



Stratégies d'irrigation dans la fraise à jours neutres

Projet # 6348



Rapport final

Mai 2009 à mars 2011

Rapport rédigé par
Carl Boivin, agr., M.Sc. – IRDA
Paul Deschênes, agr., M.Sc. – IRDA

Avec la collaboration de
Luc Belzile, agr., économiste, M.Sc. – IRDA
Daniel Bergeron, agr., M.Sc. – MAPAQ
Stéphane Nadon, t.a. – IRDA

Novembre 2011

Équipe de réalisation

Carl Boivin	Chercheur, IRDA
Paul Deschênes	Professionnel de recherche, IRDA
Luc Belzile	Économiste, IRDA
Louis Gosselin	Producteur, Ferme François Gosselin
Gabriel Gosselin	Producteur, Ferme François Gosselin
Daniel Bergeron	Agronome, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ)
Patrice Thibeault	Agronome, Réseau de lutte intégrée Orléans (RLIO)
Michèle Grenier	Statisticienne, IRDA
Stéphane Nadon	Technicien agricole, IRDA
Rémi Carrier	Technicien agricole, IRDA
Jocelyn Boudrias	Technicien agricole, IRDA
Mathieu Bernier-Therrien	Technicien agricole, IRDA
Marc-Antoine Robert	Étudiant, Université Laval
Félix Bureau	Étudiant, Université Laval
Noélie Hébert-Tardif	Étudiante, CÉGEP de Sherbrooke

Table des matières

1	SOMMAIRE DES ACCOMPLISSEMENTS DU PROJET	1
2	DESCRIPTION DU PROJET	2
2.1	Introduction.....	2
2.2	Objectif général.....	2
2.3	Objectifs spécifiques.....	2
3	SURVOL DE LA LITTÉRATURE	3
3.1	Description du mouvement horizontal et vertical de l'eau dans le sol selon le débit par goutteur et l'espacement entre eux en fonction de la durée et de la fréquence des épisodes d'irrigation.....	3
3.1.1	Description du mouvement de l'eau par gravité	3
3.1.2	Description du mouvement de l'eau par capillarité	4
3.1.3	Description des conditions hydriques saturées et non saturées.....	4
3.1.4	Systèmes de goutte à goutte disponibles sur le marché.....	5
3.1.5	Le paradoxe du sol sec hydrophobe	5
3.2	Prévenir le lessivage des éléments minéraux en limitant le volume d'eau d'irrigation qui atteint la zone inexplorée par les racines	6
3.2.1	Diamètre et taille des racines en fonction de leur capacité d'absorption des éléments minéraux.....	6
3.2.2	Mouvement du potassium (K) par « mass flow »	7
3.3	Mesurer quantitativement le développement du système racinaire en fonction du mouvement de l'eau dans le sol.....	7
3.3.1	Le développement des racines en fonction de la quantité d'eau d'irrigation.....	7
3.4	Avantage économique à favoriser une stratégie d'irrigation permettant le maintien d'un plus grand volume de sol humide accessible à la plante.....	8
3.4.1	Le rendement en fonction de l'eau disponible	9
3.4.2	Méthodes d'évaluation des besoins en eau des cultures : Réflectométrie métallique et tensiométrie.....	10
3.5	Conclusion	11
4	MATÉRIEL ET MÉTHODE	12
4.1	Site expérimental	12
4.2	Matériel végétal et régie de culture.....	12
4.3	Traitements	12
4.4	Dispositif expérimental et analyses statistiques.....	13
4.5	Collecte des données.....	14
4.5.1	Caractérisation du site	14
4.5.2	Conditions météorologiques.....	15
4.5.3	Tension du sol des parcelles expérimentales.....	15
4.5.4	Teneur en eau volumique	15
4.5.5	Stades phénologiques.....	15
4.5.6	Développement des fruits.....	15
4.5.7	Développement du système racinaire.....	16
4.5.8	Récolte	18

5	RÉSULTATS ET ANALYSE	19
5.1	Résultats obtenus et analyse en fonction des objectifs spécifiques.....	19
5.1.1	Décrire le mouvement horizontal et vertical de l'eau dans le sol selon le débit par goutteur et l'espacement entre eux en fonction de la durée et de la fréquence des épisodes.	19
5.1.2	Prévenir le lessivage des éléments minéraux en limitant le volume d'eau d'irrigation qui atteint la zone de sol inexplorée par les racines.	28
5.1.3	Mesurer quantitativement le développement du système racinaire en fonction du mouvement de l'eau dans le sol.	33
5.1.4	Vérifier s'il y a un avantage économique à favoriser une stratégie d'irrigation permettant de maintenir un plus grand volume de sol humide accessible à la plante.	39
5.2	Diffusion des résultats.....	74
6	CONCLUSIONS.....	76
7	REMERCIEMENTS	78
8	BIBLIOGRAPHIE	79

Liste des figures

Figure 1. Plan du dispositif expérimental en 2009.....	14
Figure 2. Plan du dispositif expérimental en 2010.....	14
Figure 3. Prélèvement d'une tranche de sol à l'automne.....	16
Figure 4. Tranche de sol avec délimitation des 14 zones.....	17
Figure 5. Image de la numérisation d'une portion des racines dégagées d'une zone de sol effectué avec le logiciel WinRHIZO.	18
Figure 6. Patrons de variation moyens de la teneur en eau volumique du sol selon les 7 zones de suivi des traitements pour l'ensemble de la saison 2009.	19
Figure 7. Patrons de variation moyens de la teneur en eau volumique du sol selon les 7 zones de suivi des traitements pour l'ensemble de la saison 2010.	20
Figure 8. Coupe transversale d'une butte de sol avec positionnement des tubes de goutte à goutte (points verts pointés par les flèches) et des zones de mesure de la teneur en eau volumique (ellipses oranges) - a) traitements 2009 et T1, T6, T7, T11 et T12 2010 - b) TH.	21
Figure 9. Variation de la teneur en eau du T12 suite à un épisode d'irrigation le 27 août 2009.	22
Figure 10. Variation de la teneur en eau du T12 suite à un épisode d'irrigation le 11 août 2010.	22
Figure 11. Variation de la teneur en eau volumique en fonction de la profondeur et de l'éloignement latéral par rapport au tube de goutte à goutte en 2009 (T4).	24
Figure 12. Variation de la teneur en eau volumique en fonction de la profondeur et de l'éloignement latéral par rapport au tube de goutte à goutte en 2009 (T11).	24
Figure 13. Proportion du volume de sol affecté par les épisodes d'irrigation selon le traitement (2009)...	25
Figure 14. Courbes de rétention en eau du sol utilisé en 2009 (T6 et T7).	26
Figure 15. Courbe de rétention en eau moyenne du sol utilisé en 2010.	27
Figure 16. Disposition des 14 zones où la densité racinaire est considérée.	29
Figure 17. Proportion des classes du diamètre des racines selon les traitements de 2009.	30
Figure 18. Proportion des classes du diamètre des racines selon les traitements de 2010.	30
Figure 19. Densité et longueur racinaire selon les traitements de 2009.....	31
Figure 20. Densité et longueur racinaire selon les traitements de 2010.....	32
Figure 21. Corrélation entre la masse aérienne sèche et la densité racinaire, tout traitements confondus, en 2010.	32
Figure 22. Corrélation entre la longueur racinaire et la profondeur dans le sol, tout traitements confondus, en 2009.....	33
Figure 23. Corrélation entre la longueur racinaire et l'éloignement latéral par rapport au tube de goutte à goutte, tout traitements confondus, en 2009.	34
Figure 24. Densité racinaire moyenne selon la zone en 2009.....	34
Figure 25. Longueur racinaire moyenne selon la zone en 2009.	35
Figure 26. Densité racinaire moyenne selon la zone en 2010.....	35
Figure 27. Longueur racinaire moyenne selon la zone en 2010.	36
Figure 28. Corrélation entre la densité racinaire et le volume d'eau appliqué par épisode d'irrigation, tout traitements confondus, en 2009.	36
Figure 29. Corrélation entre la longueur racinaire et le volume d'eau appliqué par épisode d'irrigation, tout traitements confondus, en 2009.	37
Figure 30. Rendement relatif en fruits selon le traitement pour la saison 2009.....	39
Figure 31. Rendement relatif en fruits selon le nombre de litres d'eau par épisode d'irrigation en 2009... 40	40
Figure 32. Rendement relatif en fruits selon le nombre de litres par épisode pour 10 m de rang en 2009. 41	41
Figure 33. Rendement relatif en fruits selon l'espacement entre les goutteurs en 2009.....	41
Figure 34. Rendement relatif (grammes de fruits produits/litre d'eau appliqué) selon le traitement en 2009.	42

Figure 35. Poids en matière sèche des parties aériennes (g/plant) et des racines (g/tranche de sol) selon le traitement (bloc 2) en 2009.	43
Figure 36. Corrélation entre le nombre de cymes (inflorescences) et de feuilles par plant en 2009.	44
Figure 37. Corrélation entre le rendement total relatif en fruits et le poids en matière sèche des parties aériennes par parcelle pour l'ensemble des traitements du bloc 2 en 2009.	44
Figure 38. Production de feuilles et de cymes par période en 2009 (valeurs pour 36 parcelles).	45
Figure 39. Jours moyens entre la fleur nouvellement ouverte et le fruit récolté selon le traitement en 2009.	46
Figure 40. Durée de maturation des fraises en fonction de la période de récolte en 2009.	47
Figure 41. Rendement relatif en fruits en fonction de la période de suivi du taux de croissance végétatif en 2009.	48
Figure 42. Rendement relatif en fruits selon les traitements pour la saison 2010.	50
Figure 43. Nombre de fruits total relatif (%) pour la saison 2010.	51
Figure 44. Calibre des fruits en 2010.	51
Figure 45. Corrélation entre le nombre de nouvelles feuilles et le calibre des fruits totaux par période bihebdomadaire en 2010.	52
Figure 46. Rendement total relatif (%) en fruits en fonction des périodes de récolte en 2010.	53
Figure 47. Rendement total relatif selon la proportion de fruits produits.	53
Figure 48. Rendement relatif en fruits par litre d'eau appliqué pour la saison 2010.	54
Figure 49. Efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation selon les périodes où les rendements sont maximaux en 2010.	55
Figure 50. Volume d'eau d'irrigation total (litre) des traitements pour la saison 2010.	56
Figure 51. Masse sèche aérienne par plant total (g) en 2010.	56
Figure 52. Corrélation entre la masse sèche aérienne par plant (g) et le volume d'eau total appliqué (litre) en 2010.	57
Figure 53. Corrélation entre la masse sèche aérienne par plant (g) et le rendement total relatif (%) en fruits en 2010.	57
Figure 54. Corrélation entre le nombre de nouvelles feuilles et de nouvelles cymes en 2010.	58
Figure 55. Production de feuilles et de cymes par période (valeurs pour 24 parcelles) en 2010.	59
Figure 56. Rendement relatif en fruits en fonction des périodes de suivi de la croissance végétative en 2010.	60
Figure 57. Nombre de jours moyens entre une fleur ouverte et la récolte d'un fruit mûr en 2010.	62
Figure 58. Nombre de jours moyens par traitement entre une fleur nouvellement ouverte et un fruit mûr en 2010.	62
Figure 59. Volumes d'eau appliqués par traitement (litres par hectare) en 2010.	63
Figure 60. Coûts et revenus marginaux de l'irrigation de la fraise à jours neutres du traitement 11 de l'année 2010.	66
Figure 61. POADI en fonction de l'espacement entre les goutteurs.	69
Figure 62. POADI en fonction du volume d'eau irrigué.	70
Figure 63. POADI en fonction du débit d'irrigation.	70
Figure 64. Les sept sondes TDR insérées dans la demi-butte.	81
Figure 65. Positionnement initial des tensiomètres pour la saison 2009.	81
Figure 66. Pluviométrie du 12 juin au 5 octobre 2009 au site expérimental.	82
Figure 67. Pluviométrie du 14 mai au 2 novembre 2010 au site expérimental.	83
Figure 68. Densité racinaire moyenne T1 (cm racine/cm ³ sol).	86
Figure 69. Densité racinaire moyenne T6 (cm racine/cm ³ sol).	86
Figure 70. Densité racinaire moyenne T7 (cm racine/cm ³ sol).	87
Figure 71. Densité racinaire moyenne T11 (cm racine/cm ³ sol).	87
Figure 72. Densité racinaire moyenne T12 (cm racine/cm ³ sol).	87
Figure 73. Densité racinaire moyenne TH (cm racine/cm ³ sol).	88

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques des traitements à l'étude en 2009 et 2010.	13
Tableau 2. Les 8 périodes correspondant au suivi du taux de croissance des inflorescences et des feuilles pour la saison 2009.....	45
Tableau 3. Les 15 périodes correspondant au suivi du nombre de jours nécessaires pour produire un fruit mûr en 2009.....	46
Tableau 4. Périodes bihebdomadaires couvrant la durée des récoltes de 2010.	52
Tableau 5. Les 8 périodes correspondant au suivi du taux de croissance des inflorescences et des feuilles pour la saison 2010.....	59
Tableau 6. Les 15 périodes correspondant au suivi du nombre de jours nécessaires pour produire un fruit mûr en 2010.....	61
Tableau 7. Période optimale d'arrêt définitif de l'irrigation (POADI) pour différents traitements d'irrigation dans la production de la fraise à jours neutres.....	67

Liste des annexes

ANNEXE 1. Photos	81
ANNEXE 2. Précipitations mesurées pour les saisons 2009 et 2010	82
ANNEXE 3. Analyses texturales des parcelles expérimentales	84
ANNEXE 4. Schématisation de la distribution racinaire saison 2010.....	86
ANNEXE 5. Méthodologie de calcul pour les coûts d'irrigation et de commercialisation.....	89
ANNEXE 6. Courbes de coût marginal et de prix.....	90

1 SOMMAIRE DES ACCOMPLISSEMENTS DU PROJET

Le volume de sol colonisé par les racines de la culture et qui est à la portée du système d'irrigation est un facteur très important à considérer dans une gestion raisonnée de l'irrigation. Avec un système d'irrigation goutte à goutte (GàG), le nombre de points de contact entre l'apport en eau (goutteurs) et le sol est minime comparativement à un système par aspersion (en l'absence de paillis de plastique). Cette situation implique une distribution horizontale de l'eau pour que le sol en périphérie du tube de GàG soit humidifié. Sinon, certaines zones de sol colonisées par les racines et renfermant des éléments nutritifs s'assècheront.

