botrytis et d'antracnose.

Dans le cadre de ce projet, les trois régies d'irrigation n'ont pas influencé différemment le rendement vendable et le poids moyen du fruit (Tableau 1). Les rendements obtenus sont variables d'une période à l'autre, mais correspondent à ce qui est observé normalement, c'est-à-dire une augmentation graduelle du volume total produit jusqu'à l'atteinte d'un pic et une

diminution graduelle par la suite. Enfin, le refroidissement a influencé significativement le rendement vendable et le poids moyen du fruit et cet effet varie selon la période de la saison.

Tableau 1. Analyse de la variance des données relatives au rendement vendable et au poids moyen du fruit vendable.

| Traitement | Degrés de liberté (dl) | Rendement vendable | Poids moyen du fruit |
|------------------------|------------------------|--------------------|----------------------|
| Irrigation (I) | 2 | n.s. | n.s. |
| Refroidissement (R) | 1 | † | *** |
| I x R | 2 | n.s. | n.s. |
| Période de récolte (P) | 5 | *** | *** |
| I x P | 10 | n.s. | n.s. |
| R x P | 5 | *** | *** |
| I x R x P | 10 | n.s. | n.s. |

† Significatif au seuil 0,1

*** Significatif au seuil 0,001

n.s. : Non significatif

2.6 Résultats obtenus pour la saison 2007 selon les objectifs spécifiques

2.6.1 Déterminer la tension du sol où le déclenchement de l'irrigation serait optimal

Dans le cadre de cet essai, les trois régies d'irrigation n'ont pas influencé différemment le rendement vendable et le calibre des fruits. La pluviométrie, généralement bien répartie dans la saison (Annexe A), a maintenu des conditions d'humidité de sol élevées et relativement homogènes entre les différentes régies (Tableau 2). Conséquemment, les plants qui devaient être soumis à des conditions plus sèches, c'est-à-dire, les traitements où l'irrigation était déclenchée à 18 et 33 cbar, ont effectué leur croissance en condition plus humides. En d'autres termes, il est impossible de déterminer l'influence de ces trois régies sur les différents facteurs à l'étude dans ce projet.

Tableau 2. Tension moyenne de l'eau dans le sol (mensuelle et saisonnière) pour les différents traitements à l'étude, soit l'irrigation déclenchée à 5, 18 et 33 cbar (I5, I18 et I33) en interaction avec la micro-aspersion, sans (NR) et avec refroidissement (R).

| Traitement (I x R) | Tension moyenne (cbar) mensuelle et saisonnière | | | | |
|--------------------|---|------|-----------|---------|--------|
| | Juillet | Août | Septembre | Octobre | Saison |
| I5 - NR | 7,1 | 7,2 | 7,2 | 3,3 | 5,4 |
| I5 - R | 4,1 | 3,5 | 3,5 | 3,2 | 3,5 |
| I18 - NR | 4,4 | 12,1 | 12,1 | 5,2 | 7,5 |
| I18 - R | 3,7 | 3,5 | 3,5 | 9,3 | 5,0 |
| I33 - NR | 8,8 | 12,1 | 12,1 | 13,8 | 11,5 |
| I33 - R | 3,1 | 2,9 | 2,9 | 5,0 | 3,8 |

Par ailleurs, les traitements de refroidissement ont influencé l'humidité des sols. En périodes de fortes chaleurs, le système de micro-aspersion était déclenché à plusieurs reprises pendant une journée, si bien que ces apports répétés d'eau ont atteint le sol. En effet, pour une même régie d'irrigation, la tension mesurée dans le sol indiquait une humidité plus élevée pour la parcelle refroidie (Tableau 2). Toutefois, il n'y a pas d'interaction significative (n.s.) entre la régie d'irrigation et le traitement de refroidissement (I x R), ce qui signifie que les différences de rendement et de calibre du fruit observées avec le refroidissement ne sont pas dues à des conditions d'humidité de sol différente (Tableau 1).

2.6.2 Quantifier les modifications de la micro-aspersion sur le microclimat

Les 168 épisodes de micro-aspersion qui ont été recensés pour les mois de juillet et août ont été utilisés afin de quantifier les modifications du microclimat dues au refroidissement par évaporation. Des relations entre la température de l'air ambiant (TAA), le taux d'humidité relative de l'air ambiant (HRAA), la diminution maximale de température de l'air au niveau du couvert végétal (DMTACV) et le différentiel de température entre l'air au niveau du couvert végétal et celle de l'air ambiant (DTCVAA) ont été mesurées afin d'expliquer les variations observées dans l'efficacité du refroidissement par micro-aspersion.

D'abord, au tableau 3, le minimum, le maximum et la moyenne des valeurs mesurées pour les variables décrites précédemment ont été relevés. En moyenne, la diminution maximale de la température de l'air au niveau du couvert végétal lors d'une micro-aspersion (DMTACV) est de 3,8 °C, pour une diminution maximale de 6,9 °C. De plus, la différence entre la température de l'air au niveau du couvert végétal et celle de l'air ambiant (DTCVAA) lors d'un bassinage est en moyenne de 1,1 °C plus élevée.

Tableau 3. Impacts sur certaines variables mesurées lors des 168 épisodes de micro-aspersion réalisées en juillet et août.

| Variable | Min. | Max. | Moy. | Description de la variable |
|--------------|------|------|------|--|
| TAA (°C) | 18,7 | 31,7 | 24,1 | Température de l'air ambiant |
| HRAA (%) | 36,2 | 86,2 | 55,7 | Taux d'humidité relative de l'air ambiant |
| DMTACV (°C) | 1,1 | 6,9 | 3,8 | Diminution maximale de la température de l'air au niveau du couvert végétal |
| DTACVAA (°C) | -2,8 | 6,2 | 1,1 | Différentiel de température entre l'air au niveau du couvert végétal et celle de l'air ambiant |

À titre d'exemple, les trois épisodes de micro-aspersion présentés à la figure suivante (flèches noires) illustrent l'impact de ces applications sur la température de l'air au niveau du couvert végétal. Les trois courbes représentent la température de l'air au niveau du couvert végétal dans les parcelles avec et sans refroidissement ainsi que celle de la température ambiante. À la suite d'un bassinage (flèches noires), la température de l'air au niveau du couvert végétal dans les parcelles refroidies (ligne pointillée) diminue pour se rapprocher de la température de l'air ambiant (ligne la plus basse).

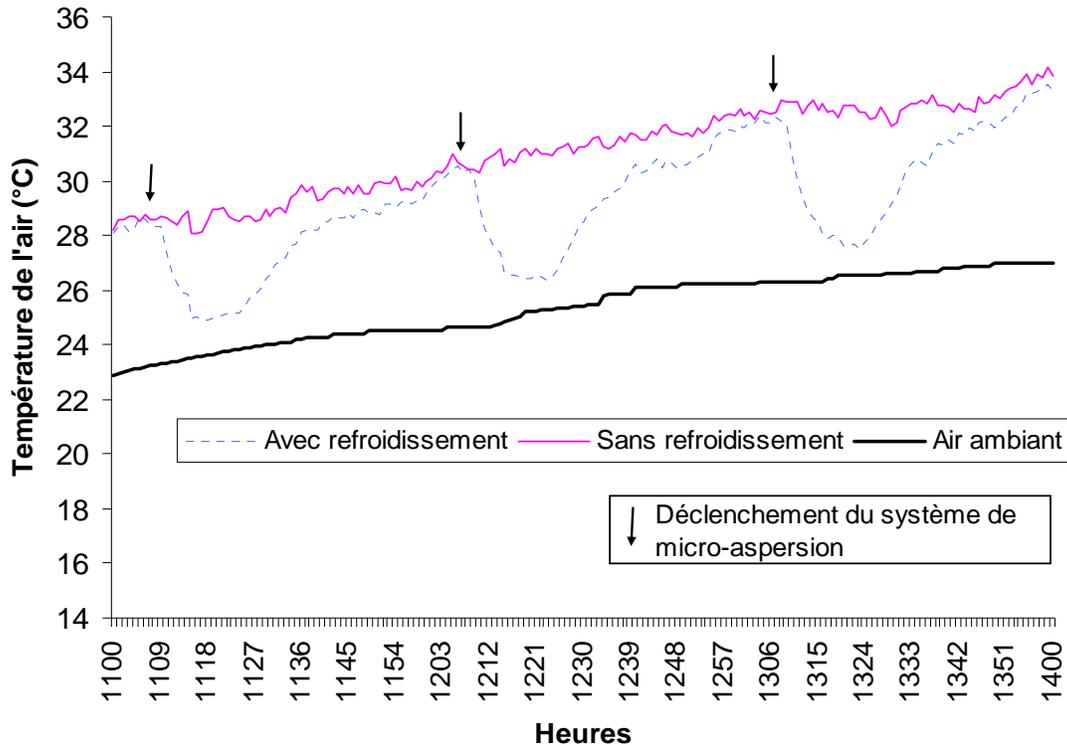


Figure 2. Température (°C) enregistrée au niveau du couvert végétal à 10 cm du sol dans les parcelles avec et sans refroidissement et à 1,5 m du sol (air ambiant) le 23 juillet 2007 entre 11 h et 14 h.

Maintenant, en ce qui a trait à l'intensité de la relation pouvant exister entre deux variables ou coefficient de corrélation, elle a été calculée pour certaines d'entre elles. Ce coefficient est de 53 %, en ce qui a trait à la relation entre l'humidité relative de l'air ambiant (HRAA) et la diminution maximale de la température de l'air au niveau du couvert végétal (DMTACV) (Tableau 4 et Figure 3). En d'autres termes, au fur et à mesure que le taux d'humidité relative de l'air ambiant augmente, l'efficacité de la micro-aspersion diminue et cette baisse d'efficacité est expliquée en partie (54 %) par le taux d'humidité relative dans l'air ambiant.

Tableau 4. Coefficient de corrélation entre les variables à l'étude.

| | TAA | | HRAA | |
|---------------|-----------------------------|------|-----------------------------|-----|
| | Coefficient corrélation (%) | | Coefficient corrélation (%) | |
| DMTCV | -3,5 | n.s. | -52,9 | *** |
| DTCVAA | -51,0 | *** | 44,0 | *** |

*** Significatif au seuil 0,001

n.s. : Non significatif

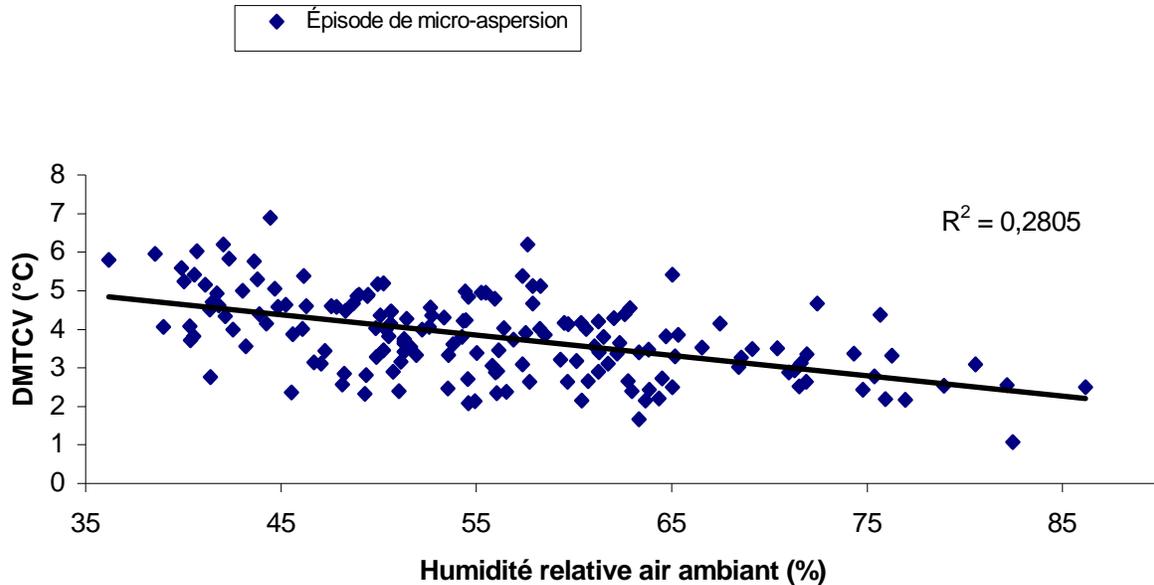


Figure 3. Relation entre la diminution maximale de température de l'air au niveau du couvert végétal (DMTCV) et le taux d'humidité relative de l'air ambiant (HRAA).

Il existe aussi une relation entre le taux d'humidité relative de l'air ambiant (HRAA) et l'ordre de grandeur comprise entre la température minimale de l'air au niveau du couvert végétal et celle de l'air ambiant lors d'un baignage (Tableau 4 et Figure 4). En effet, plus le taux d'humidité relative de l'air ambiant (HRAA) est élevé, plus la température minimale de l'air au niveau du couvert végétal lors d'un baignage est élevée par rapport à celle de l'air ambiant. Le coefficient de corrélation entre ces deux variables étant de 44 %.

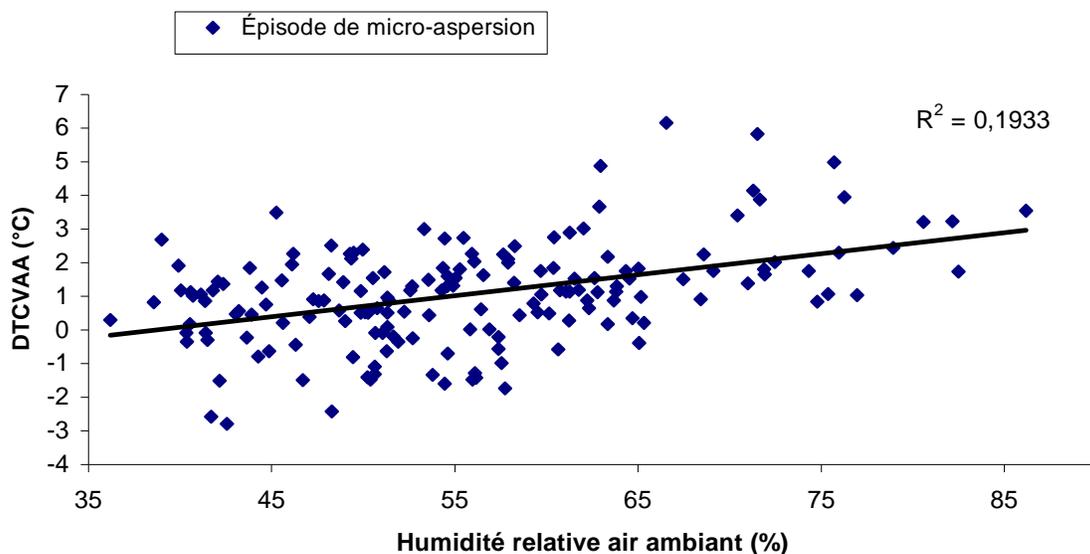


Figure 4. Relation entre le différentiel de température entre l’air au niveau du couvert végétal et celle de l’air ambiant (DTCVAA) et le taux d’humidité relative de l’air ambiant (HRAA).