Ce projet a pour objectif d'évaluer l'impact économique et environnemental d'une gestion de l'irrigation qui permet de maintenir un plus grand volume d'eau dans le sol colonisé par les racines de la culture. Réalisé en collaboration avec des intervenants de l'IRDA, du MAPAQ de la Direction régionale de la Capitale-Nationale, du RLIO, d'HORTAU et de Dubois Agrinovation, ce projet s'est déroulé à la Ferme François Gosselin située à l'Île-d'Orléans (Québec). Les 12 stratégies de gestion de l'irrigation différaient entre elles selon l'espacement entre les goutteurs (10,16 à 30,48 cm ou 4 à 12 po.), le volume d'eau appliqué lors d'un épisode, le débit (1,29 à 5,07 lpm/30,48 m) et la durée d'un épisode (20 à 60 minutes).

Pour l'ensemble des stratégies, l'écoulement de l'eau était principalement vertical. Ainsi, ni l'augmentation du débit par goutteur, ni l'espacement entre ceux-ci ou le volume d'eau appliqué par épisode ne se sont avérés efficaces pour favoriser un écoulement latéral. Toutefois, la réduction de l'espacement entre les goutteurs a permis d'augmenter l'efficacité d'application de l'eau. En effet, pour un même volume appliqué par épisode et pour la saison (500 000 l/ha), les fraisiers irrigués avec un système où l'espacement entre les goutteurs était de 30,48 cm (12 po.) ont produit 13 % moins de fruits durant le pic de production (6 août au 13 sept. 2010) comparativement à un espacement de 20,32 cm (8 po.). De plus, l'augmentation du nombre de points d'apport en eau (goutteurs), conséquent à l'ajout d'un second tube de GàG, a permis d'atteindre une plus grande proportion de sol valorisable par le plant. Cette stratégie utilise un volume d'eau 2 fois plus élevé par épisode, sans pour autant diminuer le nombre total d'épisodes (nombre d'épisodes d'irrigation moyen de 36,6 comparativement à 43,3). Toutefois, l'arrangement spatial des racines était plus uniforme et les rendements ont été plus élevés (19,4 %) durant la 2^e moitié d'août 2010. Au terme de la saison et pour l'ensemble des stratégies, 100 % du volume de sol sous le paillis de plastique était colonisé par les racines (0,96 cm de racine par cm³ de sol comme densité moyenne), mais ces dernières étaient concentrées au centre de la butte. En moyenne, 50 % de la butte était hors de portée des apports en eau (avec un tube). Cette situation confirme l'importance de connaître la portée du système d'irrigation utilisé, si ce n'est que pour le positionnement du tensiomètre. De plus, cela appuie l'objectif de gérer l'ensemble du sol colonisé par les racines, afin d'uniformiser la densité racinaire et possiblement valoriser les ressources disponibles et diminuer la fréquence des épisodes et les risques que la plante subisse un stress hydrique.

2 DESCRIPTION DU PROJET

2.1 Introduction

La problématique considérée par ce projet a trait à l'assèchement du sol en périphérie du tube de goutte à goutte. Quoique cette problématique s'observe habituellement après un certain moment au cours de la saison, plusieurs des facteurs nécessaires à sa présence sont réunis dès le début de la saison. Cette problématique amène les producteurs à augmenter la durée des irrigations pour tenter d'atteindre le volume de sol qui s'assèche. Cependant, cette pratique minimise les probabilités de réussir, car elle favorise davantage la formation de canaux d'écoulement préférentiel qui amènent rapidement l'eau en profondeur. Conséquemment, le volume d'eau perdu en dehors de la zone racinaire s'accroît, et ce, parallèlement au risque de lessiver des éléments nutritifs qui sont présents dans la zone racinaire. Cette difficulté d'humecter l'ensemble du volume de sol accessible aux racines vient diminuer le volume d'eau qui serait normalement valorisable par la plante. Du coup, la gestion de l'irrigation se doit de répondre à une demande grandissante en eau de la part de la culture, et ce, avec un volume de sol de plus en plus restreint dans lequel l'eau est retenue.

2.2 Objectif général

Optimiser la gestion de l'eau dans les cultures irriguées par micro-irrigation, et plus particulièrement dans la production de la fraise à jours neutres. Ce projet vise également la promotion d'une agriculture durable en participant à l'avancement des connaissances relatives à l'établissement de bonnes pratiques culturales des points de vue environnemental et agronomique.

2.3 Objectifs spécifiques

- Décrire le mouvement horizontal et vertical de l'eau dans le sol selon le débit par goutteur et l'espacement entre eux en fonction de la durée et de la fréquence des épisodes.
- Prévenir le lessivage des éléments minéraux en limitant le volume d'eau d'irrigation qui atteint la zone de sol inexplorée par les racines.
- Mesurer quantitativement le développement du système racinaire en fonction du mouvement de l'eau dans le sol.
- Vérifier s'il y a un avantage économique à favoriser une stratégie d'irrigation qui permettrait de maintenir un plus grand volume de sol humide accessible à la plante.

3 SURVOL DE LA LITTÉRATURE

3.1 Description du mouvement horizontal et vertical de l'eau dans le sol selon le débit par goutteur et l'espacement entre eux en fonction de la durée et de la fréquence des épisodes d'irrigation

Dépendamment du type de système d'irrigation utilisé pour irriguer la culture végétale, l'eau sera répartie différemment dans le sol selon plusieurs paramètres propres à ces systèmes d'irrigation. Le débit de l'eau emmené sur une surface cultivée, la présence ou l'absence de recoupage de patron d'écoulement d'eau dans le sol ainsi que la durée et la fréquence des périodes d'apport en eau influenceront grandement la culture. Il est donc impératif d'étudier ces paramètres d'irrigation afin d'optimiser les rendements de la culture, de prévenir le gaspillage de l'eau et d'éviter la contamination des nappes d'eau par la perte en profondeur des éléments fertilisants.

3.1.1 Description du mouvement de l'eau par gravité

Le mouvement de l'eau dans le sol est principalement en fonction de la porosité de ce dernier. La littérature définit deux types de pores, soit les macropores et micropores, ayant respectivement comme diamètre une valeur supérieure et inférieure à 0,06 mm (Duval et Simonne, 2003). Le transport de l'eau sera différent selon la porosité du sol. En effet, les macropores ne permettront principalement qu'un mouvement vertical de l'eau occasionné par la gravité (mass flow).

La présence d'écoulement préférentiel permet également un mouvement vertical de l'eau dans le sol. Trois types d'écoulement préférentiel existent, le *bypassing flow*, le *fingering flow* et le *funneled flow* (Miyazaki, 2006). Le *bypassing flow* implique la présence de zones très perméables telles des fissures et macropores qui facilitent l'infiltration de l'eau. Ces dernières doivent être en contact avec la surface du sol ou que la pression de l'eau présente à l'intérieur de ces dernières doit être soit positive (Miyazaki, 2006). Advenant la présence de macropores ou de fissures sous une couche d'eau souterraine, cette dernière s'écoulera de préférence vers ces macropores. Par contre, si la matrice du sol est sous succion (présence d'un potentiel matriciel), l'eau présente demeurera dans la matrice, les macropores étant alors des obstacles à l'écoulement de l'eau dans le sol (Miyazaki, 2006). Des écoulements préférentiels peuvent se former dans un horizon de sol grossier présent sous un horizon de texture plus fine, ces derniers se nomment *fingering flow*. De tels écoulements sont répertoriés sous l'utilisation de l'irrigation par inondation et aspersion (Miyazaki, 2006). Finalement, le *funneled flow* est un écoulement ayant lieu à la base d'un horizon à texture fine incliné recouvrant un deuxième horizon de texture plus grossière (Miyazaki, 2006). Les écoulements préférentiels sont principalement considérés comme des écoulements saturés, de plus, les preuves de l'existence d'écoulements préférentiels non saturés sont rares (Miyazaki, 2006).

3.1.2 Description du mouvement de l'eau par capillarité

Étant donné le faible diamètre des micropores, l'eau peut être retenue par les forces de capillarité et d'adsorption dues aux particules solides, autrement dit le potentiel matriciel (Allaire, 2004). Cette force permet donc un mouvement latéral de l'eau dans un sol (Duval et Simonne, 2003). Cependant, le mouvement latéral de l'eau pourrait être observé en omettant l'effet des micropores. En effet, l'hypothèse qu'une application d'eau possédant un débit supérieur à la capacité de drainage d'un sol, pourrait emmener ce dernier à se saturer progressivement créant un mouvement latéral de l'eau. Par contre, une étude menée par Trout et al. (2005) a démontré que l'utilisation de débits élevés d'irrigation par goutte à goutte agissait plutôt en faveur de la gravité, engendrant ainsi des écoulements préférentiels limitant le mouvement horizontal de l'eau. De leur côté, Wang et al. (2006) ont étudié l'effet d'une même quantité d'eau d'irrigation, mais répartie en différents événements (N1 : chaque jour, N2 : aux 2 jours, N3 : aux 3 jours, N4 : aux 4 jours, N6 : aux 6 jours et N8 : aux 8 jours). Ces auteurs ont observé que plus le traitement appliquait l'ensemble de l'eau dans un même événement (N8), plus un front horizontal d'humectation était observé. Inversement, les traitements répartissant l'eau sur plusieurs événements (N1) humectaient plus faiblement la région supérieure du sol, contrairement au traitement N8, permettant le mouvement d'une plus grande quantité d'eau vers le bas (Wang et al., 2006). Les résultats de ces deux études se contredisent. L'expérimentation de Trout et al. (2005) a été faite dans un loam sableux tandis que celle de Wang et al. (2006) était dans un loam. Ce détail met donc en perspective l'influence du type de sol quant au mouvement de l'eau dans ce dernier.

3.1.3 Description des conditions hydriques saturées et non saturées.

Le mouvement de l'eau dans un sol est très fortement influencé par sa saturation en eau. Afin de décrire ce mouvement, une description du sol est essentielle. Une telle description ne peut être parfaitement représentative d'un sol, surtout un sol hétérogène. Des hypothèses ont donc dû être posées afin d'établir des équations décrivant l'écoulement de l'eau dans de tels milieux et en considérant qu'ils seraient en situations saturées ou non saturées.

Un sol saturé est gorgé d'eau, c'est-à-dire que l'ensemble de la porosité de ce dernier est comblé par de l'eau. L'écoulement en milieu saturé et en régime permanent peut être exprimé selon une approche microscopique et macroscopique. La première approche est décrite par la loi de Poiseuille. Cette dernière indique que le volume s'écoulant en mouvement laminaire dans un tube cylindrique est proportionnel au gradient de pression et à la quatrième puissance du rayon de ce cylindre (Allaire, 2004). La loi de Poiseuille pose plusieurs hypothèses qui la rendent invalide selon la situation. Ces hypothèses sont : 1. une adhérence parfaite du liquide sur la paroi du cylindre; 2. le liquide obéit à la loi de viscosité de Newton; 3. l'accélération du liquide est négligeable; 4. le tube capillaire est droit, homogène et cylindrique sur toute sa longueur et; 5. il y a écoulement laminaire (aucune turbulence) (Allaire, 2004).

L'approche macroscopique est plus simple, car elle ignore les culs-de-sac, formes irrégulières et tortuosité des pores. L'écoulement vertical uniforme est considéré pour une section transversale

réelle et est décrit par la loi de Darcy (Allaire, 2004). Cette dernière permet le calcul de la conductivité hydraulique saturée (K_s). Cependant, tout comme la loi de Poiseuille, la loi de Darcy n'est pas toujours applicable. En complémentarité avec la loi de Darcy, l'équation de continuité (ou loi de conservation de la masse) est utilisée. Cette équation stipule que l'écoulement au travers d'un volume de sol est constant lorsque les quantités d'eau entrantes sont égales aux quantités sortantes (Allaire, 2004). Un sol en milieu saturé peut donc être décrit par plusieurs moyens, il faut toutefois considérer que les résultats obtenus sont fonction d'hypothèses dont l'application est propre à chacun des sols.

Pour un sol non saturé, la porosité est comblée par de l'air et de l'eau, les pores contenant de l'air ne participent donc pas à l'écoulement de l'eau. La vitesse d'écoulement de l'eau dans un tel sol, décrite par la conductivité hydraulique non saturée (K_ψ), est plus lente que dans un sol saturé ($K_s > K_\psi$) (Allaire, 2004). La texture du sol influence grandement K_ψ . En effet, la valeur sera plus grande, à teneur en eau élevée, pour un sable que pour une argile étant donné la plus grande présence de larges pores dans le sable. C'est la loi de Darcy généralisée qui permet de calculer K_ψ . Les équations de Gardner et de Van Genuchten décrivent l'écoulement de l'eau dans un sol non saturé. Tout comme les équations décrivant le mouvement de l'eau en sol saturé, ces dernières sont imparfaites et dépendent de chaque sol.

3.1.4 Systèmes de goutte à goutte disponibles sur le marché

Plusieurs compagnies offrent une importante variété de produits d'irrigation par goutte à goutte. Les deux principaux fabricants mondiaux sont John Deere, pour les produits T-Tape et Ro-Drip, de même que Toro pour Aqua-Traxx et Netafim. Les fabricants Valplastic et Jain ont été aussi répertoriés dans le cadre de ce rapport pour les gammes Tiger Tape et Chapin Tape respectivement. Les gammes principalement retrouvées chez les fournisseurs de produits d'irrigation québécois sont celles des principaux fabricants mondiaux.

3.1.5 Le paradoxe du sol sec hydrophobe

Plusieurs observations sur le terrain font preuve de la difficulté d'humecter un sol ayant une teneur en eau très faible. La mention faite précédemment, c'est-à-dire que la valeur de K_ψ est plus importante pour un sable que pour une argile à haute teneur en eau, devient erronée lorsque cette teneur en eau est faible. Effectivement, le sable contient alors moins de micropores remplis d'eau, comparativement à l'argile, faisant donc diminuer la valeur de K_ψ du sable (Allaire, 2004). Si l'eau ne voyage pas dans les micropores, elle ira nécessairement dans les macropores et lessivera en profondeur, n'humectant donc pas latéralement le sol.

3.2 Prévenir le lessivage des éléments minéraux en limitant le volume d'eau d'irrigation qui atteint la zone inexplorée par les racines

Le système racinaire est la partie de la plante qui capte le mieux les éléments nutritifs présents dans la solution du sol. Outre les racines, la microfaune et la microflore du sol pourront également capter de ces éléments nutritifs. Finalement, une autre portion de ces éléments pourra être adsorbée sur la partie solide du sol, selon sa texture. Malgré ces capacités de rétention des éléments fertilisants, la solution du sol qui les contient peut échapper à ces prélèvements, majoritairement causés par le système racinaire des plantes. Une solution riche en éléments fertilisants, observable lors de fertigation, a davantage à traverser la zone racinaire de la culture. Ce faisant, un maximum d'éléments fertilisants pourra être capté par la plante, en laissant ainsi une quantité négligeable en profondeur n'ayant que peu d'impact environnemental.

3.2.1 Diamètre et taille des racines en fonction de leur capacité d'absorption des éléments minéraux

Les végétaux assimilent les nutriments nécessaires à leur croissance par l'absorption de l'eau au niveau du système racinaire. Certaines parties de ce système sont plus aptes à cette tâche, rendant une caractérisation des racines importante. L'extrémité, ou pointe, de la racine (*root tip*) est importante dans l'absorption de l'eau. Cette dernière possède un capuchon (*root cap*) sécrétant du mucigel, une substance visqueuse agissant comme protection/lubrification et jouant un rôle dans l'absorption de l'eau et des nutriments (Moore et al., 1998). Le mucigel provoque une agglutination des particules de sol, augmentant ainsi le contact sol-racine et maintenant la continuité entre les racines et l'eau du sol. Le mucigel contient des groupements carboxyles influençant l'absorption d'ions. De plus, des acides organiques, toujours présents dans le mucigel, rendent certains ions plus disponibles pour la plante (Moore et al., 1998). La zone de maturation cellulaire de la racine, débutant de 1 à 5 cm de la pointe de la racine, est recouverte de poils absorbants (jusqu'à 40 000 poils/cm²) qui permettent une hausse importante, plusieurs milliers de fois, de la surface spécifique d'absorption des racines. Ces poils absorbants sont un prolongement de l'épiderme de la racine et ont une dimension inférieure à 1 mm de longueur, ils sont donc présents sur l'ensemble du système racinaire.

Même si les poils absorbants se trouvent sur l'ensemble du système racinaire, la majorité de l'absorption de l'eau et des nutriments s'effectue par ces derniers dans la zone de maturation mentionnée précédemment (Moore et al., 1998). Les extrémités des racines, d'une longueur d'environ 5 cm, sont donc les zones responsables de la majorité de l'absorption des nutriments et de l'eau de la plante. Une étude de Gao et al. (1998) arrive à des conclusions semblables. La région située derrière le méristème de la racine a une plus grande capacité d'absorption des nutriments que les segments plus âgés, qui conservent néanmoins une certaine capacité d'absorption. Les racines mesurées possédant un diamètre plus faible sont les plus susceptibles à être la portion du système racinaire la plus efficace. L'absorption de l'eau et des nutriments se verra diminuée advenant le cas d'une croissance secondaire des racines, produisant du xylème et du phloème secondaire ainsi que du périoderme (Moore et al., 1998). Donc, plus le diamètre de la racine sera important, plus la possibilité de croissance secondaire sera élevée, entraînant une diminution d'absorption de l'eau et des nutriments.

3.2.2 Mouvement du potassium (K) par « mass flow »

Les différents éléments nutritifs (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, S, etc.) se trouvant dans le sol possèdent plusieurs états, lesquels sont dépendants du milieu où ils se trouvent. Ces différents états vont influencer la mobilité de ces éléments ainsi que leur absorption par le système racinaire des plantes. Afin qu'il soit assimilable par les plantes, le potassium (K) doit être sous sa forme échangeable, c'est-à-dire sous forme de sels solubles K^+ (Goulet, 2001). En étant dans la solution du sol, l'ion libre K^+ subit une lixiviation, c'est-à-dire une migration descendante dans le profil de sol (Goulet, 2001). L'absorption de la solution du sol par le système racinaire permet donc l'assimilation du K par la plante. Une étude de Mengel et Von Braunschweig (1972) a démontré que l'absorption du K par des plants de maïs était beaucoup plus efficace à de faibles tensions, avec les plus hauts rendements à une valeur de 2 pF ou 10 kPa. Une relation linéaire fortement significative entre les taux de diffusion du K et l'absorption totale du K par les plants de maïs a été observée. La baisse de rendement provoquée par des valeurs de tension plus élevées est engendrée par une disponibilité réduite du K, causée par une diffusion restreinte de cet élément. Le taux de diffusion dépend donc principalement de la teneur en eau du sol et de la quantité de K présent dans la solution du sol (Mengel et Von Braunschweig, 1972).

3.3 Mesurer quantitativement le développement du système racinaire en fonction du mouvement de l'eau dans le sol

Dépendamment du type d'irrigation, l'eau s'écoulera à différents niveaux latéralement et profondément. Une connaissance du développement des racines en fonction du mouvement de l'eau dans le sol est importante afin de déterminer la limite du système racinaire et de ne pas emmener une portion de l'eau d'irrigation dans une zone où aucun prélèvement racinaire n'aura lieu.

3.3.1 Le développement des racines en fonction de la quantité d'eau d'irrigation

L'étude de Wang et al. (2006) a permis d'observer la distribution des racines dans un sol sous une culture de pommes de terre irriguée à différentes fréquences (N1 à N8, voir section 1.2). Différentes profondeurs ont été étudiées, soit les 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 et 40-60 cm à partir de la surface. Pour l'ensemble des traitements, la majorité des racines se retrouvait dans la couche 0-10 cm. La densité des racines (autant exprimée par longueur que par masse) était semblable aux profondeurs 10-20, 20-30 et 30-40 cm pour tous les traitements, excepté N1 et N2 qui montraient des valeurs plus importantes. Les racines à ces profondeurs n'ont donc pas été influencées par la fréquence d'irrigation, si elle était inférieure à une irrigation par deux jours (Wang et al., 2006). La densité de longueur racinaire (*root length density*) pour l'ensemble du profil de sol (0-60 cm) était plus importante pour le traitement N1 ayant la fréquence d'irrigation la plus importante. Par contre, la densité de masse racinaire observée (*root weight density*) était la plus faible pour le traitement N1 et augmentait avec une diminution de la fréquence d'irrigation (N8 ayant la plus importante valeur). L'auteur convient que ces résultats sont

contradictoires, mais cette tendance a déjà été observée ailleurs dans la littérature, poussant plusieurs chercheurs à utiliser la densité de longueur racinaire pour l'étude des systèmes racinaires (Wang et al., 2006). La distribution des racines a également été analysée selon différents éloignements du rang de culture, soit directement sous le plant, à 10, 20, 30 et 40 cm. Majoritairement les racines se retrouvaient sous le plan et les traitements n'avaient pas d'effet sur leur distribution horizontale des couches de sol supérieures. Cependant, une plus grande densité des racines a été retrouvée à 40 cm du plant dans l'horizon 20-30 cm du traitement N8. Cette valeur peut être expliquée par le fait que le sol n'était pas assez sec pour restreindre le développement des racines lors des périodes de stress hydrique (Wang et al., 2006).

Une étude menée sur la culture de la tomate a permis des observations sur la distribution des racines dans un profil de sol en fonction du traitement d'irrigation. Les traitements consistaient au déclenchement de l'irrigation à différentes valeurs de potentiel matriciel du sol (-10, -20, -40 et -60 kPa) (Oliveira et al., 1996). Les résultats démontraient une diminution de l'intensité de la longueur des racines en fonction de la diminution des applications en eau par l'irrigation. Des différences significatives pour l'intensité de la longueur des racines aux différentes profondeurs ainsi que pour l'interaction entre les traitements et les profondeurs ont été observées. Le patron de distribution des racines dans le profil de sol démontrait une diminution d'ordre exponentiel par rapport à l'augmentation de la profondeur. Par contre, d'autres études rapportaient des diminutions beaucoup moins accentuées avec l'augmentation de la profondeur (Oliveira et al., 1996). La distribution des racines aux diverses profondeurs était significativement différente entre les traitements plus secs (-60 kPa) et plus humides (-10 kPa). Pour des tranches de 10 cm de profondeur, allant jusqu'à 40 cm, le traitement humide possédait toujours plus de racines. Par contre, les traitements intermédiaires (-20 et -40 kPa) étaient significativement semblables au traitement humide ou au traitement sec, dépendamment des profondeurs (Oliveira et al., 1996).

Les racines peuvent croître en fonction de la quantité d'eau appliquée pour la culture. Dans des conditions de limitation des quantités d'eau d'irrigation utilisées, les racines tendent à se développer plus en profondeur et en augmentant leur densité (Kang et Zhang, 2004; cités dans Shahnazari et al., 2007). Ces résultats ont pu être observés dans plusieurs études faites sur un traitement d'irrigation dit d'assèchement partiel des racines ou PRD (*partial rootzone drying*).

3.4 Avantage économique à favoriser une stratégie d'irrigation permettant le maintien d'un plus grand volume de sol humide accessible à la plante

En humidifiant le plus grand volume de sol accessible au système racinaire d'une culture, la quantité d'eau pouvant être stockée est proportionnelle à ce volume. Plus ce réservoir d'eau est important, plus la culture aura accès à de l'eau à plus long terme, faisant ainsi diminuer la fréquence à laquelle une irrigation devra être faite.