La température de l’air ambiant n’influence pas (n.s.) l’efficacité d’un bassinage (Tableau 4). Toutefois, le coefficient de corrélation entre la diminution maximale de la température de l’air au niveau du couvert végétal (DTCVAA) et la température de l’air ambiant (TAA) est de 51 %, il y a donc une relation entre l’augmentation de la TAA et une DTCVAA supérieure à celle de l’air ambiant (Figure 5).

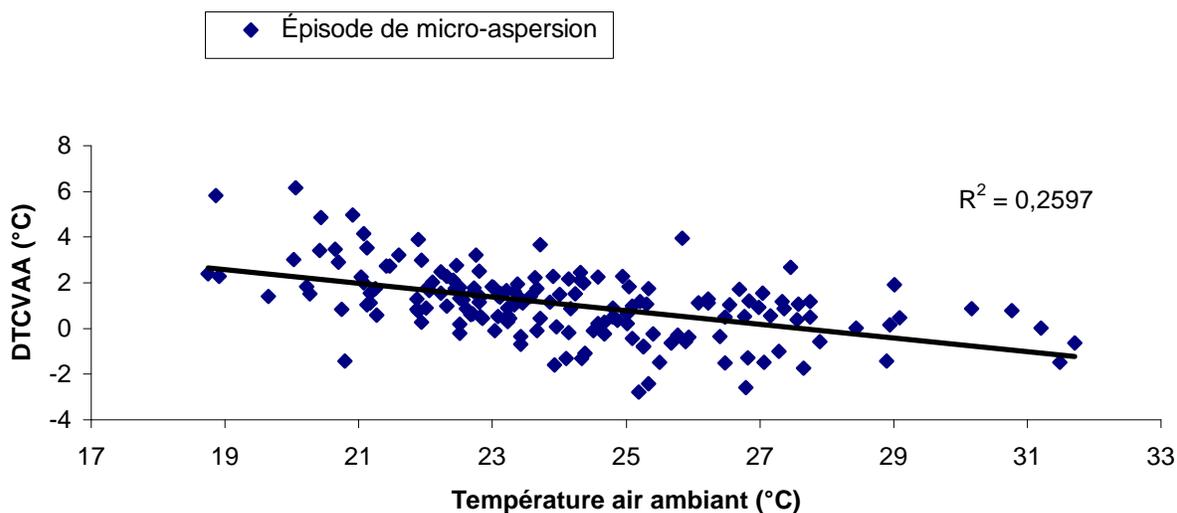


Figure 5. Relation entre le différentiel de température entre l’air au niveau du couvert végétal et celle de l’air ambiant (DTCVAA) et la température de l’air ambiant (TAA).

D'autres facteurs peuvent expliquer les variations dans l'efficacité du refroidissement. En effet, la vélocité des vents au moment où la micro-aspersion a été déclenchée peut augmenter l'efficacité de la technique. L'efficacité a probablement été influencée par le taux de couverture du couvert végétal. La surface du paillis de plastique qui est recouverte par le couvert végétal augmente tout au long de la saison. Conséquemment, l'impact du paillis sur le réchauffement du sol, de l'air et de la plante diminue. Aussi, le volume d'eau qui atteint le paillis diminue, ce qui permet à un plus grand volume d'eau de demeurer plus longtemps, car l'eau s'évapore moins rapidement lorsqu'elle est sur les feuilles.

2.6.3 Évaluer l'efficacité de la régulation thermique sur les rendements en fruits

2.6.4 Évaluer l'intensité ou la durée de stress thermique qui pourrait induire l'inhibition de la formation de l'inflorescence chez le fraisier

La figure 6 présente le calibre des fruits vendables selon la période de récolte. Pour les deux périodes de récoltes comprises entre le 31 juillet jusqu'au 27 août, le calibre des fruits récoltés dans les parcelles refroidies était significativement plus élevé, soient respectivement 18,3 et 15,9 g dans les parcelles refroidies et 17,0 et 13,8 g pour les fruits récoltés dans les parcelles sans refroidissement. Selon Galletta et Himelrick (1990), il peut s'écouler entre 20 et 50 jours entre la pollinisation et le fruit mûr. En effet, le mûrissement des fruits est plus rapide durant les mois de juillet et août qu'en septembre et octobre.

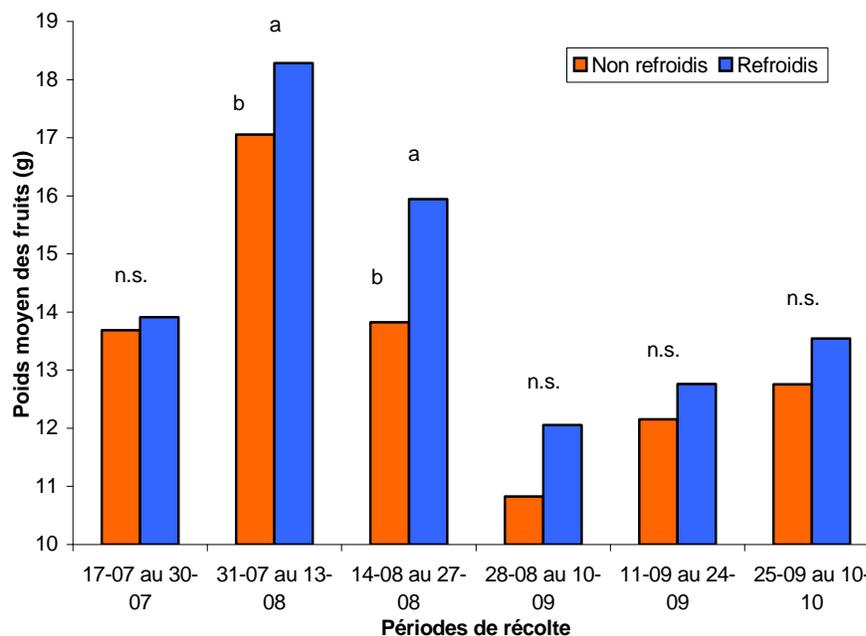


Figure 6. Poids moyen des fruits vendables (g) selon la période de récolte.

En formulant l'hypothèse que 20 à 25 jours étaient nécessaires entre la pollinisation et le mûrissement pour les fruits récoltés durant la période comprise entre le 31 juillet jusqu'au 27 août, il est possible d'expliquer les résultats observés. En effet, la formation et le grossissement de ces fruits se sont effectués durant le seul épisode prolongé de chaleur de la saison. Les fruits d'un plant subissant un stress devraient mûrir plus rapidement au détriment du grossissement. La température de l'air ambiant et celle au niveau du couvert végétal sont présentées pour les mois de juillet et août aux figures 7 et 8 ; afin d'alléger les figures, seules les températures excédant 25 °C sont présentées.

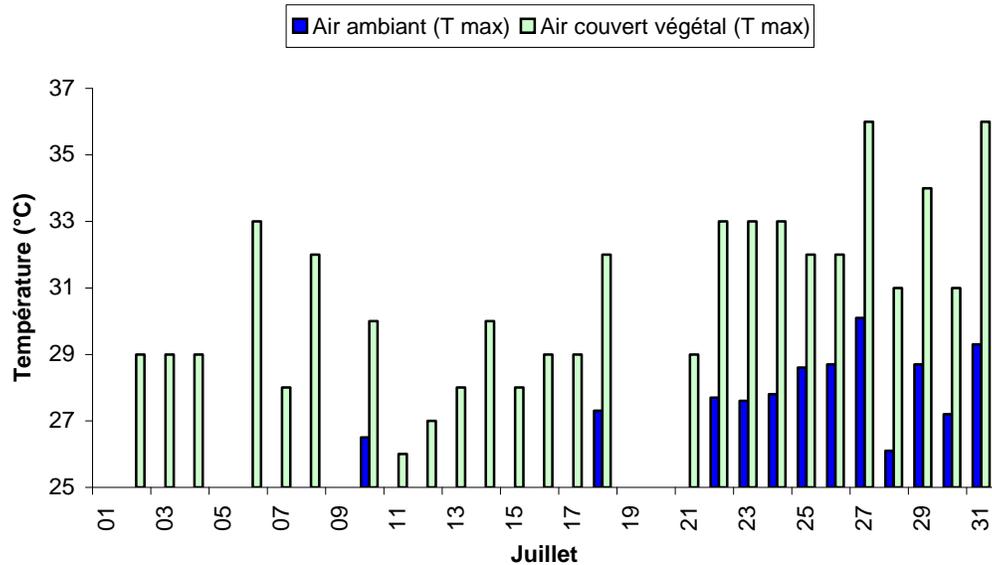


Figure 7. Températures maximales journalières (°C) de l'air ambiant et de l'air au niveau du couvert végétal pour le mois de juillet 2007.

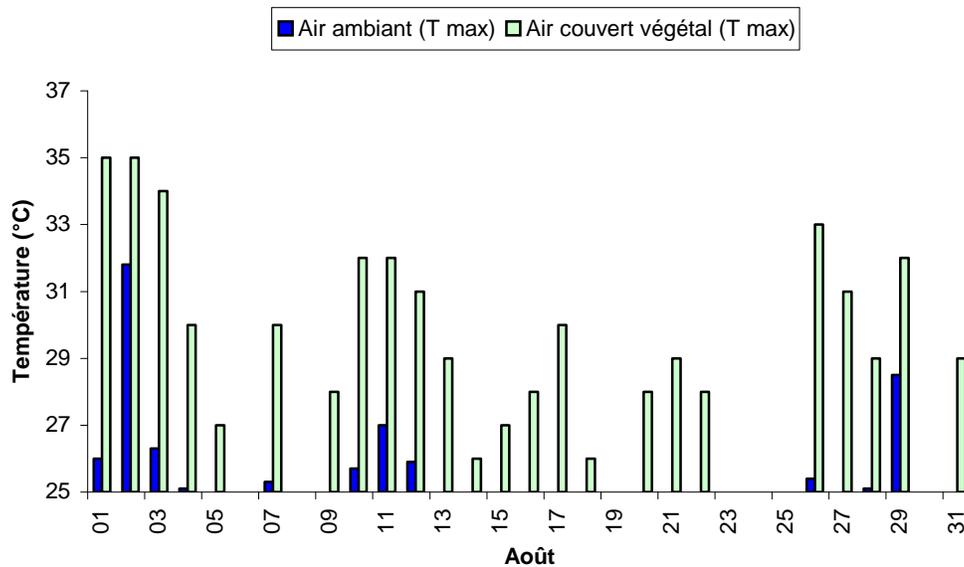


Figure 8. Températures maximales journalières (°C) de l'air ambiant et de l'air au niveau du couvert végétal pour le mois d'août 2007.

Le rendement en fruits vendables est présenté à la figure 9. Dans un premier temps, le rendement obtenu dans les parcelles sans refroidissement a été significativement supérieur pour la 2^e période de récolte, soit du 31 juillet au 13 août. Ces résultats peuvent s'expliquer, du fait que les plants non refroidis ont subi davantage de stress que les plants refroidis. En effet, durant cette période où le calibre des fruits était plus petit, il y avait davantage de fruits à récolter, car les fruits ont mûri plus rapidement, tandis que le grossissement des fruits se poursuivait dans les parcelles refroidies.

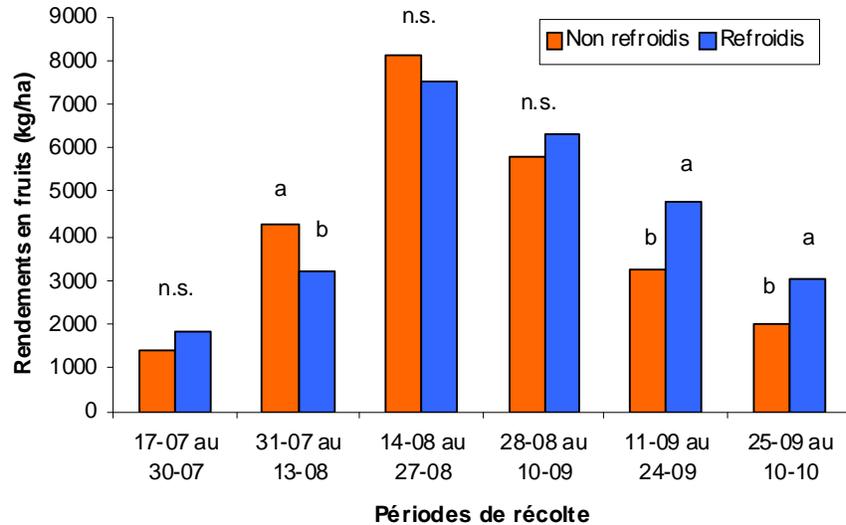


Figure 9. Rendement en fruits vendables (kg/ha) selon la période de récolte.

Il faut attendre jusqu'aux récoltes comprises entre le 11 septembre et le 10 octobre pour mesurer une différence significative favorable aux parcelles refroidies. Le rendement a été supérieur pour les deux dernières périodes, soit respectivement un rendement à l'hectare de 4 798 et 3 052 kg, comparativement à un rendement de 3 244 et 2 011 kg pour les parcelles sans refroidissement (Figure 9). Aussi, les rendements vendables cumulés pour la saison sont de 24 904 kg/ha pour les parcelles sans refroidissement et de 26 707 kg/ha pour celles refroidies ($p=0,0695$).

Selon Pritts et Handley (1998), la floraison a lieu environ 42 jours après l'initiation florale. En formulant l'hypothèse, appuyée par la littérature, que la période comprise entre le début et la fin du mois de juillet correspond à l'initiation des inflorescences qui ont produit les fruits récoltés durant la 5^e et 6^e périodes (11 septembre au 10 octobre), il est possible d'expliquer ces résultats. En effet, l'initiation florale aurait eu lieu lors de la période de chaleur (Figure 7) où la température de l'air au niveau du couvert végétal a atteint plus de 36 °C.

2.6.5 Évaluer l'impact phytosanitaire de la micro-aspersion sur le fraisier

D'abord, il est important de mentionner que les traitements phytosanitaires ont été réalisés sans tenir compte des traitements de refroidissement. Des fruits atteints d'antracnose et de botrytis ont été observés, mais l'intensité de ces maladies n'était pas problématique et leur répartition dans le champ n'était pas reliée aux différents traitements (Tableau 5).

Tableau 5. Analyse de la variance des données relatives au rendement vendable et au poids moyen du fruit vendable.

| Traitement | d.l. | Variable mesurée | |
|------------|------|------------------|------------------|
| | | Antracnose | Moisissure grise |
| I | 2 | n.s. | n.s. |
| R | 1 | n.s. | n.s. |
| I x R | 2 | n.s. | n.s. |

n.s. Non significatif

2.7 Analyse des résultats obtenus pour l'ensemble du projet

2.7.1 Retour sur la saison 2006

La saison 2006 a permis d'acquérir les connaissances et l'expérience nécessaires à la poursuite du projet. Cette technique est nouvelle et certains problèmes sont survenus durant la saison. Certains ajustements ont permis de poursuivre, avec succès, le projet en 2007.

Les tendances observées à la première année d'essais semblaient indiquer qu'il était possible d'augmenter les rendements en fruits dans la fraise à jours neutres (cv 'Seascape') en intervenant de sorte à diminuer la température du couvert végétal. Toutefois, compte tenu des difficultés inhérentes au dépérissement des plants, il était difficile d'interpréter les résultats tant pour le volet refroidissement que pour celui de l'irrigation. Cette problématique s'était répercutée sur la validité des résultats obtenus, de par l'impossibilité de discriminer du reste des traitements, l'impact de ce dépérissement sur les rendements en fruits.

2.7.2 Éléments qui ont assuré la réussite du projet

- L'implication financière des organismes et partenaires participant au projet
- L'expérience et la qualité des intervenants concernés
- L'appui du milieu
- La rigueur du protocole
- Les connaissances et l'expérience acquise la 1^{re} année du projet

2.7.3 Biens livrés

- 1 rapport partiel
- 1 rapport final
- 1 revue de littérature
- 2 fiches techniques
- 1 journée champ
- 2 conférences et 2 textes de conférence

3 IMPACT

3.1 Impact sur le secteur

Un premier impact d'ordre environnemental découle du fait qu'en diminuant les facteurs de stress pouvant affecter une plante, cette dernière utilise plus efficacement les ressources dont elle dispose. En effet, pour une même quantité de fertilisant, les fraisiers qui ont été refroidis ont produit davantage de fruits vendables et de calibre plus gros, que les fraisiers non refroidis.

La démonstration de l'efficacité de la micro-aspersion pour diminuer la température de l'air dans le couvert végétal sous-entend qu'il est possible d'intervenir efficacement pour diminuer l'impact possible et réel du stress thermique sur la productivité du fraisier.

L'impact d'un gain en rendement et en calibre des fruits vendables se mesure économiquement. Des fraises de calibre plus élevé vont se cueillir plus facilement et sont possiblement plus attrayantes pour le consommateur. Les gains en rendement observés pour le dernier mois de récolte se répercutent directement sur le revenu de l'entreprise (Figure 9). En effet, les 2 595 kg/ha de plus obtenus avec le refroidissement entraînent des revenus supplémentaires d'environ 7 400 \$/ha^a pour une production écoulee sur le marché de gros.

Enfin, ce projet aura un impact sur d'éventuels projets de recherche portant sur le contrôle de la température d'un couvert végétal par refroidissement évaporatif en mettant à profit les connaissances qui y ont été acquises.

3.2 Pérennité du projet

De par la nature du projet, la pérennité de ce dernier sera assurée par les différents documents qui ont été produits et par les intervenants qui y ont participé. Le rapport final et la fiche technique, disponibles sur le Web et accessibles aux intervenants qui ont participé à ce projet permettront d'assurer la pérennité des connaissances et de l'expérience acquise. De plus, ce projet servira de référence à d'autres initiatives de la sorte.

^a Boîte de 10 lb vendue à un prix moyen de 13\$

3.3 Diffusion des résultats

Mai 2006

Informations sur le projet disponible sur le site Web de l'IRDA

Décembre 2006

Fiche technique « Irrigation et refroidissement du couvert végétal de la fraise à jours neutres »
Distribuée au kiosque de l'IRDA lors des Journées horticoles 2006, Saint-Rémi
Disponible sur le site Web de l'IRDA

6 septembre 2007

Journée champ « Refroidissement du feuillage du fraisier à jours neutres par micro-aspersion »
Tournée de projets horticoles Direction régionale de la Capitale-Nationale du MAPAQ
50 participants

6 décembre 2007

Conférence et texte de conférence « Refroidissement du couvert végétal de la fraise à jours neutres par micro-aspersion »
Les Journées horticoles, Saint-Rémi
140 participants

Texte de conférence disponible sur le site Web d'Agri-Réseau
www.agrireseau.qc.ca/petitsfruits/documents/Refroidissement.pdf

13 février 2008

Conférence et texte de conférence « Refroidissement du couvert végétal de la fraise à jours neutres par micro-aspersion »
La Semaine horticole, Boucherville
60 participants
PowerPoint de la conférence disponible sur le site Web d'Agri-Réseau
www.agrireseau.qc.ca/petitsfruits/documents/Boivin_Carl_fraise.pdf

Mai 2008

Fiche technique
Disponible en ligne sur le site Web de l'IRDA
<http://www.irda.qc.ca/documents/Results/163.pdf>

Au courant de l'année 2008

Un article vulgarisé devrait être produit sous peu.

4 REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier messieurs Guy et Daniel Pouliot de la Ferme Onésime Pouliot inc., madame Stéphanie Tellier, messieurs Bruno Gosselin et Jean Noreau du MAPAQ et Patrice Thibault du RLIO pour leur collaboration au projet. Nos remerciements s'adressent également à madame Michèle Grenier de l'IRDA.

Enfin, nous désirons remercier le Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ) pour avoir contribué au financement du projet par le biais du programme Défi-solution et du Programme national d'approvisionnement en eau Canada-Québec (PAECQ) d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) et du Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ).

5 RÉFÉRENCES

Galletta, J. et D.G. Himelrick. 1990. Small fruit crop management. New Jersey, Prentice-Hall. 602 pp.

Pritts, M.P. et D. Handley. 1998. Strawberry production guide: For the northeast, Midwest, and eastern Canada, Vol. 88. NRAES. 162 pp.

6 PLAN DE FINANCEMENT ET CONCILIATION DES DÉPENSES

Cette section sera complétée et envoyée par le Syndicat de l'UPA de l'île d'Orléans.

ANNEXE A. Pluviométrie

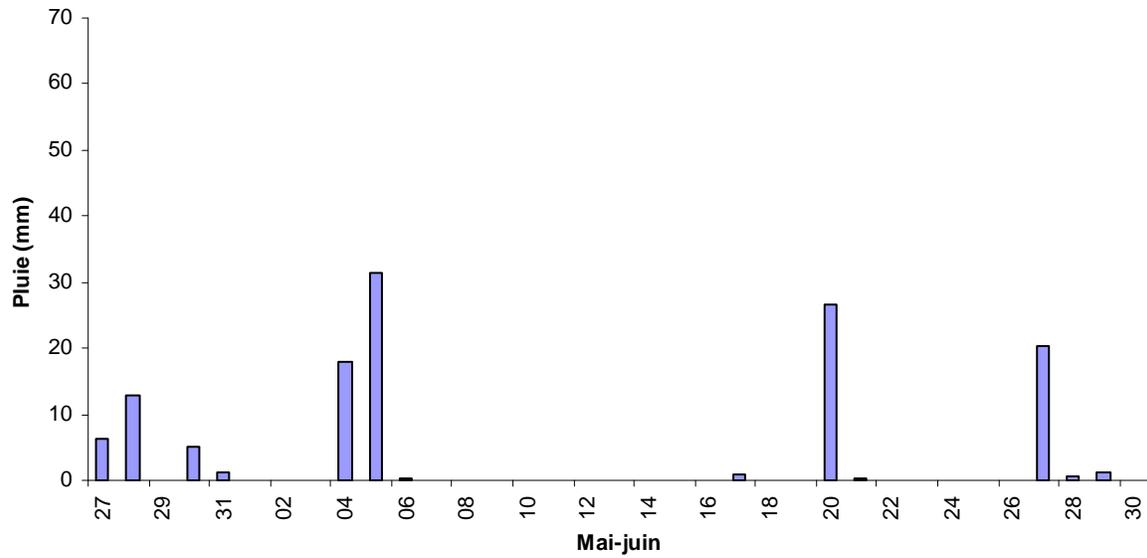


Figure 10. Pluviométrie mesurée sur le site expérimental du 27 mai au 30 juin 2007.

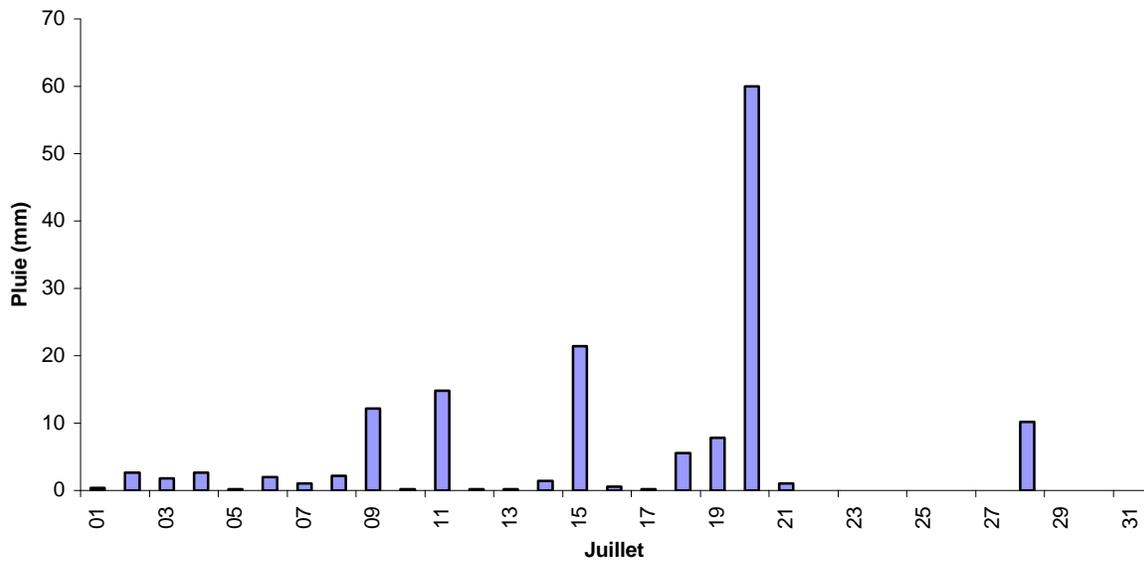


Figure 11. Pluviométrie mesurée sur le site expérimental pour le mois de juillet 2007.

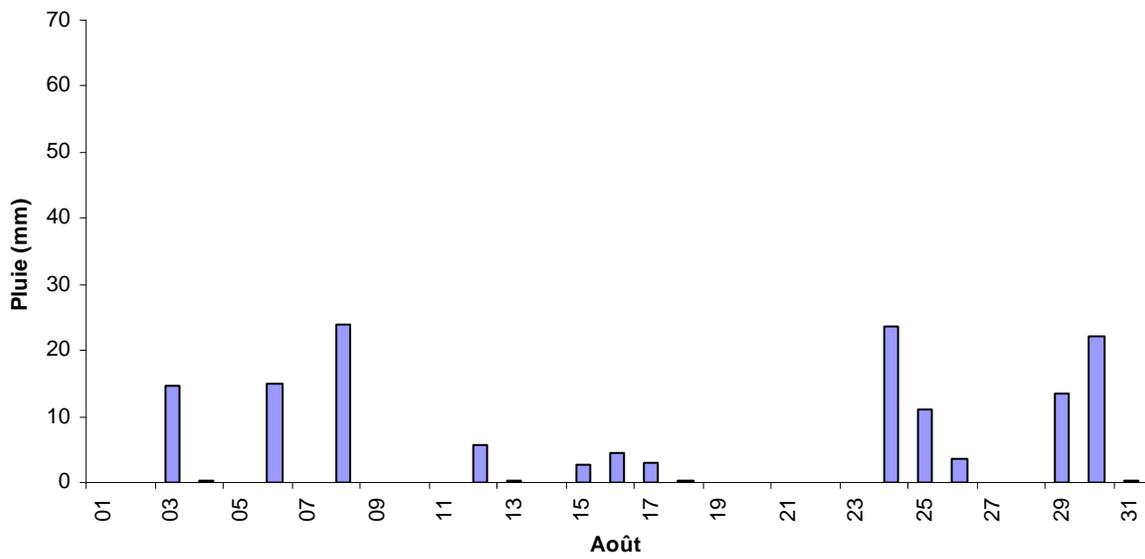


Figure 12. Pluviométrie mesurée sur le site expérimental pour le mois d'août 2007.