3.4.1 Le rendement en fonction de l'eau disponible

L'étude de Wang et al. (2006) a comparé diverses fréquences d'irrigation pour une même quantité d'eau. Selon cette étude, il serait plus avantageux d'irriguer fréquemment avec de petits volumes d'eau (N1) que de faire une seule application à un volume plus important (N8). Cette étude démontrait que pour la culture de la pomme de terre, une régie à fréquence plus élevée (N1) emmenait une humification du sol plus en profondeur et se traduisait en de meilleurs rendements. Effectivement, les rendements des deux années de production sous les traitements N1 et N8 ont été significativement différents (Wang et al., 2006). En comparant ces deux traitements, une diminution des rendements de 33,4 et 29,1 %, pour la première et deuxième année respectivement, est observable selon la fréquence d'irrigation du traitement N1 vers celle du traitement N8 (Wang et al., 2006).

Une étude sur l'irrigation par goutte à goutte dans la culture de pommes de terre a pu démontrer une relation entre la quantité d'eau d'irrigation appliquée et le rendement en tubercules par plant (Yuan et al., 2003). Cinq traitements d'irrigation, représentant 0,25, 0,50, 0,75, 1,00 et 1,25 fois l'évapotranspiration (E_p) des plants de pommes de terre, ont été étudiés afin de déterminer une quantité d'eau d'irrigation procurant les meilleurs rendements. Cette étude a démontré qu'une application plus importante d'eau d'irrigation, c'est-à-dire de 0,25 à 1,25 E_p , faisait croître les rendements autant par le nombre de tubercules produits que par leur poids moyen. Cependant, une plus grande incidence des maladies était également observée pour le traitement apportant le plus d'eau (Yuan et al., 2003).

Toujours pour la culture de la pomme de terre, une étude a démontré l'efficacité d'un traitement PRD, ayant produit des rendements semblables à une irrigation conventionnelle (Shahnazari et al., 2007). Comparativement à une régie d'irrigation standard, le PRD a la particularité de maintenir les rendements tout en diminuant la quantité d'eau utilisée. Ainsi, les résultats de l'étude indiquent une réduction de 30 % d'eau, représentant 61 mm. Contrairement à plusieurs études, dont celle de Yuan et al. (2003) citée précédemment qui indique une relation linéaire entre la perte de rendement de pommes de terre et la quantité d'eau appliquée, le PRD permet une conservation des rendements malgré la diminution d'eau emmenée à la culture (Shahnazari et al., 2007).

Un sol maintenant un maximum de son volume à une teneur en eau près de la capacité au champ, et accessible au système racinaire, permettra de meilleurs rendements à la culture. L'étude de Oliveira et al. (1996) arrive à cette conclusion en observant des rendements plus importants pour des tomates. Les rendements, la taille des fruits et la croissance des racines se sont avérés plus importants dans un sol maintenu à des potentiels matriciels de -20 et -10 kPa, correspondant à 65 et 85 % de la teneur en eau à la capacité au champ (Oliveira et al., 1996).

3.4.2 Méthodes d'évaluation des besoins en eau des cultures : Réflectométrie métallique et tensiométrie

Il existe plusieurs méthodes permettant de décrire la présence d'eau dans le sol. Parmi ces méthodes, deux sont particulièrement utilisées, la réflectométrie métallique, permettant de mesurer la teneur en eau (θ), et la tensiométrie, mesurant le potentiel (ψ) de l'eau dans le sol. Il convient de faire la distinction entre ces deux méthodes.

La teneur en eau peut être exprimée en base massique (θ_g : g d'eau/g de sol sec) ou volumique (θ_v : cm³ eau/cm³ volume apparent). La réflectométrie métallique, ou *time domain reflectometry* (TDR), permet de mesurer indirectement θ_v grâce à la relation entre la teneur en eau et la conductivité électrique de l'eau (K_a) (Allaire, 2004). Plus K_a est grand, plus la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique est faible (air : $K_a=1$, sol sec : $K_a=3-5$, eau : $K_a=80$) (Lamhamedi et al., 2002). Selon Allaire (2004), « *la réflectométrie consiste à envoyer une onde électromagnétique au travers d'un câble coaxial terminé par trois électrodes enfoncées dans le sol et à estimer la vitesse de propagation de l'onde dans les électrodes. C'est la constante diélectrique du sol qui régit la vitesse à laquelle l'onde se propage. Cette constante est affectée par la teneur en eau du milieu. Ainsi, selon la teneur en eau du sol, la vitesse de l'onde sera plus ou moins ralentie comparativement à sa vitesse à la sortie de l'appareil* ». L'utilisation de sondes TDR est avantageuse, car elles permettent des lectures en continu très précises et sont non destructrices du milieu. Cependant, de tels appareils sont dispendieux et nécessitent de l'entraînement pour l'interprétation du signal produit (Allaire, 2004). La teneur en eau volumique déterminée par les sondes TDR n'est pas dépendante du type de sol, contrairement à la teneur en eau pondérale (θ_g).

Le potentiel de l'eau fait référence à l'énergie potentielle. Selon le principe de thermodynamique universelle, mentionnant qu'un corps tend à abaisser son niveau énergétique le plus possible, l'eau s'écoulera d'un milieu d'énergie potentielle élevée vers un autre ayant une énergie potentielle faible (Allaire, 2004). Il existe différentes sortes de potentiel; celui mis à profit dans l'utilisation des tensiomètres est le potentiel matriciel (ψ_m). Ce dernier correspond aux forces de capillarité et d'adsorption des particules solides présentes dans le sol. Selon Allaire (2004), « *un tensiomètre consiste en une céramique poreuse saturée d'eau au bout d'un tube d'accès bouché hermétiquement et connecté à un manomètre. Lorsque cette céramique est en contact avec le sol, l'eau se déplace du tube vers le sol, créant un certain vide à l'intérieur du tube jusqu'à l'atteinte d'un équilibre, signifiant que le potentiel total est équivalent dans le tube et le sol* ». La tension ainsi mesurée correspond au potentiel. Cet appareil est simple, robuste et facilement utilisable et les lectures sont facilement interprétables. L'efficacité du tensiomètre est cependant moindre en sol sec, il perturbe le milieu dans lequel il est inséré et possède un temps de réponse lent (Allaire, 2004).

Ces deux appareils mesurent des variables complètement différentes qu'il faut savoir interpréter adéquatement. La réflectométrie métallique mesure quantitativement l'eau présente dans un volume donné indépendamment du type de sol, et le tensiomètre mesure la force à laquelle l'eau est retenue par la matrice du sol.

3.5 Conclusion

Le mouvement de l'eau dans le sol est une notion complexe résultant de plusieurs lois physiques et d'hypothèses émises afin de simplifier la compréhension des divers paramètres intervenant dans cette situation. Encore de nos jours, l'exercice de caractérisation de l'hydrodynamique d'un sol reste ardu.

La problématique d'assèchement du sol en cultures irriguées avec un système goutte à goutte existe et demeure un sujet d'intérêt auprès des producteurs. L'utilisation d'outils de mesure, tels les tensiomètres et sondes à réflectométrie métallique (TDR), permet une caractérisation partielle de l'écoulement de l'eau dans le sol utile à la détermination d'un système d'irrigation optimal. Afin d'établir un tel système d'irrigation, les producteurs québécois ont accès à une bonne diversité de produits d'irrigation, tels différents tubes de goutte à goutte offrant une gamme d'espacement entre les goutteurs ainsi que plusieurs débits d'utilisation. Dépendamment des types de sol, les systèmes d'irrigation auraient avantage à fournir un volume d'eau plus important, réparti en plusieurs épisodes d'irrigation afin de favoriser une humidification du sol dans son ensemble (autant horizontale que verticale), évitant ainsi la problématique d'assèchement. Grâce à une teneur en eau bien répartie à l'intérieur du sol, les racines des plants cultivés croîtront plus efficacement dans l'ensemble du sol et pourront absorber en volume et quantité supérieure l'eau et les nutriments nécessaires à leur croissance. L'efficacité d'absorption des racines se définit principalement par la présence de poils absorbants. La section la plus efficace pour cette tâche se trouve à environ 5 cm de l'apex racinaire. Une culture croissant dans un sol bien humidifié aura un potentiel de rendement supérieur comparativement à une deuxième située sur un sol possédant une réserve d'eau utile plus faible.

D'autres études doivent se pencher sur la problématique d'assèchement du sol sous une régie d'irrigation par goutte à goutte. De telles études devraient évaluer les caractéristiques physiques du sol provoquant cette situation et s'attarder à l'établissement de régies d'irrigation pouvant pallier ce problème.

4 MATÉRIEL ET MÉTHODE

4.1 Site expérimental

Le dispositif expérimental utilisé pour cette expérimentation était situé dans un champ en production commerciale de fraises à la Ferme François Gosselin. Cette entreprise est localisée à Saint-Laurent, Ile-d'Orléans (Québec).

4.2 Matériel végétal et régie de culture

Le cultivar utilisé pour les expérimentations était Seascape. Les fraisiers étaient cultivés sur butte de sol recouvert de paillis de plastique noir. Hormis les apports en eau par l'irrigation et les apports en fertilisants par la fertigation, la régie de culture était celle du producteur et sous sa responsabilité (travail du sol, implantation, fertilisation granulaire et traitements phytosanitaires).

4.3 Traitements

La première année du projet, 12 stratégies d'irrigation (traitements) étaient à l'étude, ce nombre est ensuite passé à 6 pour la dernière année (Tableau 1). Les traitements utilisaient des tubes de goutte à goutte de la marque Aqua-Traxx[®] (modèles EAXxx0834, EAXxx1234, EAXxx0650, EAXxx0850, EAXxx1245, EAXxx0867 et EAXxx04134) et Netafim[®]. Les stratégies d'irrigation à l'essai varient en fonction de plusieurs facteurs :

- L'espacement entre les goutteurs;
- Le volume d'eau appliqué par épisode d'irrigation;
- Le volume d'eau appliqué par minute sur la longueur d'une parcelle;
- La durée d'irrigation.

En 2009, 11 stratégies d'irrigation ont pu être générées avec les 7 modèles de tube de goutte à goutte Aqua-Traxx[®] utilisés, et ce, avec différentes pressions d'utilisation (0,55, 0,69, 0,83 et 1,03 Bar ou, respectivement 8, 10, 12 et 15 PSI), des volumes d'eau appliqués (25 à 50 litres par 10 m linéaires) et la répartition des apports en eau dans le sol selon l'espacement entre les goutteurs (entre 10 et 30 cm ou 4 à 12 po.).

En 2010, les 6 stratégies retenues qui ont été comparées sont issues de 5 modèles de tube de goutte à goutte retenus (4 Aqua-Traxx[®] et 1 Netafim[®]). Le recours à un témoin humide (TH) diffère des autres traitements par l'utilisation de deux tubes de goutte à goutte. Ces derniers étaient situés de part et d'autre du centre de la butte (20 cm) et à 2,5 cm de profondeur. Ce traitement a été utilisé afin de vérifier les impacts sur le rendement d'une humidification potentiellement plus uniforme à l'intérieur de la butte de sol.

La consigne de déclenchement du système d'irrigation était la même pour l'ensemble des traitements (12 cbar ou kPa), exception faite du T6 de 2010 qui était irrigué avec une consigne de 25 kPa. En 2010, une contrainte d'un épisode d'irrigation par parcelle par jour a été respectée. Comme les irrigations sont gérées spécifiquement pour chacune des parcelles, un tensiomètre (modèle Tx80, Hortau) a été installé dans la zone racinaire des plants. Les mesures effectuées par ces tensiomètres ont été enregistrées en temps réel et en continu, pour les deux saisons.

Tableau 1. Caractéristiques des traitements à l'étude en 2009 et 2010.

Traitement (#)	Modèle EAXxx	Pression (kPa)	Temps (min.)	Esp. (cm)	Vol. (L)	Débit (litre par minute)	
						Par goutteur	Par parcelle
Saison 2009							
T1	0834	55	60	20	25	0,008	0,4
T2	1234	55	60	30	25	0,012	0,4
T3	0650	55	60	15	37	0,009	0,6
T4	0850	55	60	20	37	0,012	0,6
T5	1245	69	60	30	37	0,018	0,6
T6	0650	103	60	15	50	0,012	0,8
T7	0867	55	60	20	50	0,017	0,8
T8	1245	103	60	30	50	0,024	0,8
T9	1234	83	60	30	31	0,015	0,5
T10	0867	103	45	20	50	0,022	1,1
T11	04134	55	30	10	50	0,017	1,6
T12	Netafim	83	60	30	31	0,017	0,5
Saison 2010							
T1	0834	55	40	20	12	0,008	0,3
T6	0650	103	30	15	18	0,012	0,6
T7	0867	55	20	20	12	0,017	0,6
T11	04134	55	20	10	24	0,017	1,2
T12	Netafim	83	30	30	12	0,017	0,4
TH	0834 (2x)	55	40	20	24	0,008	0,6

4.4 Dispositif expérimental et analyses statistiques

L'expérimentation s'est déroulée durant les saisons de culture 2009 et 2010, dans des champs distincts, avec des fraisiers nouvellement implantés, respectivement le 15 et le 7 mai. Le dispositif expérimental de la première saison était un plan en blocs complets aléatoires avec 12 traitements et 3 blocs pour un total de 36 unités expérimentales ou parcelles d'une longueur de 10 mètres chacune (Figure 1). De plus, la zone de récolte, composée de 24 fraisiers, était située au centre de chacune des 24 parcelles. Au total, c'est la production en fruits de 864 plants qui a été récoltée, et ce, tout au long de la saison.