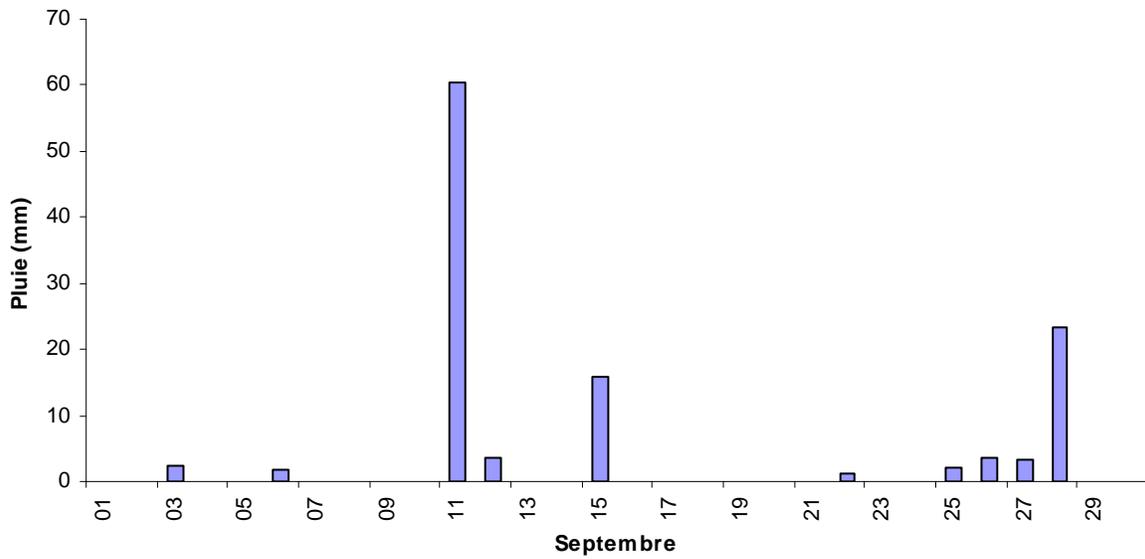


Figure 13. Pluviométrie mesurée sur le site expérimental pour le mois de septembre 2007.

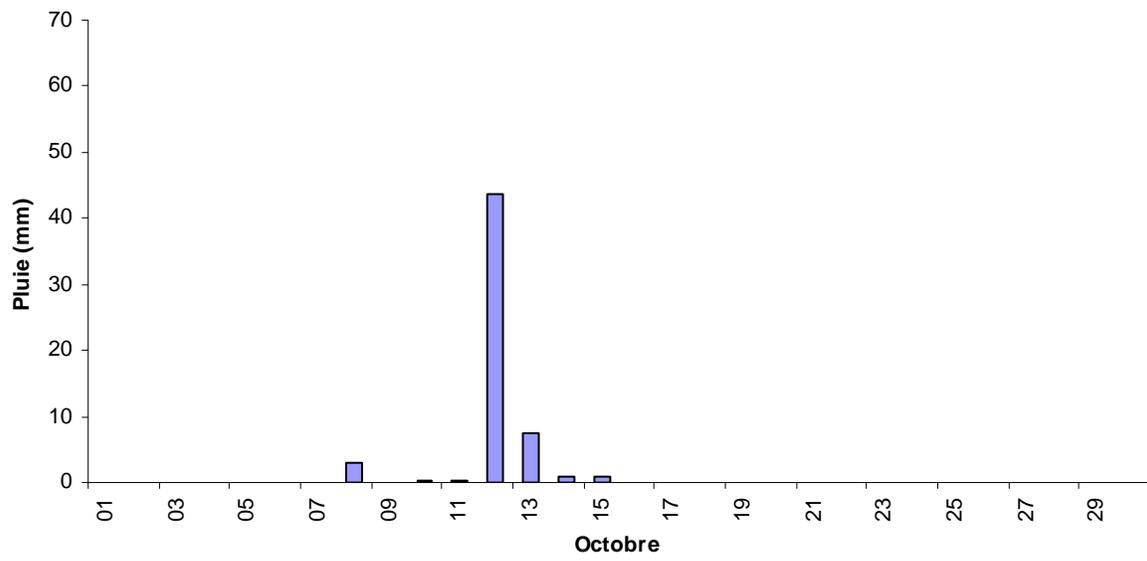


Figure 14. Pluviométrie mesurée sur le site expérimental pour le mois d'octobre 2007.

ANNEXE B. Photos



Figure 15. Système utilisé pour la micro-aspersion.



Figure 16. Valves électriques permettant de contrôler l'irrigation et la micro-aspersion.

ANNEXE C. Revue de littérature

Cette revue de littérature a été réalisée par madame Julie Bouchard dans le cadre du cours « Sujets spéciaux – BVG-62185 » suivi à l'Université Laval à l'automne 2007.

Résumé

Des températures élevées peuvent causer chez les plantes un stress thermique. Ces conditions conduisent à des pertes de rendements, une qualité de fruit inférieure et même, la mort du plant. Les stress dus aux températures élevées peuvent être alors atténués par l'aspersion ou la micro-aspersion. L'utilisation de l'eau pour l'aspersion permettra le refroidissement des organes incommodés par la chaleur. Ce mécanisme est appelé le refroidissement végétatif par évaporation. Le refroidissement végétatif a entre autre des effets sur la température du couvert végétal et peut permettre d'abaisser la température de l'air d'un verger de 4-9°C, tandis que l'humidité relative augmente de 25-50%. De la même façon, la méthode du refroidissement par évaporation diminue la température des feuilles et des bourgeons tel que démontrées par plusieurs études sur le gingembre, le raisin, la pomme et la prune. La diminution de la température des fruits, par l'utilisation de l'aspersion ou de la micro-aspersion, améliore aussi la qualité de ceux-ci entre autre en augmentant le calibre et en améliorant la couleur et ce, dans la culture des pommes, des poires, des fraises et des raisins. Le potentiel de l'aspersion pour réduire la durée du stress thermique est discuté en regard des effets qu'elle produit sur les différentes parties d'une plante.

Introduction

L'eau disponible dans les plants et les fruits joue un rôle crucial pour réguler la température de ceux-ci. Il est reconnu qu'un excès ou un déficit en eau peut causer différents problèmes dans une culture, comme une perte de rendement et/ou de qualité du fruit (Sneed et collab. 1988). L'étendue des dommages dépendra du types de culture, de la sévérité et de la durée de l'excès ou du déficit en eau, du stade phénologique de la plante, ainsi que des conditions environnementales, telles que la température, la vitesse du vent et l'humidité relative (Sneed et collab. 1988). Il est donc essentiel de maintenir un équilibre entre l'absorption en eau par la plante et son taux de transpiration, qui seront influencés par les conditions ambiantes.

Lors d'une journée avec un faible taux d'humidité, une température élevée et un fort ensoleillement, une plus grande quantité d'eau est perdue par transpiration que celle remplacée par le système racinaire. La plante réagira aux stress thermiques en réduisant son taux de transpiration en fermant ses stomates, et il pourra en résulter des pertes de rendements, une qualité de fruit inférieur et même, la mort du plant (Chesness et Braud, 1970). Les stress dus aux températures élevées peuvent être alors atténués par l'aspersion ou la micro-aspersion.

Il existe plusieurs mécanismes de refroidissement utilisant l'eau afin de réduire la température d'une culture. Le plus efficace est l'application de l'eau directement sur les feuilles et les fruits, qui, en s'évaporant, extraira la chaleur de l'organe végétal (Evans, 2004). Ce mécanisme est appelé le refroidissement par évaporation.

L'objectif de ce travail est de démontré l'utilité du refroidissement végétatif par évaporation pour les productions fruitières et maraîchères. Avant d'en expliquer le principe et les utilités, il est important de connaître le type de métabolisme de la culture (C_3 , C_4 ou CAM.), puisque celui-ci définira les capacités de la plante à résister à des conditions de stress, telles des hausses de températures. De plus, il sera mention de quelle façon le facteur température agit sur le développement et la croissance de la plante, entre autre dans la culture de la fraise. Par la suite, le mécanisme du refroidissement par évaporation sera abordé, suivi des effets de celui-ci sur la température du couvert végétal (effets sur l'air, les feuilles, les fruits et les bourgeons), sur la qualité des fruits et sur le rendement.

Revue bibliographique

1 Métabolisme en C₃, C₄ ou CAM (Michaud, 2006; Raven et collab. 2000)

La photosynthèse comporte deux suites de réactions, une phase dépendante de la lumière (phase claire) où l'énergie lumineuse est convertie en énergie chimique dans une molécule relais = ATP et une phase non photochimique (phase sombre) où l'énergie convertie sert à transformer le dioxyde de carbone (CO₂) en sucres. Les réactions qui permettent la transformation du CO₂ en sucre forment une suite de réactions appelée cycle de Calvin. Ce cycle existe chez toutes les plantes photosynthétisantes, et la première molécule formée est un acide organique à trois carbones, l'acide-3-phosphoglycérique, d'où le nom de plante en C₃ pour les plantes qui ne font que le cycle de Calvin. Le blé, le seigle, l'avoine, la carotte, la pomme de terre, la fraise et le riz sont des exemples de cultures ayant un métabolisme en C₃.

Les plantes C₄, avant les réactions du cycle de Calvin, effectuent une "préfixation" du CO₂ sur un acide organique à trois carbones et le transforment en un acide organique à quatre carbones (souvent l'oxaloacétate, retransformé ensuite en malate), d'où le nom de plante en C₄. Cet acide est transféré des parties externes de la feuille vers les parties plus internes et est alors retransformé en acide organique (pyruvate) de départ, relibérant un CO₂ qui est utilisé par le cycle de Calvin. L'intérêt est que les enzymes des plantes en C₄ travaillent avec des pressions partielles en CO₂ plus faibles que celles nécessaires aux enzymes du cycle de Calvin. Ainsi, la plante ouvre moins ses stomates, mais fixe quand même du CO₂ qui est concentré vers les zones plus internes. Le maïs, le sorgho et la canne à sucre sont des exemples de plantes en C₄.

Les plantes CAM (Métabolisme Acide Crassulacéen ou en anglais, Crassulacean Acid Metabolism) utilisent un principe un peu comparable, mais différencié dans le temps. La nuit, les stomates sont ouverts à l'entrée du CO₂, puis il y a fixation du CO₂ sur un acide en C₃ qui devient un acide organique en C₄. Le jour, les stomates sont fermés (plus d'alimentation en CO₂), et c'est alors que la phase photochimique de la photosynthèse donne l'énergie nécessaire au cycle de Calvin, cycle qui utilise la retransformation de l'acide en C₄ qui redonne un acide en C₃ + CO₂. Une plante CAM peut être vue comme une plante C₄ différée dans le temps (jour / nuit). La culture la plus connue ayant un métabolisme CAM est l'ananas. Il existe aussi certains types de fougères, ainsi que plusieurs familles de plantes grasses (Crassulacées, Cactaceae, Cucurbitaceae, Liliaceae, Orchidaceae).

2 Réponses et adaptation au stress thermique

(Michaud, 2006; Raven et collab. 2000)

Toutes les plantes sont soumises plusieurs fois au cours de leur développement à des conditions environnementales défavorables causées par des facteurs abiotiques (éléments inertes) ou par des facteurs biotiques (organismes vivants). Parmi les conditions de stress les plus fréquentes, on peut noter un manque d'oxygène, le rayonnement UV, la présence d'organismes phytopathogènes, des prédateurs ou des parasites, un manque d'eau ou d'éléments nutritifs, ainsi que des températures froides ou trop élevées. Face à ces conditions, certaines plantes ont su développer avec le temps des mécanismes de défense afin de mieux répondre aux stress. Ces mécanismes peuvent avoir une nature physiologique telle qu'une accoutumance ou une tolérance au stress, une nature chimique (toxines, hydrolases, etc.) ou une nature physique comme la création de 'barrières', par exemple, lorsque la plante réagit à un stress hydrique ou thermique en fermant ses stomates afin de réduire le taux de transpiration. D'ailleurs, le premier rôle des stomates selon Jones et Sutherland (1991) serait d'éviter les dommages dus à un déficit en eau chez la plante. Une autre des fonctions importantes des stomates est de contrôler la transpiration de la feuille afin de maintenir sa température à l'intérieur d'un intervalle optimal (Jones, 1998).

Pour ce qui est des stress causés par des températures extrêmes, les plantes ont développé des mécanismes afin de leur résister. La plupart des végétaux ne peuvent survivre à des températures de 45°C et plus pendant une longue période. Par contre, certaines plantes de type CAM sont assez bien adaptées pour survivre à des températures de 60°C. Les plantes CAM gardent leurs stomates fermés durant la journée, ce qui retarde la perte d'eau dans des conditions de hautes intensités lumineuses et de stress hydrique. Il existe aussi d'autres exemples d'adaptations physiologiques et anatomiques développées par les plantes afin de minimiser les impacts négatifs des températures élevées et maximiser les pertes de chaleur : développement de poils réfléchissants ou accumulation de cires à la surface des feuilles, croissance verticale des feuilles, développement des feuilles hautement découpées.

Les températures journalières optimales varient beaucoup d'une région à l'autre, ou même s'un site à l'autre à l'intérieur d'une même région. Les espèces cultivées en champ vont montrer une croissance et un développement qui sont optimaux lorsque les conditions de températures seront les plus souvent favorables pour permettre la photosynthèse et la respiration. Le ratio photosynthèse/respiration variera selon le type d'espèces cultivées et l'intervalle de température pour lequel ce ratio sera optimal diffère aussi. La figure 1 présente la relation entre les taux de photosynthèse et de respiration sous différentes températures. À des températures au-dessous du point A et au-dessus du point D, le taux de photosynthèse est inférieur à la respiration, ce qui résulte en un bilan énergétique négatif et en une perte de poids de la plante. À des températures intermédiaires, le taux de photosynthèse est supérieur et permet une croissance directe de la plante. Parmi ces températures, celles situés entre les points A et B sont au-dessous de l'optimum, alors que celles situées entre C et D sont au-dessus de l'optimum. Les températures se situant entre les points B et C, pour lesquelles la différence entre les taux de photosynthèse et de respiration est maximale, représentent les températures optimales de la plante pour sa croissance (Michaud, 2006).

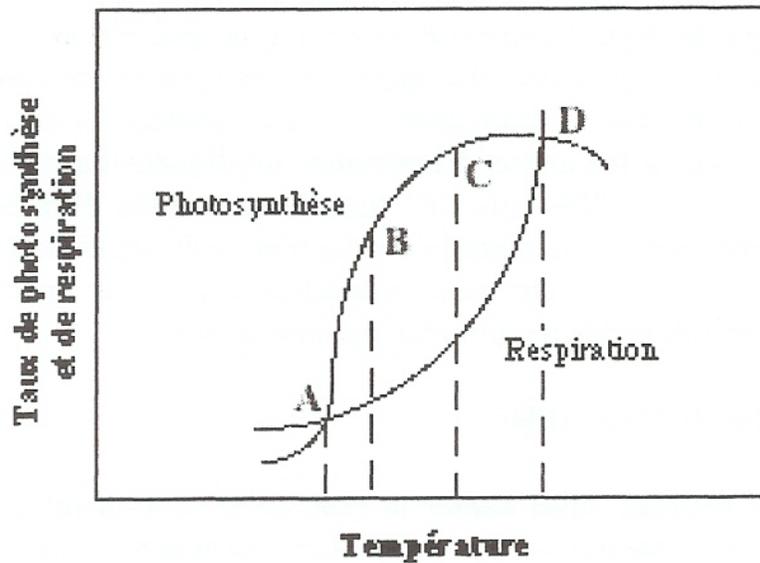


Figure 1. Relation entre les taux de photosynthèse et de respiration sous différentes températures. Adaptée des notes de cours ‘Physiologie végétale’, D. Michaud, 2006.

En résumé, les plantes cultivées peuvent être séparées en trois catégories en fonction du spectre de température optimales pour leur développement : les plantes à températures nocturnes optimales fraîches (7-13°C), les plantes à températures nocturnes optimales modérées (13-18°C) et les plantes à températures nocturnes optimales élevées (18-24°C) (tabl. 1). Les rendements obtenus lors de la récolte sont affectés par tous les facteurs qui ont un effet direct ou indirect sur la photosynthèse et sur la respiration. Un des facteurs limitants et déterminants du rendement photosynthétique est justement la température ambiante.

Tableau 1. Quelques espèces horticoles de climat frais ou de climat plus chaud. Les températures notées entre parenthèses correspondent aux températures nocturnes optimales. Adapté des notes de cours ‘Physiologie végétale’, D. Michaud, 2006.

| Espèces | |
|--------------------------------------|--|
| ...de climat frais (7-13°C) | Pomme, poire, prune, bleuet, cerise, fraise, framboise, canneberge, asperge, rhubarbe, pois, épinard, laitue, choux, pomme de terre, rutabaga, carotte |
| ...de climat intermédiaire (13-18°C) | Pêche, abricot, raisin, figue, mûre, tomate, poivron, fève, aubergine, concombre |
| ...de climat chaud (18-24°C) | Banane, agrumes, noix du Brésil, cacao, noix s’acajou, café, datte, figue, olive, patate douce, maïs |

2.1 Cas de la culture de la fraise

Le portrait agricole du Québec concernant les cultures maraîchères et fruitières comprend la plupart des espèces de climat frais et intermédiaire vu les conditions climatiques qui prévalent. Par contre, il est aussi fréquent de rencontrer des températures plus élevées que la moyenne pendant les jours d'été. D'ailleurs, les dommages causés par des températures trop élevées, telle que la diminution de la croissance des plants sont bien connus dans plusieurs cultures, dont la tomate (Adams et collab. 2001), la vigne (Chaumont et collab. 1997) et la fraise (Renquis et collab. 1983).

Ainsi, des cultures comme la fraise peuvent parfois faire face à des stress thermiques causés par la chaleur, ce qui représente un des problèmes à surmonter dans cette production. En plus d'affecter la croissance et la qualité des fruits, les températures élevées atteignent le système reproducteur, ainsi que la photosynthèse qui est très sensible à une élévation de température (Henning et Brown, 1986; Paulsen, 1994). Chez la fraise, des températures élevées affectent de façon négatives la croissance végétative du plant, la croissance des racines, l'initiation des fruits, la viabilité du pollen, le poids des fruits, ainsi que la qualité de ceux-ci (Kadir et collab. 2006). Par contre, certains cultivars de fraise seraient résistants aux hautes températures et seraient habilités à maintenir leur taux de photosynthèse, à stabiliser les protéines et à en synthétiser des nouvelles (Gulen et Eris, 2004). Par ailleurs, Hellman et Travis (1988) ont établi que le seuil critique de température pour la croissance d'un fraisier se situe entre 35°C et 40°C et qu'une exposition à des température de 40°C pendant trois jours auraient des conséquences sur le développement du plant.

Kadir et collab. (2006) ont évalué les effets de températures basses (20/15°C; jour/nuit), modérées (30/25°C) et élevées (40/35°C) sur les caractéristiques physiques et la productivité de deux cultivars de fraise, 'Chandler' et 'Sweet Charlie'. La figure 2 (page suivante) présente la variation de la température et le taux de transpiration des feuilles des deux cultivars lorsqu'elles sont exposées à 40/35°C. On remarque que la température des feuilles augmente après une semaine d'exposition à 40/35°C et ce, pour les deux cultivars, avec une moyenne de 39,4°C. Par ailleurs, la température de la feuille de 'Chandler' reste constante pour le reste de l'expérience avec une moyenne de 38,5°C, tandis que 'Sweet Charlie' augmente sa température foliaire de 2,1°C. Pour ce qui est du taux de transpiration, on observe une diminution après deux ou trois semaines pour les cultivars 'Chandler' et 'Sweet Charlie', respectivement. 'Chandler' montre un taux de transpiration constant pendant le deux premières semaines, mais diminue par après d'une moyenne de 16%. Cette diminution est similaire à celle observée pour la conductance stomatique (données non présentées) qui est un indicateur du niveau de transpiration. La variation de la conductance stomatique est dictée par l'ouverture et la fermeture des stomates. La température foliaire varie avec la transpiration foliaire, par conséquent c'est une fonction de la conductance stomatique. Ainsi, la fermeture des stomates entraîne une réduction de la conductance stomatique et de la photosynthèse, et une augmentation de la température de la feuille (Kotchi, 2004).

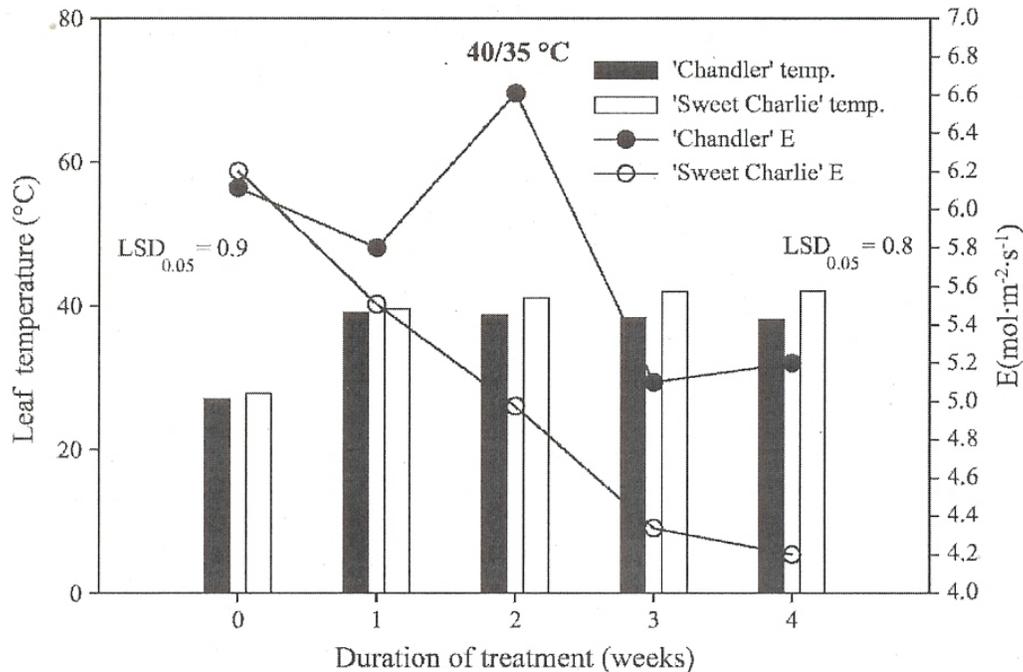


Figure 2. Effet de températures élevées (40/35°C jour/nuit et 16/8 h de photopériode pour 4 semaines) sur la température de la feuille (barres) et le taux de transpiration (E) (lignes) d'une feuille mature de 4 semaines des cultivars 'Chandler' (noir) et 'Sweet Charlie' (blanc). Tirée de Kadir et collab., 2006.

À la fin des quatre semaines d'exposition à 40/35°C, les feuilles de 'Chandler' transpirent environ 20% de plus que les feuilles de 'Sweet Charlie' et leurs températures est environ 4°C moins élevés. Ceci pourrait être expliqué par le fait que certains cultivars ont développé des mécanismes de résistances à des températures élevées (Kadir et collab. 2006). En conclusion, les températures élevées réduisent la croissance des fraisiers et les rendements de ceux-ci. De plus, l'inhibition de la photosynthèse est un des premiers dommages causés dans ces cas-là, mais les cultivars de fraise répondent de façons différentes à un stress thermique (Kadir et collab. 2006).

Une autre étude conduite dans les fraises a permis d'identifier les températures optimales pour le rendement et la productivité chez le cultivar de fraise à jour neutre 'Everest' (Wagstaffe et Battey, 2006). La température avait un effet significatif sur le rendement ($P < 0,001$). Le rendement le plus élevé (1497 g par plant) était obtenu avec une moyenne de la température ambiante de 23°C, tandis qu'une diminution de celui-ci était observée à des températures de 21°C (1152 g par plant) et 15°C (889 g par plant) (tabl. 2; page suivante). La température la plus élevée amenait aussi une réduction du rendement avec 1000 g par plant. Le nombre de fruits produits par plant varie aussi avec la température. Contrairement au fait que 23°C était la température optimale pour le rendement, le plus grand nombre de fruit par plant a été observé à 27°C. Ceci pourrait être expliqué par le fait qu'à des températures élevées, les plants produisent beaucoup, mais les fruits sont plus petits (Wagstaffe et Battey, 2004, cité par Wagstaffe et Battey, 2006).

Tableau 2. Rendement total et nombre de fruit par plant en 2001, affectés par la moyenne de température ambiante. Les moyennes ayant la même lettre ne sont pas différents significativement (niveau 5%). Erreur-type est entre parenthèses. Adapté de Wagstaffe et Battey, 2006.

| <i>Traitements 2001</i> | <i>Rendement total</i> (g) (\pm SE) | <i>Nombre de fruit total</i> (\pm SE) |
|-------------------------|--|---|
| 15 °C | 889,4 c (62,3) | 74,2 c (4,1) |
| 21 °C | 1151,9 b (95,3) | 136,8 b (9,9) |
| 23 °C | 1497,3 a (90,7) | 194,2 a (10,9) |
| 27 °C | 1000,1 bc (54,8) | 198,92 a (13,6) |

Afin d'éviter les dommages causés par un stress thermique, le principe du refroidissement végétatif est une méthode très prometteuse pour plusieurs cultures, dont la fraise (Hellman et Travis, 1988). L'efficacité de l'aspersion ou de la micro-aspersion pour diminuer la température du couvert végétal a été démontrée par plusieurs études et peut aussi permettre d'améliorer les rendements et la qualité des fruits.

3 Mécanisme du refroidissement par évaporation

Le mécanisme du refroidissement par évaporation peut paraître difficile à expliquer au niveau physique et thermodynamique dû au fait qu'il existe une série de transferts simultanés de chaleur et de masse entre le sol, la plante, l'air et l'eau. Par conséquent, lorsqu'une feuille est partiellement mouillée, on considère que la feuille et l'eau sont deux corps ayant des transferts d'énergies par radiation ou par convection avec l'air, et par convection entre eux (Westerman et collab. 1976). De plus, la feuille perdra de la chaleur par transpiration et l'eau en perdra par évaporation (fig. 3).

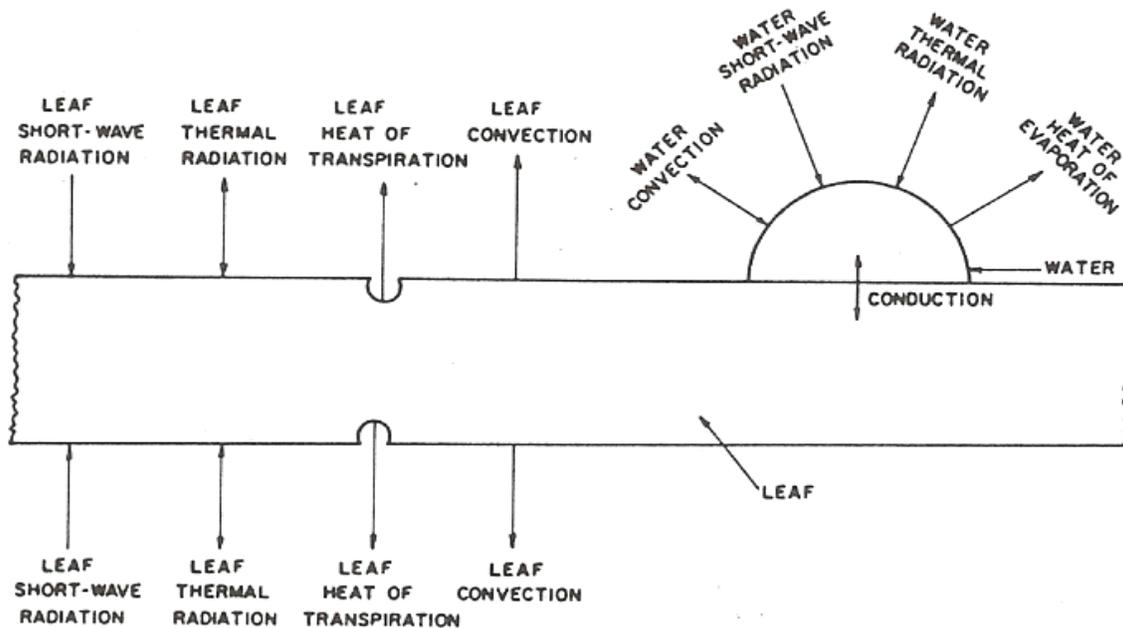


Figure 3. Flux d'énergie d'une feuille partiellement mouillée. Tirée de Westerman et col., 1976.