En 2010, comme pour la saison précédente, le recours aux blocs était motivé par l'aspect longitudinal du dispositif. Conséquemment, le dispositif était un plan en blocs complets aléatoires avec 6 traitements et 4 blocs pour un total de 24 unités expérimentales d'une longueur de 7 mètres (Figure 2). Des zones de récolte identiques à celles de 2009 étaient utilisées, c'est alors la production en fruits de 576 fraisiers qui a été récoltée.

L'analyse de la variance a été effectuée avec la procédure MIXED de SAS.

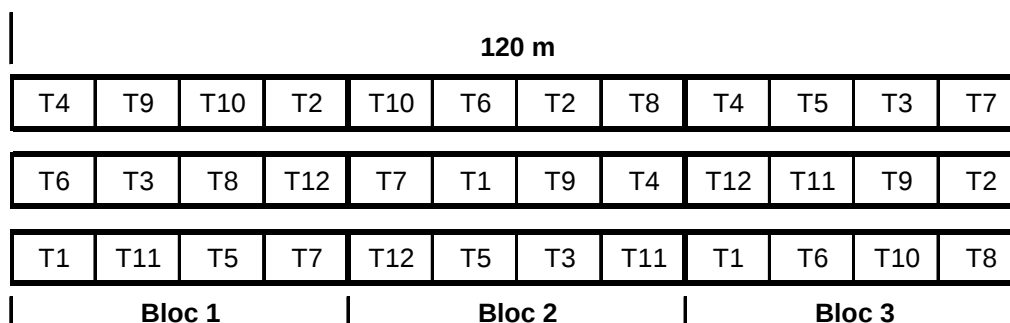


Figure 1. Plan du dispositif expérimental en 2009.

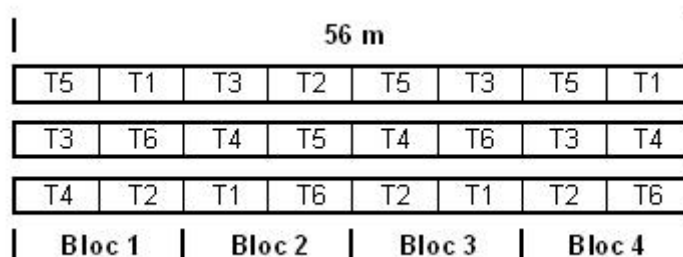


Figure 2. Plan du dispositif expérimental en 2010.

4.5 Collecte des données

4.5.1 Caractérisation du site

En 2009 et 2010, les analyses de sol ont été réalisées sur des échantillons composites prélevés dans la strate de sol 0-20 cm dans chacune des parcelles. Les sols ont été tamisés à 2 mm puis séchés à l'air à 21 °C. La granulométrie a été déterminée par la méthode de l'hydromètre en six points suivis d'un tamisage des sables (Gee et Bauder, 1986). Le pH_{eau} a été mesuré dans un rapport sol/eau 1:1 (Conseil des Productions Végétales du Québec, 1988). Le contenu en MO totale a été mesuré selon la méthode d'oxydation par voie humide de Walkley Black (Allison, 1965). Le N_{tot} , préalablement extrait par digestion Kjeldahl, a été déterminé par colorimétrie sur autoanalyseur Technicon (McGill et Figueiredo, 1993). Le P et les éléments mineurs ont été extraits dans une solution Mehlich-3 (Tran et Simard, 1993) et dosés à l'ICP optique. Des échantillons de sol non perturbé ont également été prélevés dans chacun des blocs afin d'établir en laboratoire les courbes de désorption en eau des sols (Topp et al., 1993). L'information obtenue de ces courbes a permis de caractériser certaines propriétés physiques du sol, servant entre autres à identifier les consignes d'irrigation relatives aux différents traitements.

4.5.2 Conditions météorologiques

La pluviométrie (pluviomètre HOBO, modèle RG3-M) a été mesurée tout au long des saisons ainsi que la température et l'humidité relative de l'air ambiant avec des acquyseurs de données HOBO Pro v2 (modèle U23-001) en 2009. Au printemps 2010, l'ajout d'une station météorologique a permis de mesurer la température et l'humidité relative (HC-S3, Campbell Scientific), les épisodes de pluie (*Leaf wetness sensor*, Model 237 Campbell Scientific), la radiation solaire (LI-200SZ, LI-COR) ainsi que la vitesse et la direction du vent (*Wind monitor*, Young Model 05103-10) (mesures moyennes enregistrées aux 15 minutes provenant de mesures effectuées aux 15 secondes).

4.5.3 Tension du sol des parcelles expérimentales

La tension de l'eau dans le sol de chacune des parcelles expérimentales a été mesurée tout au long du projet avec des tensiomètres Hortau (modèle Tx80) afin de gérer les épisodes d'irrigation. Toutes ces données étaient enregistrées en temps réel dans un ordinateur à l'aide du logiciel Irrolis-Light (version 1.9) de Hortau, afin d'effectuer des analyses quant à l'efficacité des différents traitements d'irrigation.

4.5.4 Teneur en eau volumique

L'intérieur de la butte de sol des parcelles expérimentales du bloc 2 (2009) et des blocs 2 et 3 (2010) était muni de 8 sondes TDR CS605-L ou CS610-L de Campbell Scientific mesurant en temps réel et en continue (mesures ponctuelles aux 5 minutes entre 6h et 18h et aux heures entre 18h et 6h) la valeur de la teneur en eau volumique (cm^3 d'eau/ cm^3 de sol) (Figure 64). Les données produites étaient enregistrées dans un acquyseur de données CR1000 de Campbell Scientific. Ces dernières étaient recueillies au moins une fois par semaine pour sauvegarde et interprétation. Ces données ont permis de déterminer les zones de sol de la butte qui étaient influencées par les irrigations.

4.5.5 Stades phénologiques

Pour chacune des parcelles, il y avait un fraisier témoin sur lequel le taux de croissance des feuilles et des inflorescences (cymes bipares) était mesuré. La fréquence des observations, du 12 juin au 5 octobre 2009 et du 27 mai au 30 septembre 2010, était faite en fonction du niveau de croissance des plants (environ une fois par semaine pour le début et la fin de la saison, puis une fois aux trois jours pour la période de croissance maximale des plants).

4.5.6 Développement des fruits

Dès que le producteur a cessé de retirer les inflorescences (mi-juin), un suivi pour le développement des fruits a débuté (22 juin 2009 et 15 juin 2010). Une fois par semaine, un maximum de cinq fleurs nouvellement ouvertes était identifié dans chacune des parcelles expérimentales avec des rubans adhésifs de différentes couleurs. Ce suivi a permis de mesurer le temps nécessaire à la production d'une fraise (de l'ouverture de la fleur à la récolte du fruit).

4.5.7 Développement du système racinaire

La méthode utilisée pour mesurer la distribution et la densité racinaire a été inspirée de celle présentée par Munoz-Arboleda et al., 2006. Une « trancheuse » de sol a été fabriquée avec deux plaques d'acier maintenues à 10 cm l'une de l'autre à l'aide de blocs de bois. La largeur des plaques était de 76,20 cm, soit la largeur d'une butte de sol, alors que la hauteur servant à l'échantillonnage était de 30,48 cm. Positionnée sur le fraiser, préalablement coupé à la hauteur du sol, la « trancheuse » était enfoncée dans la butte de sol à l'aide de coups de masse (Figure 3).



Figure 3. Prélèvement d'une tranche de sol à l'automne.

Par la suite le pourtour de la trancheuse était déterré et sorti délicatement du sol et placé à l'horizontale. La plaque située sur le dessus était alors enlevée et les 14 zones de sol étaient « découpées » selon le patron présenté à la Figure 4 et placé dans un sac de plastique qui était entreposé à 4 °C jusqu'au tamisage. Cette opération était réalisée à la mi-octobre. Ces 14 zones correspondent également aux emplacements des sondes TDR. Il est à noter que le prélèvement était réalisé de sorte qu'un fraiser soit toujours vis-à-vis la zone 13 (patron de plantation en quinconce).



Figure 4. Tranche de sol avec délimitation des 14 zones.

Le volume théorique des 14 zones varie entre 1147 et 1949 cm³. Toutefois, avant le tamisage des échantillons de sol, le volume de sol réel était mesuré en plongeant le sac dans un volume d'eau connu. Cette valeur est importante afin de connaître la densité des racines par cm³ de sol. Le volume réel peut varier du volume théorique, car les plaques d'acier ont tendance à se distancer vers le bas de la trancheuse. De plus, les zones 11 et 14 pouvaient varier selon l'état de la butte de sol. Les blocs de sol (zones 1 à 14) étaient ensuite passés dans 2 tamis superposés (diamètre des mailles de 9,5 et 2 mm) avec de l'eau. Les racines étaient alors récupérées à la main sur les tamis et entreposées dans une solution d'azide de sodium à 4 °C jusqu'à la numérisation des échantillons. Les échantillons étaient analysés à l'aide du logiciel WinRHIZO de Regent Instruments où chacun des segments de racines fut caractérisé selon sa longueur et son diamètre (Figure 5).

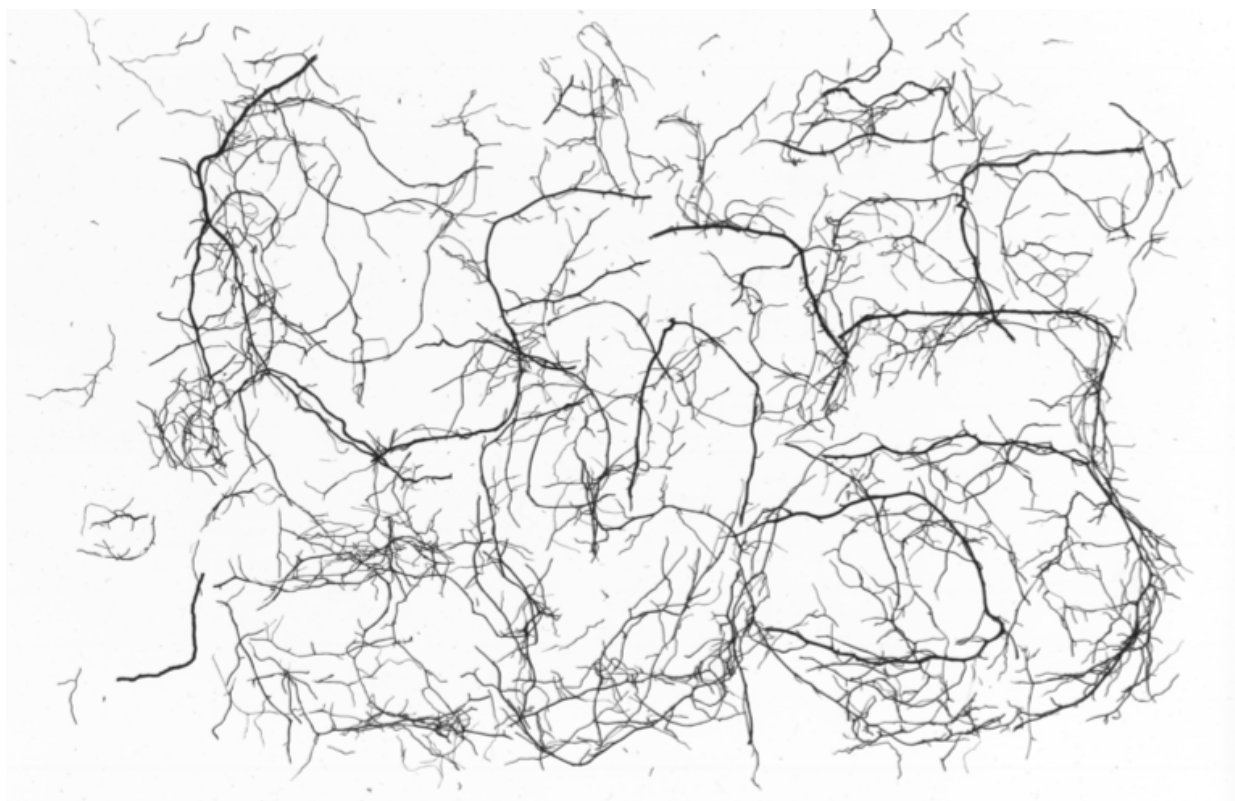


Figure 5. Image de la numérisation d'une portion des racines dégagées d'une zone de sol effectué avec le logiciel WinRHIZO.

4.5.8 Récolte

En 2009, la récolte des fruits a débuté durant la semaine du 6 juillet pour se terminer le 5 octobre. L'année suivante, les premiers fruits mûrs ont été récoltés le 28 juin et les derniers, le 8 octobre. La récolte des fruits était effectuée selon le calendrier du producteur, soit aux deux ou trois jours dépendamment des conditions météorologiques, des traitements phytosanitaires et du mûrissement des fruits. Les fruits étaient pesés et classés en trois catégories : vendables, petits et non vendables. Les fruits qui avaient un poids inférieur à 6 g (petits) ou qui avaient des défauts (biotiques et abiotiques) étaient considérés comme non vendables.

5 RÉSULTATS ET ANALYSE

5.1 Résultats obtenus et analyse en fonction des objectifs spécifiques

5.1.1 Décrire le mouvement horizontal et vertical de l'eau dans le sol selon le débit par goutteur et l'espacement entre eux en fonction de la durée et de la fréquence des épisodes.

Dépendamment du type de système d'irrigation utilisé, l'eau sera répartie différemment dans le sol, et ce, selon plusieurs paramètres propres à ces systèmes. Le débit d'eau apporté pour une superficie donnée, la présence ou l'absence de recoupage de patron d'écoulement d'eau dans le sol ainsi que la durée et la fréquence des périodes d'apport en eau sont autant de facteurs qui peuvent affecter la culture.

Pour l'année 2009, 12 traitements d'irrigation étaient à l'étude (Tableau 1). Des sondes à réflectométrie métallique (TDR) ont été utilisées pour mesurer en temps réel la teneur en eau volumique du sol (cm^3 d'eau par cm^3 de sol). Le suivi de cette teneur était réalisé dans la moitié de la butte (largeur) selon 7 zones (Figure 64). De plus, un suivi était effectué à 38 cm de profondeur sous le tube de goutte à goutte afin de déterminer la vitesse d'écoulement hydrique à l'intérieur du profil. Un total de 96 sondes a été nécessaire pour réaliser un suivi dans les 12 traitements. Afin de caractériser le mouvement horizontal et vertical de l'eau dans le sol (demi-butte), les variations de la teneur en eau volumique ont été mesurées et ces dernières sont représentées aux figures suivantes.

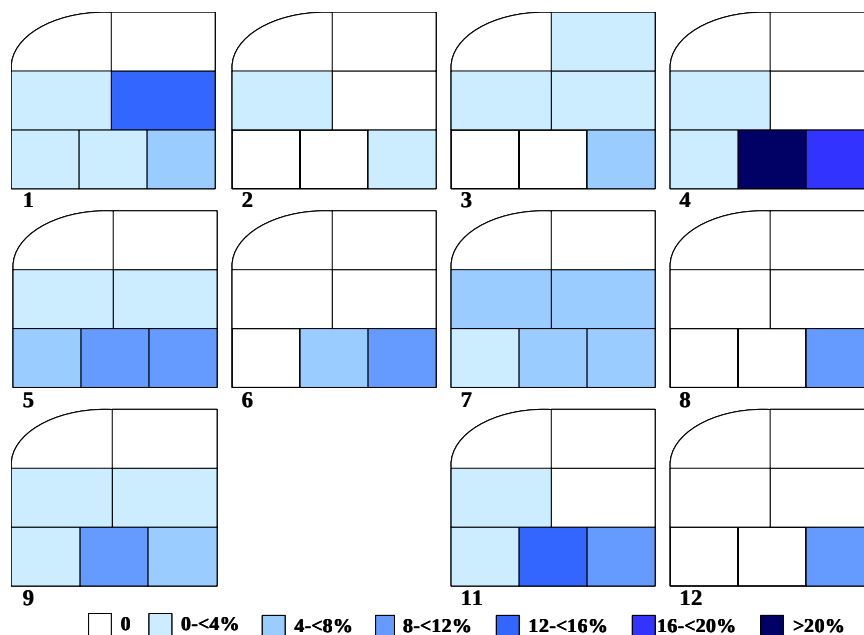


Figure 6. Patron de variation moyens de la teneur en eau volumique du sol selon les 7 zones de suivi des traitements pour l'ensemble de la saison 2009.

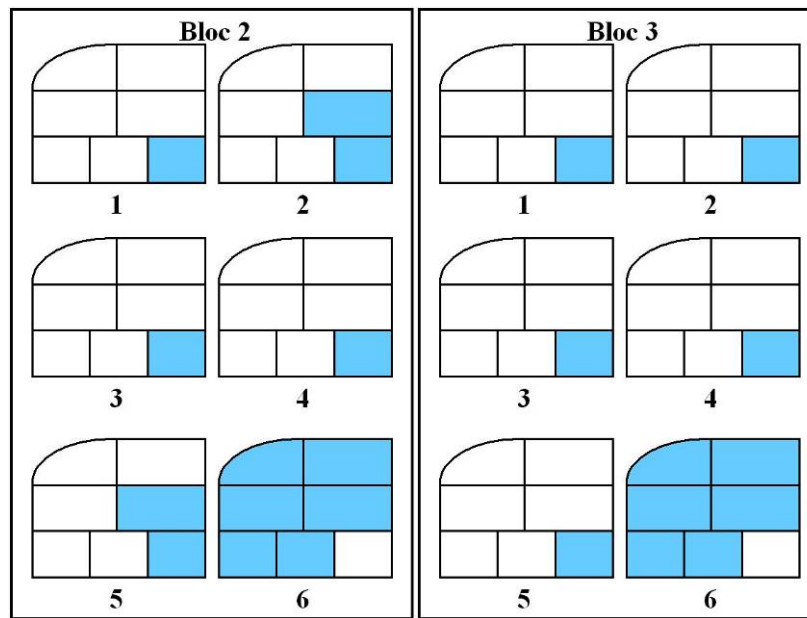


Figure 7. Patrons de variation moyens de la teneur en eau volumique du sol selon les 7 zones de suivi des traitements pour l'ensemble de la saison 2010.

Habituellement, lorsqu'une variation de la teneur en eau était observée à l'intérieur d'une zone de sol lors d'une irrigation, il en était de même pour tous les épisodes d'irrigation subséquents. La majorité des traitements de 2009 a démontré un patron de variation de la teneur en eau qui lui était propre, faisant ainsi ressortir une différence entre les traitements. Notons que l'absence de résultats pour le traitement 10 est conséquente à un problème technique du réseau des sondes TDR. Les traitements où une variation de la teneur en eau du sol a été observée, dans un plus grand nombre de zones, sont les T1, T3, T4, T5, T7 et T9. Alors que l'ampleur des variations mesurées était plus élevée pour les T1, T4 et T11 (ces variations n'ont pas été démontrées statistiquement). Cependant, ces traitements ne possèdent pas une caractéristique commune pouvant expliquer l'ampleur de cette réponse aux irrigations. Le T5, où la réponse aux apports d'eau d'irrigation est la plus importante, est caractérisé par un espacement entre les goutteurs de 30 cm (12 po.) et un volume d'eau appliqué par épisode d'irrigation de 31 litres, soit une valeur intermédiaire aux traitements qui en appliquent 25 ou 50 litres. Ces diverses réponses aux irrigations selon les traitements pourraient être partiellement expliquées par des hétérogénéités texturales du sol présentes à l'intérieur du dispositif expérimental.

En 2010, les 6 traitements à l'étude ont démontré les variations de la teneur en eau volumique représentées à la Figure 7. Tel qu'elles y sont illustrées, ces dernières n'ont été observées qu'au centre de la butte de sol, directement sous l'apport d'eau (contact entre le sol et le goutteur), pour les traitements n'utilisant qu'un tube de goutte à goutte (T1, T6, T7, T11, T12). Malgré les diverses caractéristiques de ces traitements, leurs patrons de variation de la teneur en eau volumique sont fortement semblables. Les différents débits et espacements utilisés n'ont pas occasionné de différence quant au volume de sol humidifié observable latéralement (Figure 6 et Figure 7). En observant une variation de la teneur en eau localisée uniquement sous le tube de goutte à goutte, nous pouvons supposer un écoulement hydrique principalement vertical occasionné par les propriétés texturales du sol.

Les résultats observés en 2009 laissent paraître un transport latéral à une profondeur de 30 cm. Ce mouvement horizontal pouvait être attribué à une augmentation de la densité apparente du sol avec la profondeur. Les analyses de la densité apparente du sol, pour le dispositif expérimental de 2010, ne démontrent aucune variation en fonction de la profondeur. L'écoulement de l'eau ne rencontre donc aucune augmentation de restriction au transport vertical, occasionné par la gravité. Par l'utilisation de deux tubes de goutte à goutte, le TH permet une humidification beaucoup plus importante dans la butte de sol. Par contre, cette amélioration, comparativement à l'ensemble des autres traitements de 2009 et 2010, ne semble être attribuable qu'à la présence d'une zone d'apport d'eau supplémentaire et non à un débit par gouteur ou à un espacement particulier entre les gouteurs. L'écoulement hydrique demeure semblable aux autres traitements, mais ce dernier est dupliqué et positionné à l'intérieur de la butte de manière à en occuper le plus grand volume. Le positionnement des tubes de goutte à goutte, pour l'ensemble des traitements, est illustré à la Figure 8.

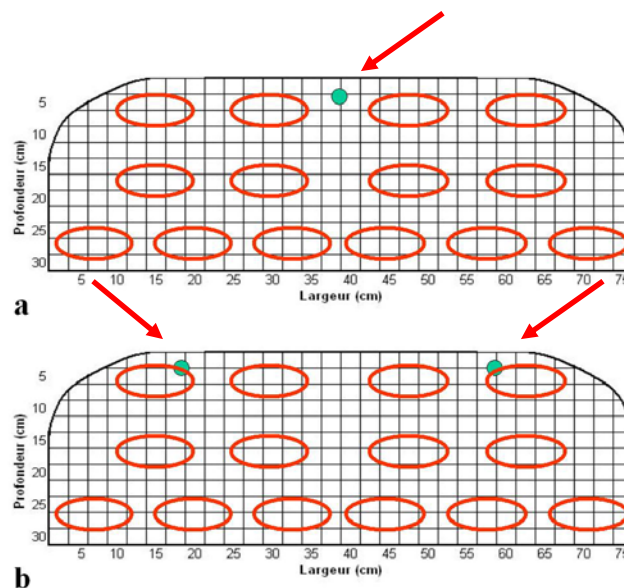


Figure 8. Coupe transversale d'une butte de sol avec positionnement des tubes de goutte à goutte (points verts pointés par les flèches) et des zones de mesure de la teneur en eau volumique (ellipses orange) - a) traitements 2009 et T1, T6, T7, T11 et T12 2010 - b) TH.

Le mouvement de l'eau dans le sol est principalement fonction de la porosité de ce dernier. La littérature définit plusieurs types de pores, soit les macropores et les micropores, ayant respectivement un diamètre supérieur et inférieur à 0,06 mm (Duval et Simonne, 2003). Le transport de l'eau sera différent en fonction de la porosité du sol. En effet, les macropores ne permettront principalement qu'un mouvement vertical de l'eau occasionné par la force gravitationnelle « mass flow ». Des analyses granulométriques effectuées pour chacune des parcelles expérimentales, pour la saison 2009, démontrent effectivement des différences texturales pouvant influencer l'écoulement souterrain de l'eau (ANNEXE 3. Analyses texturales des parcelles expérimentales). La localisation des points d'apport en eau d'irrigation étant constante dans le temps, il est possible que des canaux d'écoulement préférentiel se forment directement sous ces derniers. On observe les plus grandes variations de la teneur en eau volumique au centre de la butte (extrémité droite des schémas de demi-butte présentés à la Figure 6, soit sous le tube de goutte à goutte). L'existence de canaux d'écoulement préférentiel est

effectivement plausible, car elle implique la présence d'une importante quantité d'eau s'écoulant rapidement par gravité. Les variations de la teneur en eau volumique s'effectuaient majoritairement dans une période relativement rapide. Les variations marquées et rapides laissent supposer la présence de canaux d'écoulement préférentiel sous le tube de goutte à goutte. L'utilisation de volumes d'eau d'irrigation de moindre importance lors de la deuxième saison (Tableau 1) a permis d'observer des variations de la teneur en eau volumique de moindre ampleur (Figure 9 et Figure 10). Cela laisse supposer un rôle prédominant de la texture sur le transport hydrique dans ce sol comparativement à la présence de canaux d'écoulement préférentiel. L'épisode d'irrigation observé le 27 août 2009 (vers 14 h 30), est clairement identifiable visuellement et démontre une variation de la teneur en eau d'environ 5 %. Lors de l'épisode du 11 août 2010 (vers 9 h 20), la variation, de l'ordre de 2 %, n'est que très faiblement repérable graphiquement.