Le mécanisme du refroidissement par évaporation est possible grâce à l'aspersion pendant les périodes de chaleur au cours de la journée, dans le but de réduire la température des plants. La principale cause d'un stress thermique au niveau d'un organe végétal est l'énergie radiative qui est partiellement transformée en chaleur au niveau des tissus. Ce phénomène est d'autant plus accentué par une insuffisance hydrique (Saadia et collab. 1996). Le principe de base de la régulation thermique d'une feuille est l'introduction d'un terme d'évaporation à la répartition des termes du bilan d'énergie de la feuille. Ce terme d'évaporation va modifier le bilan en absorbant une fraction importante de l'énergie radiative disponible (Saadia et collab. 1996; Gates, 1963). Le refroidissement thermique se produit après l'aspersion lorsqu'il y a évaporation des gouttelettes d'eau retenue sur la surface de la feuille (Seginer, 1970; Kohl et Wright, 1974). Afin de permettre cette évaporation, une grande quantité de chaleur est nécessaire (2,43 MJ/kg d'eau à 30°C) et celle-ci provient directement des radiations solaires et/ou d'autres sources de chaleur qui est en contact avec l'eau à évaporer (dans l'air ou sur la végétation) (Evans, 2004).

Ainsi, le taux de refroidissement par évaporation dépendra de la température de la surface de la feuille, de la température de l'air, du déficit de saturation de l'air et de la vitesse du vent (Saadia et collab. 1996). Finalement, la réduction des stress thermiques à l'aide du refroidissement par évaporation agira en réduisant la température des organes végétaux et de l'air, en diminuant la

perte en eau des plants par transpiration et en augmentant l'humidité relative de l'air, ce qui améliora les conditions de développement de la plante (Saadia et collab. 1996; Sneed et collab. 1988). En effet, il est connu qu'une augmentation de la température d'une feuille amène une hausse du taux de transpiration, ce qui favorise un stress hydrique chez la plante, surtout si l'humidité relative de l'air est faible (Carolus, 1971; Anderson, 1990).

4 Effet du refroidissement par évaporation sur la température du couvert végétal

Les chaudes températures rencontrées pendant la saison de croissance des cultures peuvent occasionner des stress importants chez la plante, même en présence d'un sol bien irrigué (Iglesias et collab. 2005). De ce fait, il est possible d'améliorer les conditions de production en protégeant les plants de ce stress avec l'utilisation de l'aspersion ou de la micro-aspersion afin de diminuer la température du couvert végétal. La présence de l'eau à la surface des végétaux permet de créer un microclimat dans le champ de culture en modifiant l'environnement immédiat, soit la température de l'air, du sol, de la feuille, du fruit, des bourgeons, et de l'humidité relative de l'air (Unrath, 1972a).

4.1 Refroidissement de l'air et des fruits

Des études faites dans la culture de la pomme (Iglesias et collab. 2002; Iglesias et collab. 2005) ont été effectuées afin de déterminer entre autre, l'effet du refroidissement par évaporation sur la température du verger et sur le taux d'humidité relative. Un système d'aspersion fonctionnait à tous les jours, peu importe la température ambiante du verger, pour une durée de deux heures à différents moments de la journée : en fin de journée (21h00-23h00) et en milieu de journée (15h00 – 17h00) ou au levée du soleil (6h00-8h00) (fig. 4). On remarque que pour une aspersion faite au milieu de la journée, la température de l'air diminue de 4-9°C, tandis que l'humidité relative augmente de 25-50% par rapport à la parcelle contrôle qui ne reçoit aucune aspersion.

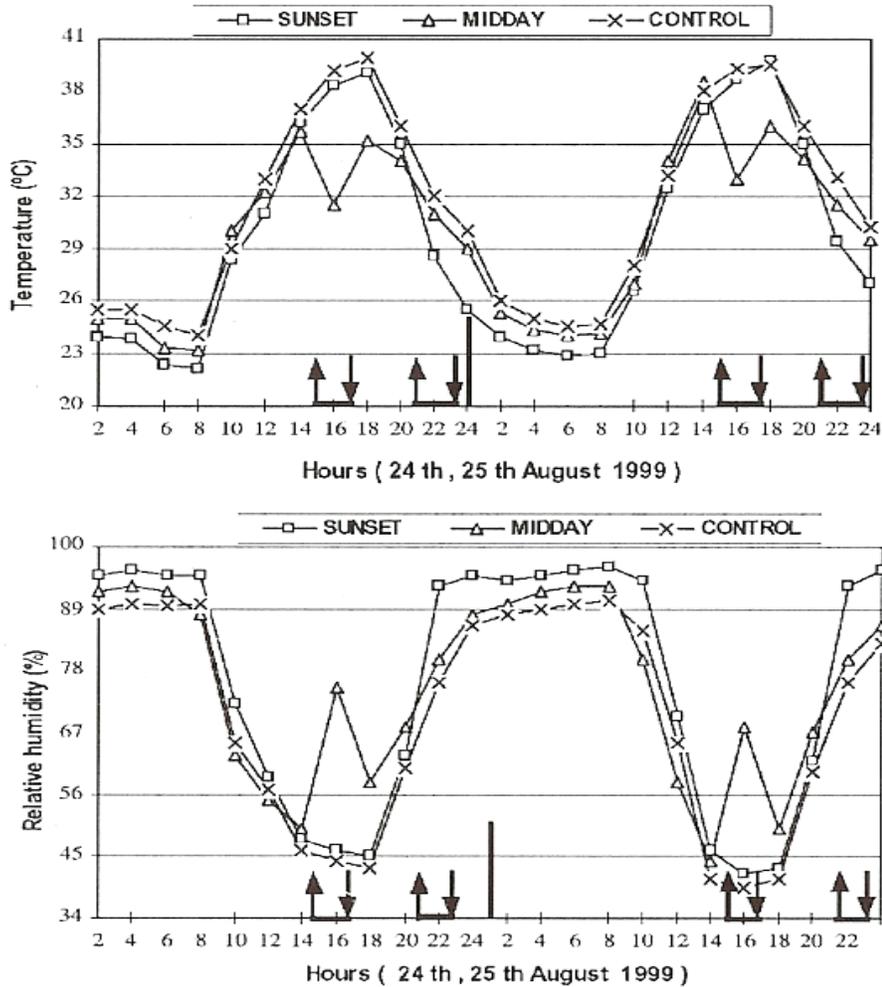


Figure 4. Effet du refroidissement par évaporation sur la température de l'air et l'humidité relative dans un verger. Les traitements d'aspersion étaient faits durant 2h consécutives à la mi-journée (midday) ou en fin de journée (sunset). L'activation et l'arrêt des traitements sont indiqués par les flèches ($\uparrow\downarrow$). Tirée de Iglesias et col., 2002.

Pour ce qui est de l'aspersion faite en fin de journée (21h00-23h00), les écarts sont moins importants. La température de l'air diminue de 2-4°C et l'humidité relative augmente de 10-15% par rapport au contrôle. Ainsi, le moment dans la journée où l'aspersion est effectuée est important. Cette différence serait dû au fait que l'évaporation de l'eau se fait beaucoup plus facilement et rapidement lorsqu'il y a présence de soleil et que les températures de l'air sont plus élevées. C'est pourquoi on observe un refroidissement de l'air et une augmentation de l'humidité plus importants. Cette étude a aussi démontré que la température des fruits étaient diminuée de façon plus importante avec une aspersion en mi-journée (6,2°C) qu'une aspersion en fin de journée (2,8°C).

Des données similaires ont été obtenues par Iglesias et collab. en 2005 (tabl. 3; page suivante). L'aspersion faite en mi-journée donnait de meilleurs résultats que celle faite en fin de journée pour ce qui est de la diminution de la température du verger et du fruit. En observant la moyenne de la température des fruits, on remarque que l'aspersion faite en mi-journée réduit la température

interne de 6,1°C par rapport au contrôle, soit 6,8°C pour un fruit exposé directement aux rayons du soleil et 5,4°C pour un fruit à l'ombre. Ainsi, le refroidissement par évaporation est favorisé lorsque le fruit est directement au soleil que lorsqu'il est à l'ombre. Pour ce qui est de l'aspersion faite au couché du soleil, la faible diminution de température interne observée chez le fruit (3,5°C) est dû au faible taux d'évaporation. Finalement, la température de l'air a aussi diminué de façon significative.

Bien que l'aspersion ait un effet sur l'abaissement de la température de l'air, les changements ne sont pas observables de façon instantanée. Or, le début de l'abaissement de la température de l'air après le début du système d'aspersion est très dépendant de l'intensité et de la durée de l'aspersion (Saadia et collab. 1996). Thompson et collab. (1986) ont utilisé une intensité d'aspersion de 11,6 mm/heure et ont obtenu une diminution de la température de l'air 10 minutes après le début de l'irrigation. Steiner et collab. (1983) ont obtenu une diminution de la température de l'air 1 heure après le début de l'irrigation avec une intensité de 10 mm/heure, et Saadia et collab. (1996) ont obtenu des résultats 2 heures après le début de l'aspersion avec une intensité de 7,6 mm/heure. On peut donc affirmer que plus l'intensité d'aspersion est élevée, plus le début de l'abaissement de la température de l'air se fait rapidement.

Tableau 3. Température interne du fruit et température du verger affectée par la micro-aspersion pour 4 journées en 1998. Tiré de Iglesias et col., 2005.

| Date | Fruit position | Time of measurement (16 h 45 min to 17 h) | | | | Time of measurement (22 h 45 min to 23 h) | | | |
|------------|----------------|---|---------|-----------------|---------|---|---------|-----------------|---------|
| | | Fruit temperature | | Air temperature | | Fruit temperature | | Air temperature | |
| | | Mid-day | Control | Mid-day | Control | Mid-day | Control | Mid-day | Control |
| 21st July | SUF* | 33.2 | 39.8 | 28.2 | 34.5 | 22.8 | 25.9 | 21.3 | 24.2 |
| | SHF** | 28.2 | 34.5 | | | | | | |
| 29th July | SUF | 29.1 | 36.9 | 26.9 | 32.8 | 22.1 | 25.1 | 19.8 | 22.7 |
| | SHF | 27.2 | 33.2 | | | | | | |
| 4th August | SUF | 31.6 | 37.2 | 25.6 | 31.5 | 19.8 | 23.7 | 18.5 | 21.9 |
| | SUF | 33.3 | 40.6 | | | | | | |
| 7th August | SUF | 33.3 | 40.6 | 31.2 | 36.1 | 24.1 | 27.9 | 23.1 | 25 |
| | SHF | 32.1 | 36.6 | | | | | | |
| Mean | | 30.2 | 36.3 | 28.0 | 33.7 | 22.2 | 25.7 | 20.7 | 23.5 |

*SUF : fruit au soleil

**SHF : fruit à l'ombre

4.2 Refroidissement des feuilles

Anderson (1990) a utilisé la méthode du refroidissement par évaporation dans la culture du gingembre qui est soumis aux températures extrêmes des régions sud-africaines. Cette étude a permis de confirmer l'effet du refroidissement par évaporation sur la température des feuilles de la canopée (fig. 5; page suivante). L'aspersion était en marche pendant 1,5 minutes puis arrêtée pendant 4 minutes. Le déclenchement du système se faisait en fonction de la température ambiante, dont les seuils de températures limites avaient été prédéterminés (octobre-novembre : 28°C; décembre-mars : 30°C). Dans la parcelle non aspergée (no cooling), la température des feuilles augmentait jusqu'à un maximum de 35°C, tandis que la température des feuilles de la parcelle aspergée (cooling) n'atteignait que 27,5°C. En fin d'après-midi (17h00), la différence de température entre les deux traitements était de plus de 10°C (Anderson, 1990).

Une autre étude faite cette fois dans la culture du raisin (Kliewer et Schultz, 1973) présente les effets positifs de l'utilisation de l'aspersion sur la température des feuilles. En plus d'avoir les mêmes conclusions que les études présentées précédemment, soit que la température des feuilles de vigne ayant été aspergées était plus basse que celles non aspergées, Kliewer et Schultz (1973) ont démontré que la perte de chaleur chez la feuille était plus importante lorsque la température ambiante était plus élevée. Ainsi, la température d'une feuille humide est généralement 30-40°F plus basse qu'une feuille sèche lorsque la température de l'air est de plus de 100°F, 20-30°F plus basse, quand il fait 90-100°F, et moins de 20°F plus basse avec des températures ambiantes de 85-90°F (Kliewer et Schultz, 1973).

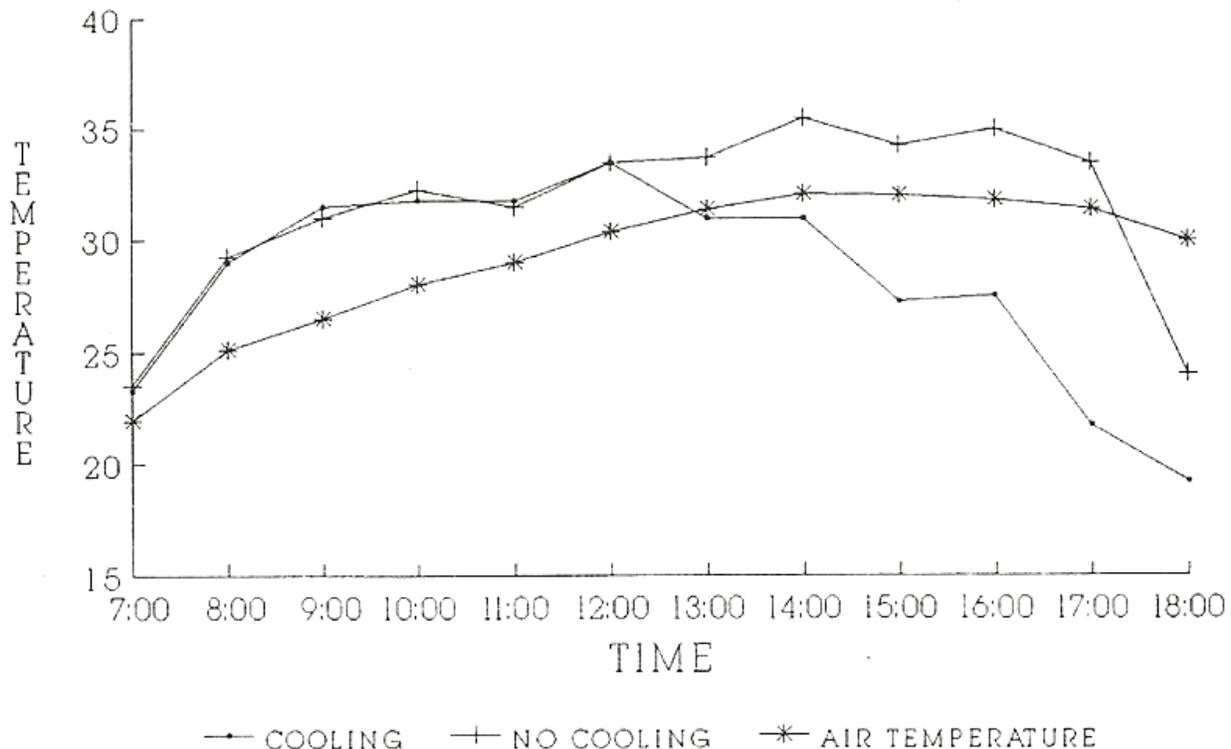


Figure 5. Effet du refroidissement par évaporation sur la température de la canopée pendant une journée chaude typique. Tirée de Anderson, 1990.

4.3 Refroidissement des bourgeons

L'aspersion permet de réduire la température des fruits de plusieurs cultures tels que la pomme (Unrath, 1972a), les raisins (Gilbert et collab. 1970) et les prunes (Gay et collab. 1971), afin d'en améliorer l'apparence ou les rendements. Par contre, dans certaines régions, les températures froides du printemps peuvent conduire à une baisse de rendement en fruit dus aux dommages faits aux bourgeons. Si la température des bourgeons subit de gros changements, leur développement en sera influencé (Anderson et collab. 1975). Par conséquent, l'utilisation de l'aspersion afin de réduire la température des bourgeons pour retarder leur développement et ainsi, réduire les dommages dus au froid a été étudiée dans la culture de la pomme.

Hamer (1983) a étudié l'effet des températures froides sur les bourgeons de pommiers en conditions contrôlées (tabl. 4). Des pommiers sélectionnés ont reçu une aspersion commençant le 13 février et se terminant soit le 15 avril, le 22 avril, le 29 avril ou le 6 mai. Par la suite, des échantillons de bourgeons floraux de chacun des traitements ont été placés en chambre froide afin de déterminer la résistance au froid des bourgeons et ce, à six reprises à partir du 16 avril avec un intervalle d'une semaine.

Tableau 4. Pourcentage des bourgeons de fleur tués par le froid en chambres expérimentales en 1981. Tiré de Hamer, 1983.

| Date | Minimum chamber temperature | WE132 watered from 13 February until | | | | Unwatered control | | Average of all treatments |
|----------|-----------------------------|--------------------------------------|----------|----------|-------|-------------------|-------|---------------------------|
| | | 15 April | 22 April | 29 April | 6 May | WE132 | WE129 | |
| 16 April | -2.5°C | 15±4 | 8±3 | 0 | 21±4 | 40±6 | 65±6 | 25 |
| 23 April | -3.5°C | 61±5 | 68±5 | 51±5 | 80±4 | 83±5 | 99±4 | 74 |
| 30 April | -2.75°C | 62±5 | 81±4 | 44±5 | 87±3 | 93±9 | 96±7 | 77 |
| 7 May | -2.5°C | 18±4 | 72±4 | 30±4 | 57±5 | 29±5 | 14±4 | 37 |
| 14 May | -2.5°C | 57±4 | 76±4 | 94±2 | 85±3 | 30±5 | 72±5 | 69 |
| 21 May | -2.75°C | 60±5 | 68±4 | 61±5 | 61±5 | 53±7 | 54±10 | 60 |

Note : WE132 et WE129 correspondent à deux vergers différents.

La première journée d'observation (16 avril), avec une température minimum de -2,5°C, les bourgeons ayant eu un des quatre traitements d'aspersion (WE132 watered from 13 February until) étaient moins sensibles au froid que ceux provenant d'arbres non aspergés (Unwatered control). Cette différence de sensibilité pourrait être dû au stade de développement des bourgeons, dont ceux provenant du verger WE129 étaient les plus avancés dans leur développement. Cela expliquerait le taux de mortalité observé à 65%, tandis que le stade de développement des bourgeons des parcelles aspergées jusqu'au 29 avril était le moins avancé (0% de mortalité).

Pour les 23 et 30 avril, avec une température minimum de -3,5°C et -2,75°C respectivement, un fort taux de mortalité des bourgeons a été observé pour tous les traitements d'aspersion (44-87%). Encore une fois, les taux de mortalité les plus élevés étaient observés dans les parcelles non

aspergées (83-99 %). Par contre, pour le traitement d'aspersion allant jusqu'au 6 mai, 87% de mortalité des bourgeons a été observé le 30 avril. Les bourgeons les plus résistants au froid provenaient du traitement d'aspersion allant jusqu'au 29 avril (44%).

Le 7 mai, avec une température minimum de $-2,5^{\circ}\text{C}$, les bourgeons non aspergés provenant du verger WE129, ainsi que ceux du traitement d'aspersion allant jusqu'au 15 avril ont été les plus résistants au froid avec des taux de mortalité de 14% et 18% respectivement, bien que les bourgeons du WE129 étaient les plus avancés dans leur développement. C'est dans le traitement d'aspersion allant jusqu'au 22 avril qu'il y a eu le plus de dommages (72%).

Le 14 mai, avec une simulation de froid de $-2,5^{\circ}\text{C}$, le taux de mortalité le plus élevé a été observé dans les parcelles du traitement d'aspersion allant jusqu'au 22 avril (94%). Pourtant, c'est dans ce traitement que les plus faibles taux avaient été observés les 16, 23 et 30 avril (0%, 51% et 44% de mortalité). Les bourgeons les plus résistants au froid provenaient des parcelles non aspergées du verger WE132 (30%). Finalement, le 21 mai, il n'y avait aucune différence significative entre tous les traitements avec ou sans aspersion (53-68% de mortalité).

Hamer (1983) en est venu à la conclusion que le développement des bourgeons de pommier était retardé de 13 jours par l'utilisation d'aspersion. En avril 1980, les bourgeons provenant des traitements avec aspersion étaient moins endommagés par un froid créé artificiellement que les bourgeons des traitements sans aspersion. Par contre, la situation inverse a aussi été observée au cours des deux premières semaines de mai.

Une autre étude faite chez le pommier a démontré que l'aspersion réduisait la température moyenne des bourgeons (Anderson et collab. 1975). Leur hypothèse était que puisque le développement des bourgeons est corrélé avec l'accumulation d'unités de chaleur, la diminution de la température des bourgeons induite par l'utilisation de l'aspersion devrait ralentir leur développement (Anderson et collab. 1975).

5 Effet du refroidissement par évaporation sur la qualité des fruits

Il a aussi été démontré que la diminution de la température des fruits, par l'utilisation de l'aspersion ou de la micro-aspersion, améliore la qualité de ceux-ci entre autre en augmentant le calibre et en améliorant la couleur et ce, dans la culture des pommes (Unrath et Sneed, 1974; Iglesias et collab. 2002), des poires (Wand et collab. 2005), des fraises (Valentine, 1980) et des raisins (Kliwer et Schultz, 1973). Le refroidissement par évaporation causé par l'aspersion n'est habituellement pas utilisé dans le but d'augmenter le calibre des fruits. Par contre, cet effet à bel et bien été observé dans certain cas. Théoriquement, le taux de respiration de tous tissus végétaux est grandement influencé par une augmentation de la température. Ainsi, la diminution de la température des fruits réduit la quantité de carbohydrates perdus par la respiration. Par conséquent, il y a plus de carbohydrates disponibles pour la croissance des fruits (Wand et collab. s. d.).

Des étude portant sur la culture de la pomme démontrent un effet positif sur le calibre des fruits par l'utilisation de l'aspersion et du refroidissement par évaporation. Unrath et Sneed (1974) ont obtenu une qualité supérieure des fruits avec l'aspersion (« evaporative cooling irrigation ») par rapport à un traitement d'irrigation conventionnel et à un contrôle sans irrigation (tabl. 5 ; page suivante). Dans l'ensemble, on observe une augmentation du pourcentage de fruit ayant une belle couleur rouge de 13%, ainsi qu'une augmentation du pourcentage des solides solubles de 1% par rapport au contrôle. De plus, les fruits pesaient en moyenne 22 g de plus que le contrôle avec un diamètre moyen de 7,42 cm et une longueur moyenne de 6,88 cm. Puis, le pourcentage des maladies causées par des désordres physiologiques (« cork spot » et « bitter pit ») a été réduit de 8% et 7%, respectivement.

Tableau 5. Effet de l'irrigation et de l'aspersion sur la qualité des pommes 'Red Delicious'. Adapté de Unrath et Sneed, 1974.

| Irrigation treatment | % Fruit color | | % Soluble solids | Fruit Size | | | L/D | Physiological disorder (%) | |
|--------------------------------|---------------|-----------|------------------|------------|-----------------|-------------------|------|----------------------------|------------|
| | Total | Solid red | | Wt/fruit g | Diam cm(inches) | Length cm(inches) | | Cork spot | Bitter pit |
| No irrigation (control) | 75 | 40 | 10.3 | 153 | 7.06 (2.78) | 6.50 (2.56) | .921 | 16 | 15 |
| Soil irrigation | 77 | 43 | 10.9 | 162 | 7.32 (2.88) | 6.83 (2.69) | .934 | 11 | 14 |
| Evaporative cooling irrigation | 83 | 53 | 11.3 | 175 | 7.42 (2.92) | 6.88 (2.71) | .928 | 8 | 8 |

Il existe aussi un lien entre le moment d'application de l'aspersion dans la journée et les effets sur les paramètres de qualité des fruits. Les paramètres de qualité mesurés par Iglesias et collab. (2002) montrent que les plus gros fruits ont été obtenus avec les traitements d'aspersion faits en mi-journée en 1998 et en 1999 (tabl. 6). Dans cette étude, l'interaction 'saison x traitement d'aspersion' était significatif, ce qui expliquerait que les conditions climatiques présentes en 1997, ont réduit les effets de l'aspersion sur la qualité des fruits (données non présentées). C'est pourquoi les résultats ne sont pas significatifs. De plus, Unrath (1972b) affirmait que le poids et la fermeté des fruits était augmentée par le refroidissement végétatif causé par l'aspersion seulement pour les saisons de croissance avec des conditions ni trop chaudes ni trop froides.

Tableau 6. Effet du refroidissement par évaporation sur le paramètres de qualités des fruits, valeurs moyennes de 1997 à 1999 sur le cultivar de pomme 'Topred Delicious'. Adapté de Iglesias et col. 2002.

| Parameter | Treatment | 1997 | 1998 | 1999 |
|---------------------------|-----------------------------|-------|--------|--------|
| Size (mm) ^b | Sunset | 82.8 | 84.7 b | 87.1 b |
| | Mid-day ^c | 83.9 | 86.5 a | 91.8 a |
| | Control | 81.6 | 78.8 c | 86.0 b |
| | Significance ($P \leq F$) | 0.141 | 0.038 | 0.0018 |
| Firmness(lb) ^d | Sunset | 15.3 | 17.0 a | 14.3 a |
| | Mid-day ^c | 15.2 | 17.3 a | 14.9 a |
| | Control | 14.9 | 15.8 b | 13.5 b |
| | Significance ($P \leq F$) | 0.385 | 0.009 | 0.011 |

6 Effet du refroidissement par évaporation sur le rendement

En plus d'utiliser le refroidissement par évaporation pour réduire la température de l'air, du sol, des feuilles, des fruits et des bourgeons, cette méthode est reconnue pour avoir un effet significatif sur la couleur et la qualité des fruits, ainsi que sur le rendement (Iglesias et collab. 2005). De nombreuses études faites vers la fin des années 60 et au début des années 70 ont démontré que le refroidissement par évaporation avait permis d'augmenter les rendements, entre autres dans la culture de la pomme de terre (Peterson et Weigle, 1970), de la fève verte (Sanders et collab. 1974), de la tomate, du cantaloup et du concombre (Bibble et collab. 1968), du pois (Howell et collab. 1971), du raisin (Gilbert et collab. 1971) et de la pomme (Unrath et Sneed, 1974). Par contre, pour ce qui est de cette dernière culture, Iglesias et collab. (2002 et 2005) ont révélé que le refroidissement par évaporation n'avait pas d'effet direct sur les rendements des cultivars de pommes 'Topred Delicious' et 'Mondial Gala'. Dans la culture du gingembre, le refroidissement végétatif causé par l'aspersion a permis d'augmenter les rendements (Anderson, 1990). Les résultats démontrent une augmentation de 24,1% pour la première saison (1985-86) et 28,6% pour la deuxième (1986-87) entre les parcelles avec aspersion (cooling) et sans aspersion (no cooling) (tabl. 7). Les parcelles avec aspersion ont produit 8,8 t/ha de plus en 1985-86 pour un total de 45,2 t/ha et 16,5 t/ha de plus en 1986-86 (74,1 t/ha).

Tableau 7. Rendement en gingembre. Tiré de Anderson, 1990.

| Treatment | 1985/86 | 1986/87 |
|------------------|---------|---------|
| No cooling | 36.4 | 57.6 |
| Cooling | 45.2 | 74.1 |
| Difference | 8.8 | 16.5 |
| % Yield increase | 24.1 | 28.6 |

7 Discussion et synthèse

Le refroidissement végétatif par évaporation à l'aide d'aspersion est une méthode utilisée pour diminuer les stress thermiques en réduisant la température des organes de la plante, en augmentant l'humidité relative de l'air et en réduisant la pertes d'eau par transpiration. Un stress thermique peut se caractériser par sa durée et sa fréquence d'apparition, ainsi que son intensité variable en fonction de la température élevée et de la température optimale pour la croissance de la plante (Levitt, 1980, cité par Saadia et collab.1996). Plusieurs études ont su démontrer qu'il était possible d'améliorer les conditions de production en protégeant les plants de ce stress avec l'utilisation de l'aspersion ou de la micro-aspersion.