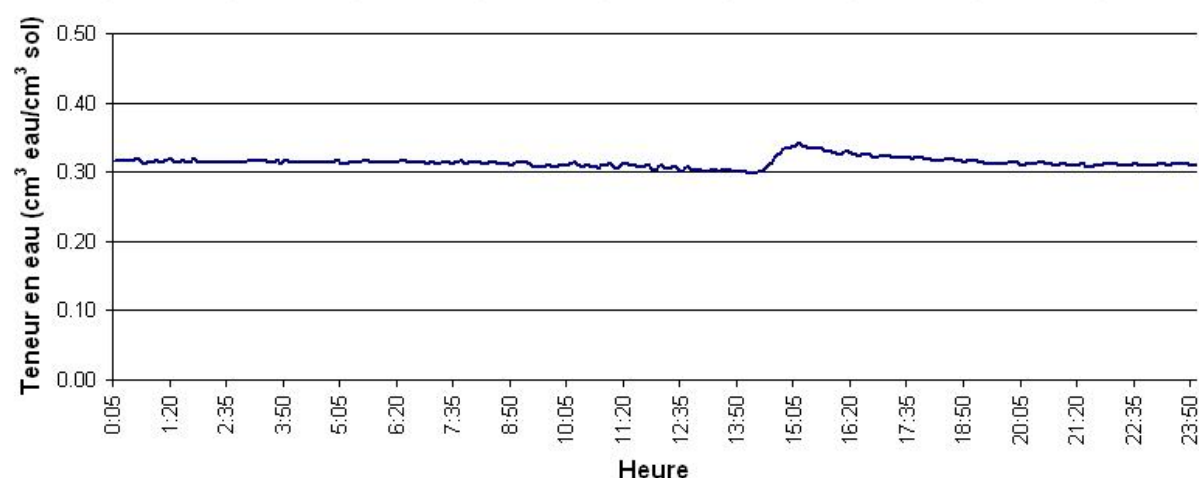


Figure 9. Variation de la teneur en eau du T12 suite à un épisode d'irrigation le 27 août 2009.

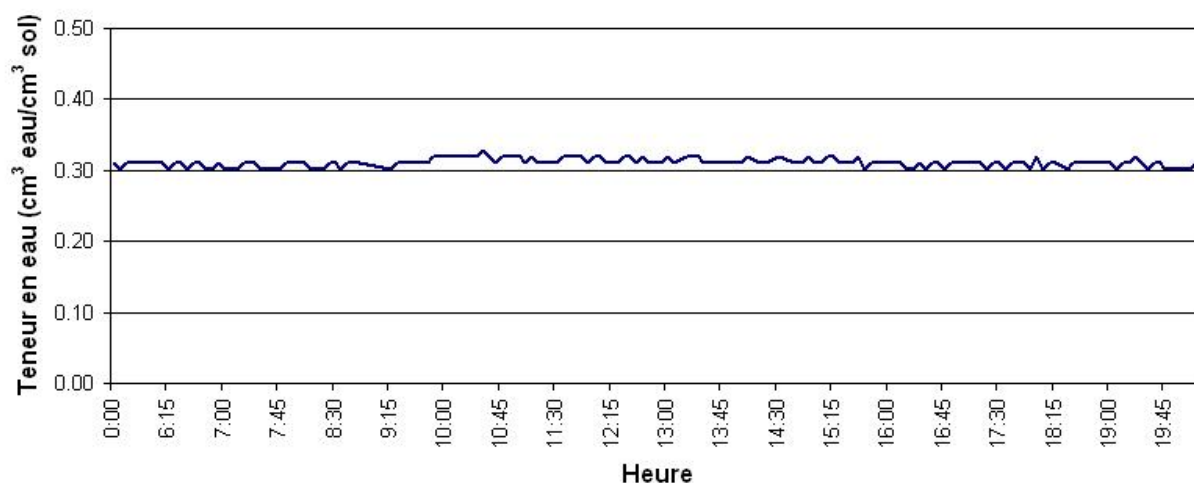


Figure 10. Variation de la teneur en eau du T12 suite à un épisode d'irrigation le 11 août 2010.

La différence de volume d'eau appliqué pour la saison 2010 peut être expliquée par un type de sol légèrement différent de celui de la saison 2009 (prédominance de loam sablo-argileux pour 2009 et entièreté de loam argileux pour 2010). Cette différence de texture influence la dynamique de l'eau dans le sol. En effet, la plus grande proportion d'argile en 2010 occasionne un transport de l'eau plus lent à l'intérieur de la matrice du sol (tel que démontré par les mesures de conductivité hydraulique saturée présentées dans cette section). Une plus grande surface spécifique ainsi qu'un volume de micropores plus important favoriseront un potentiel matriciel supérieur à un sol où la proportion d'argile est moindre, pouvant retenir l'eau plus fortement. L'eau appliquée par l'irrigation peut donc être accumulée de manière plus optimale, minimisant les écoulements en profondeur. L'utilisation d'une sonde TDR à 38 cm de profondeur sous le tube de goutte à goutte, légèrement sous le volume de sol englobant les 7 sondes TDR, permettait de visualiser les variations de la teneur en eau, signifiant le passage du front d'humectation hors de la zone habituellement colonisée par les racines. L'observation de ce front signifie que le volume d'eau appliqué (fonction du flux litre/m²/seconde) a été suffisant pour parcourir une distance équivalente à la profondeur correspondant au volume de sol visé (au-delà duquel l'eau n'est plus accessible à la culture). Conséquemment, les variations de la teneur en eau mesurées par la sonde TDR installée à 38 cm de profondeur indiquent que les volumes d'eau appliqués lors des épisodes d'irrigation étaient suffisants.

Tel qu'observé à la Figure 6 et mentionné précédemment, les variations de la teneur en eau sont plus importantes au bas du profil, soit à 25 cm sous la surface de la butte. Ceci peut être causé par une densité apparente du sol qui augmente avec la profondeur; cette situation a été observée lors de l'étude granulométrique. Ainsi, à une profondeur supérieure à 30 cm, l'écoulement vertical de l'eau diminuerait pour favoriser un mouvement latéral. Cette variation de la teneur en eau volumique en fonction de la profondeur et de l'éloignement latéral au point d'apport en eau est représentée graphiquement pour les T4 et T11 de 2009 (Figure 11 et Figure 12). Les variations sont uniquement observables à la plus grande profondeur (25 cm) pour les deux traitements. Ces graphiques permettent également de visualiser l'accumulation de l'eau à l'intérieur de la matrice du sol, en remarquant une valeur de la teneur en eau volumique plus importante suite au ressuyage du sol après un épisode d'irrigation.

Discussion se rapportant à la Figure 11

Ce graphique représente la variation de la teneur en eau volumique en fonction de la profondeur pour des éloignements latéraux par rapport au tube de goutte à goutte de 8 cm (courbes orange) et de 23 cm (courbes bleues). Chacun des éloignements est représenté par 3 courbes : les valeurs de la teneur en eau (1.) avant; (2.) pendant; et (3.) après une irrigation. La tendance générale du graphique indique une augmentation de la teneur en eau avec la profondeur, mais comment cette variation se comporte lors des irrigations? En observant les courbes de l'éloignement de 8 cm (orange), on remarque une superposition des 3 courbes entre les valeurs de profondeurs -5 et -15, signifiant qu'aucune variation de la teneur en eau à la suite d'une irrigation n'est observée à ces profondeurs. Entre -15 et -25 cm, une différenciation des 3 courbes est observable; en ordre croissant de valeur de la teneur en eau se présentent les courbes « Avant », « Après » et « Pendant ». Cette disposition graphique indique qu'il y a eu accumulation d'eau à ces profondeurs, car la courbe « Après » possède des valeurs de la teneur en eau supérieures à celles de la courbe « Avant ». Cependant, une partie de l'eau emmenée à ces profondeurs est perdue,

car la courbe « Pendant » possède des valeurs de la teneur en eau plus importantes que la courbe « Après », signifiant un ressuyage.

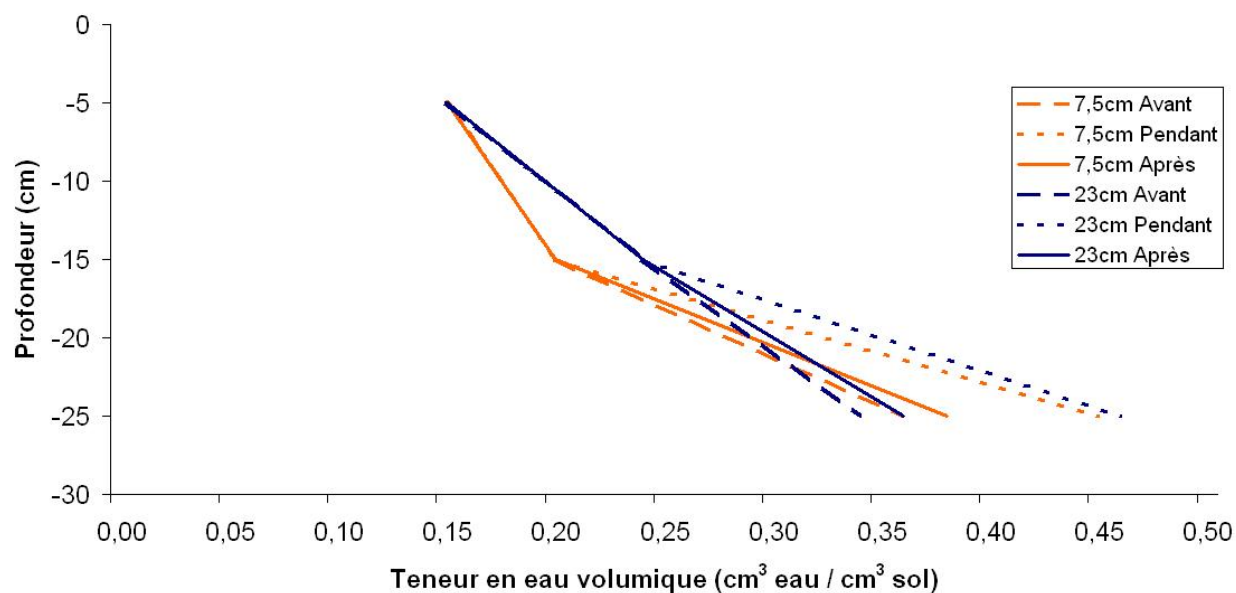


Figure 11. Variation de la teneur en eau volumique en fonction de la profondeur et de l'éloignement latéral par rapport au tube de goutte à goutte en 2009 (T4).

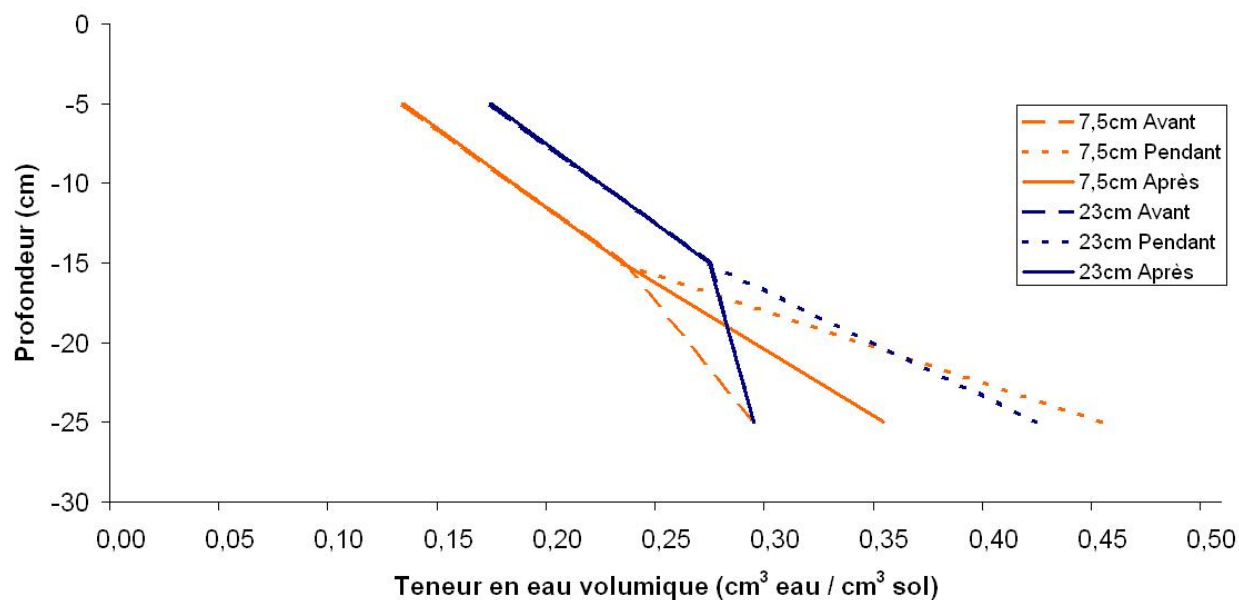


Figure 12. Variation de la teneur en eau volumique en fonction de la profondeur et de l'éloignement latéral par rapport au tube de goutte à goutte en 2009 (T11).