Parmi les conditions importantes à tenir compte afin d'avoir les meilleurs effets, notons entre autre le moment dans la journée où l'aspersion est effectuée. La température des fruits serait diminuée de façon plus importante avec une aspersion en mi-journée qu'une aspersion en fin de journée. De plus, plus l'intensité d'aspersion est élevée, plus le début de l'abaissement de la température de l'air se fait rapidement. La température de l'air sera alors diminuée de façon significative due à la présence de l'eau à la surface des végétaux qui permet de créer un microclimat en modifiant l'environnement immédiat.

Pour ce qui est de l'effet du refroidissement par évaporation sur la température des feuilles, la perte de chaleur, donc la diminution de sa température, serait plus importante lorsque la température ambiante est plus élevée. Finalement, l'utilisation du refroidissement par évaporation afin de retarder le développement des bourgeons peut être envisageable. Par contre, son utilisation à des fins de réduire les dommages dus au froid est discutable. En ce qui à trait aux effets de cette méthode sur les fruits, l'aspersion ou de la micro-aspersion améliorerait la qualité de ceux-ci entre autre en augmentant le calibre et en améliorant la couleur. Encore une fois, les résultats peuvent être variables. Le poids et la fermeté des fruits augmenteraient seulement pour les saisons de croissance avec des conditions ni trop chaudes ni trop froides. Bien que les caractéristiques concernant la qualité des fruits correspondent souvent à l'apparence de ceux-ci (calibre et couleur), la présence de tache, points ou autres dommages causés par des organismes pathogènes ou par des facteurs abiotiques (soleil, vent) peut aussi être diminué par le refroidissement végétatif. Par exemple, des effets positifs ont été observés chez la fraise concernant la présence de « coup de soleil » sur les fruits. Parmi les autres effets notés dans cette production, le mûrissement hâtif serait réduit, la production de fruits de meilleure qualité et plus

ferme serait favorisé, en plus de réduire l'incidence du tétranyque à deux points vue la diminution de la température entourant les fruits (Valentine, 1980).

Pour finir, plusieurs chercheurs ont rapporté vers la fin des années 60 et au début des années 70, une augmentation des rendements d'un grand nombre de culture avec le refroidissement par évaporation : pomme de terre, fève verte, tomate, cantaloup, concombre, pois, raisin, pomme et gingembre. Avec les nombreux effets positifs mentionnés ci haut, il devient donc intéressant d'identifier les conditions optimales spécifiques à chaque culture afin de pouvoir utiliser à bon escient l'aspersion dans le but d'un refroidissement végétatif.

8 Conclusion

Le mécanisme du refroidissement par évaporation à l'aide d'aspersion est expliqué par la conversion de chaleur sensible en chaleur latente par conduction; contrôlée par un transfert de chaleur du fruit, de la feuille ou du bourgeon par évaporation de gouttes d'eau à la surface de la plante, suivi par le retrait de la vapeur d'eau à l'aide des mouvements de masses d'air (Evans, 2004). C'est pourquoi l'utilisation de l'aspersion en tant qu'outil de réduction des risques de stress thermique pour la plante a un intérêt certain. Par ailleurs, le refroidissement par évaporation pourrait comporter quelques désavantages. Étant donné que le couvert végétal se retrouve humecté durant toute la période d'aspersion, les dangers d'éventuelles contaminations fongiques sont à considérer. Il est donc conseillé de conserver un bon programme de dépistage afin d'éviter quelques problèmes que ce soit. Par contre, seulement quelques cas isolés d'apparition d'organismes nuisibles a été rapportés par rapport à l'utilisation de l'aspersion pour un refroidissement par évaporation. De plus, la qualité de l'eau utilisée dans le système d'aspersion est critique afin que le refroidissement végétatif soit un succès. S'il y a présence dans l'eau, de carbonates de calcium, fer, silices ou autres sels, et que ces minéraux se retrouvent déposés sur les feuilles et les fruits, il est possible qu'il y ait de graves conséquences s'ils sont présents à des niveaux considérés comme toxiques. L'analyse de l'eau est donc une étape primordiale à faire avant de procéder à l'aspersion. Finalement, il est bien sûr important d'évaluer l'intérêt économique de cette technique d'aspersion, car elle nécessite une certaine quantité d'équipement pour que le tout soit performant.

Le refroidissement par évaporation est un outil de gestion qui peut être utilisé avec succès. Bien que les effets bénéfiques peuvent être variables dépendamment des saisons et des types de cultures, les résultats semblent être significatifs dans plusieurs cas afin d'améliorer la qualité des fruits et en rapporter des bénéfices. En conclusion, la faisabilité technique de cette méthode doit être évaluée en situation réelle de production, surtout au Québec, puisque que celle-ci est nouvelle et très peu documentée sous nos conditions.

9 Bibliographie

- Adams, S. R.; Cockshull, K. E. et Cave, C. R. J.** 2001. *Effect of temperature on the growth and development of tomato fruits*. *Annu. Bot.* 88, p. 869-877.
- Anderson, J. L. ; Ashcroft, G. L. ; Richardson, E. A. ; Alfaro, J. F. ; Griffin, R. E. ; Hanson, G. R. et Keller, J.** 1975. *Effects of evaporative cooling on temperature and development of apple buds*. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 100 (3), p. 229-231.
- Anderson, T.** 1990. *Evaporative cooling of ginger (Zingiber officinale)*. *Acta horticulturae*, International symposium on the culture of subtropical and tropical fruits and crops. v. I, no. 275. Wageningen (Netherlands) : International Society for Horticultural Science (ISHS). p. 173-179.
- Bibble, B. B.; Cuthbert, R. L. et Carolus, R. C.** 1968. *Response of some vegetable crops to atmospheric modifications under field conditions*. *Proc. Am. Soc. Hort. Sci.* 90, p. 590-594.
- Carolus, R. L.** 1971. *Evaporative cooling techniques for regulating plant water stress*. *Hortscience*, 6 (1), p. 23-25. Feb.
- Chaumont, M.; Osorio, M.M.; Chaves, H.; Vanacker, J. F.; Morot-Gaudry, J. F.; Francois, J. et Foyer, C. H.** 1997. *the absence of photoinhibition during the mid-morning depression and photosynthesis in Vitis vinifera grown in semi-arid and temperate climates*. *J. Plant Physiol.* 150, p. 743-751.
- Evans, R.G.** 2004. *Energy balance of apples under evaporative cooling*. *Transactions of the ASAE*, 2004 Jul-Aug, v. 47, no. 4, p. 1029-1037.
- Gay, L. W.; Stebbins, R. L. et Black, R. M.** 1971. *The effect of spray irrigation on plum temperature*. *Northwest Sci.* 45, p. 200-208.
- Gates, D. M.** 1963. *Leaf temperature and energy exchange*. *Arch. Met. Geophys. Bioklim.* 12B, p. 321-336.
- Gilbert, D. E.; Myer, J. L.; Kessler, J. J.; LaVine, P. D. et Carlson, C. V.** 1970. *Evaporative cooling of vineyard*. *Calif. Agr.* 24, p. 12-14.
- Gulen, H. et Eris, A.** 2004. *Effect of heat stress on peroxidase activity and total protein content in strawberry plants*. *Plant Sci.* 166, p. 739-744.
- Hamer, P.J.C.** 1983. *Evaporative cooling of apple buds: the effect of timing of water application on bud development and frost resistance of the cv. Cox's Orange Pippin*. *Journal of Horticultural Science (UK)*, v. 58(2), p. 153-159.
- Hellman, E. et Travis, J.** 1988. *Growth inhibition of strawberry at high temperatures*. *Adv. Strawberry Production* 7, p. 36-38.
- Henning, J.C. et Brown, R. H.** 1986. *Effects of irradiance and temperature on photosynthesis in C3, C4 et C3/C4 Panicum species*. *Photosyn. Res.* 10, p. 101-112.
- Howell, T. E.; Hiler, E. A. et Van Bavel, C. H. M.** 1971. *Crop response to mist irrigation*. *Trans. Of the ASAE*, 14 (5), p. 906-910.
- Iglesias, I.; Salvia, J.; Torguet, L. et Cabus, C.** 2002. *Orchard cooling with overtree microsprinkler irrigation to improve fruit colour and quality of 'Topred Delicious' apples*. *Scientia Horticulturae*, v. 93, no. 1, 28 February 2002, p. 39-51.
- Iglesias, I., Salvia, J., Torguet, L. et Montserrat, R.** 2005. *The evaporative cooling effects of overtree microsprinkler irrigation on 'Mondial Gala' apples*. *Scientia Horticulturae* v. 103, Issue 3, 30 January 2005, p. 267-287.
- Jones, H. G.** 1998. *Stomatal control of photosynthesis and transpiration*. *Journal of Experimental Botany*, v. 49, Special Issue, March, p. 387-398.
- Jones, H. G. et Sutherland, R. A.** 1991. *Stomatal control of xylem embolism*. *Plant, Cell and Environment*, v. 6, p. 607-612.
- Kadir, S.; Sidhu, G. et Al-Khatib, K.** 2006. *Strawberry (Fragaria x ananassa Duch.) growth and productivity as affected by temperature*. *HortScience* 41 (6), p. 1423-1430.
- Kliewer, W. et Schultz, H. B.** 1973. *Effect of Sprinkler Cooling of Grapevines on Fruit Growth and Composition*. *Am. J. Enol. Vitic.*; 24, p. 17-26
- Kohl, R. A. et Wright, J. L.** 1974. *Air temperature and vapour pressure changes caused by sprinkler irrigation*. *Agron. J.* 66, p. 85-86.

- Kotchi, S. O.** 2004. «*Détection du stress hydrique par thermographie infrarouge. Application à la culture de la pomme de terre*», mémoire de maîtrise, Québec, Université Laval, Faculté de foresterie et géomatique, Maîtrise en sciences géomatique. Adresse[URL] :<http://www.theses.ulaval.ca/2004/22198/22198.html>
- Lewitt, J.** 1980. *Response of plants to environmental stresses : Chilling, freezing, and high temperature stresses*, v. 1, 2nd edition. Academic Press Inc, New York, États-Unis.
- Michaud, Dominique.** 2006. Notes de cours 'Physiologie végétale'. Département de phytologie. Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation. Université Laval. 215 p.
- Paulsen, G. M.** 1994. *High temperature responses of crop plants*. P. 365-389. In: K. J. Boot, J. M. Bennett, T. R. Sinclair et G. M. Paulsen (eds). *Physiology and determination of crop yield*. ASA, CSSA, SSSA, Madison, Wisc.
- Peterson, L. E. et Weigle, J. O.** 1970. *Varietal response of potatoes to air conditioning irrigation*. Am. Potato J. p. 94-98.
- Raven, Peter H., Ray F. Evert et Susan E. Eichhorn.** 2000. *Biologie végétale*, 1^{ère} éd., Paris, De Boeck Université, 944 p.
- Renquis, A. R. ; Breen, P. J. et Martin L. W.** 1983. *Influences of water stress and temperature on leaf elongation in strawberry*. Scientia Hort. 18, p. 77-85.
- Saadia, R.; Huber, L. et Lacroix, B.** 1996. *Modification du microclimat d'un couvert de maïs au moyen de l'irrigation par aspersion en vue de la gestion des stress thermiques des organes reproducteurs = Using evaporative cooling to fight heat stress in corn. The potential of sprinkler irrigation to reduce air and reproductive organ temperature*. Agronomie (Agronomie), v. 16, no. 8, p. 465-477.
- Sanders, D. C.; Scheirer, D. M. et Miller, C. H.** 1974. *Irrigation and crop cooling vegetables*. Proceedings of North Carolina Irrigation Conference. v. 11, p. 49-50.
- Seginer, I.** 1970. *A resistance model of evaporation during sprinkling*. Agric. Meteorol. 7, p. 487-497.
- Sneed, R.E.; Perry, K.B.; Sanders, D.C. et Unrath, C.R.** 1988. Using sprinkler irrigation for evaporative cooling. *Technical conference proceedings - Irrigation Association*, p. 114-120.
- Steiner, J.L.; Kanemasu, E. T. et Hasza, D.** 1983. Microclimatic and crop responses to center pivot sprinkler and to surface irrigation. *Irrig. Sci.* 4, p.801-814.
- Thompson, A. L.; Gilley, J. R. et Norman, J. M.** 1986. Simulation of sprinkler water droplet evaporation above a plant canopy. *ASAE Paper No.* 86-2108, Saint-Joseph, MI, États-Unis.
- Unrath, C. R.** 1972a. *The evaporative cooling effects of overtree sprinkler irrigation on "Red Delicious" apples*. J. Am. Soc. Hortic. Sci., 97, p. 55-58.
- Unrath, C. R.** 1972b. *The quality of 'Red Delicious' apples as affected by overtree sprinkler irrigation*. J. Am. Soc. Hortic. Sci., 97, p. 58-61.
- Unrath, C. R. et Sneed, R. E.** 1974. *Evaporative cooling of 'Delicious' apples-the economic feasibility of reducing environmental heat stress*. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 99 (4), p. 372-375.
- Valentine, B.J.** 1980. Evaporative cooling of strawberries in the field. *Agricultural gazette of New South Wales*, June 1980. v. 91 (3), p. 14-15.
- Wagstaffe, A. et Battey, N. H.** 2006. *The optimum temperature for long-season cropping in the everbearing strawberry 'Everest'*. Proc. Vth Int. Strawberry Symposium. Ed. G. Waite Acta Hort. 708, ISHS 2006. p. 45-49.
- Wand, S.J.E.; Steyn, W.J.; Holcroft, D.M.; Mdluli, M.J.; Dool, K. van den; Jacobs, G.** 2005. *Use of evaporative cooling to improve 'Rosemari' and 'Forelle' pear fruit blush colour and quality*. Acta horticultrae, 2005 Apr., no. 671, p. 103-111.
- Wand, S.J.E.; Steyn, W.J.; D.M.; Mdluli; Marais, S. J. S. et Jacobs, G. ?.** *Overtree evaporative cooling for fruit quality enhancement*. SA Fruit Journal.
- Westerman, P. W.; Barfield, B. J.; Loewer, O. J. et Walker, J. N.** 1976. *Evaporative cooling of partially-wet and transpiring leaf. II. Simulated effect of variations in environmental conditions, leaf properties, and surface water characteristics*. Trans Asae (Am. Soc. Agric. Eng.), 19 (5), p. 889-893, 896. Sept/oct 1976.