Les résultats obtenus à la saison 2009 ont démontré qu'il est difficile d'humidifier uniformément le sol, peu importe le traitement (Figure 6). De plus, du volume de sol étudié, seuls 46 % en moyenne démontrent des variations de la teneur en eau volumique suite à un épisode d'irrigation. Pris individuellement, aucun traitement n'a permis de rejoindre plus de 70 % du volume total de sol de la butte (Figure 13).

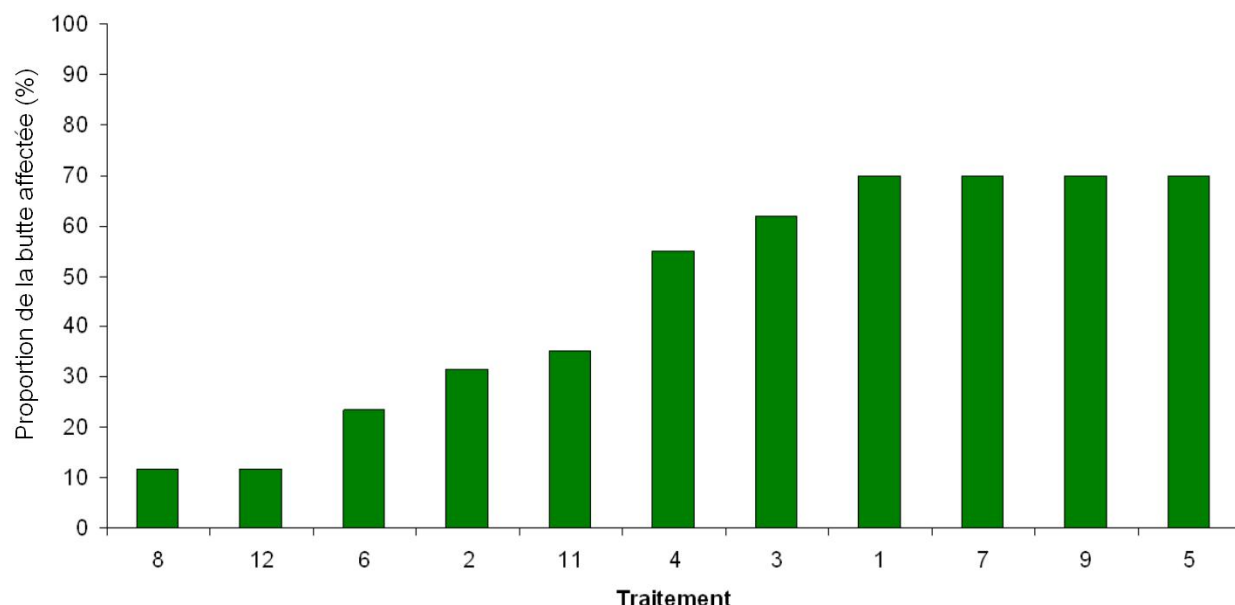


Figure 13. Proportion du volume de sol affecté par les épisodes d'irrigation selon le traitement (2009).

Donc, près de la moitié du volume de sol est hors de portée du système d'irrigation. Ces résultats suggèrent qu'il y aurait avantage à augmenter le volume de sol gérable afin d'emmagasiner dans ce dernier un volume d'eau se rapprochant de celui des apports. Une telle amélioration pourrait occasionner une diminution de la fréquence des irrigations. La quantité d'eau retenue par le sol, du dispositif de 2009, à la capacité au champ (CC), correspond à 40 % exprimés en base volumique (cm^3 d'eau par cm^3 de sol). Cette quantité d'eau n'est que partiellement disponible pour les plants. En effet, le sol adsorbe très fortement 30 % de la teneur en eau volumique, laissant donc 10 % du volume de sol agir comme un réservoir d'eau facilement disponible aux plants. Ces valeurs peuvent être observées sur les courbes de rétention en eau du sol présentées à la Figure 14. Les courbes de rétention du dispositif de 2010 ont pu être tracées avec plus de précision que celles de 2009 par l'ajout de plusieurs points sur ces dernières. Par l'observation de la tension au champ en 2010, suite à une saturation en eau du sol par les précipitations et à un drainage naturel subséquent de 36 heures, la teneur en eau volumique à la capacité au champ (θ_{cc}) a pu être mesurée à 2 kPa et correspond à une teneur en eau volumique moyenne de 37 %. Le point de flétrissement permanent (θ_{fp}), obtenu à une tension de 1 500 kPa, est de 12,6 % et le point de flétrissement temporaire (θ_{ft}), obtenu à une tension de 100 kPa, est de 21,12 %. La réserve en eau utile (RU) peut être connue en soustrayant θ_{fp} de θ_{cc} , ainsi la RU égale 24,4 %. La réserve en eau facilement utilisable (RFU), correspondant à l'eau du sol pouvant être extraite sans contrainte par les plantes, est égale à $\theta_{cc} - \theta_{ft}$, donc à 15,88 % (Figure 15).

Discussion se rapportant à la Figure 14

La teneur en eau volumique mise en relation avec la tension du sol permet de faire ressortir le comportement hydrodynamique d'un sol. Lorsque le sol est saturé, une tension nulle peut être observée; les courbes démontrent une teneur en eau à saturation d'environ 50 %, soit 0,5 cm³ d'eau par cm³ de sol. Suite à une saturation, l'eau située dans les macropores n'est pas adsorbée par le sol et sera perdue en profondeur par lessivage. Le volume d'eau retenu par les micropores du sol et les forces d'adhésion des particules de sol correspondent à la capacité au champ (CC); cette valeur est d'environ 40 % sur le graphique. Passées les valeurs 5-10 kPa de tension, les 6 courbes se stabilisent à une valeur moyenne de 30 % de la teneur en eau. Ces 30 % ne sont pas facilement accessibles aux plants étant donné leur forte adsorption par le sol. Effectivement, la variation de la teneur en eau est très faible passée 5-10 kPa, malgré la hausse de tension. Les 40 % de la teneur en eau volumique de CC doivent donc être retranchés des 30 % de la teneur en eau afin d'avoir un portrait plus juste de l'eau disponible aux plants ainsi que du volume de sol agissant comme un réservoir.

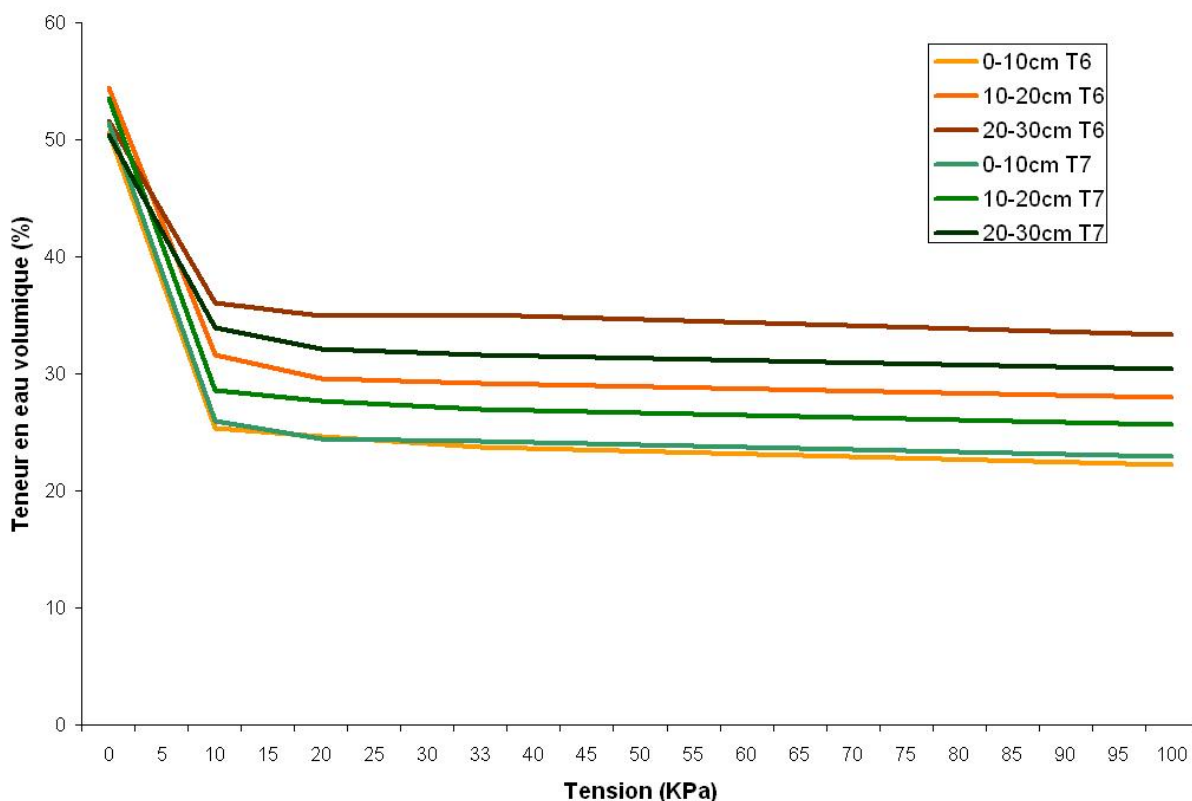


Figure 14. Courbes de rétention en eau du sol utilisé en 2009 (T6 et T7).

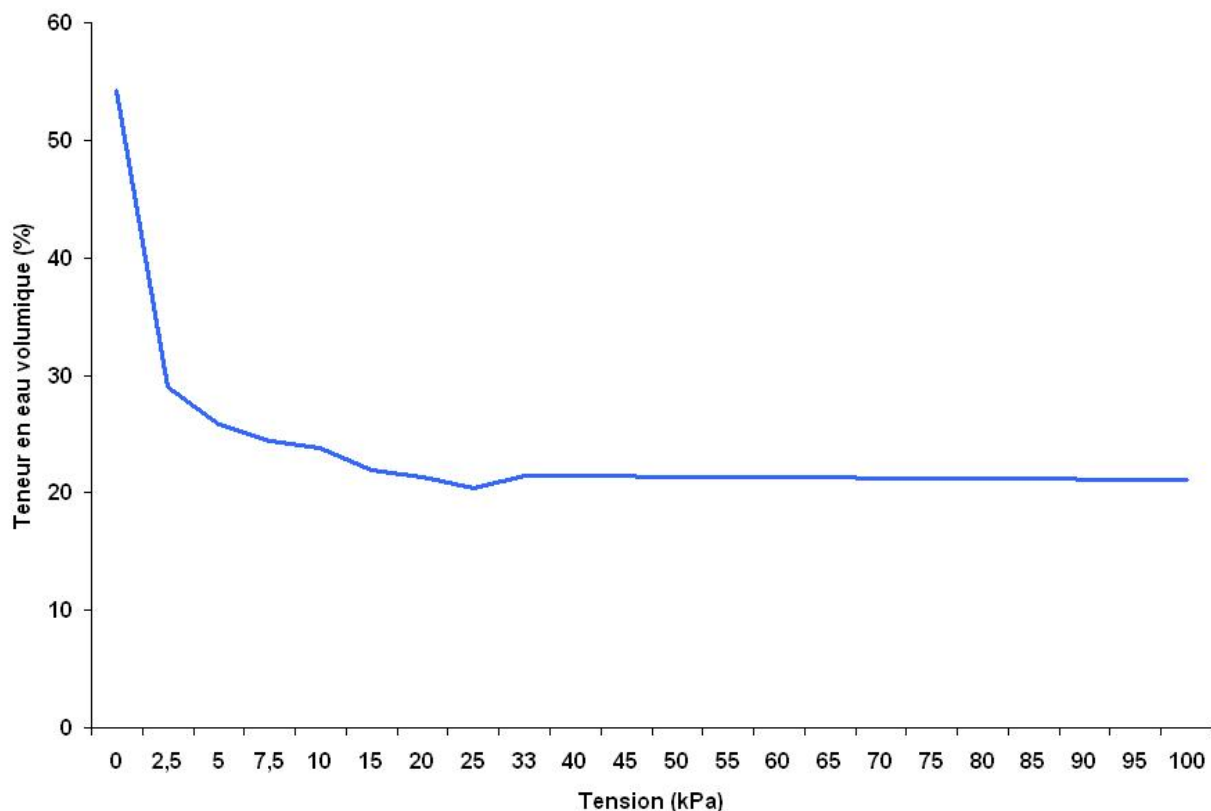


Figure 15. Courbe de rétention en eau moyenne du sol utilisé en 2010.

La conductivité hydraulique saturée (K_s) correspond à la vitesse d'écoulement de l'eau à l'intérieur d'un sol saturé, signifiant que l'ensemble des pores de ce dernier est comblé par de l'eau. Elle est exprimée en cm par heure et a été mesurée avec un infiltromètre à charge constante de Côté (Banton et al., 1991). Cette dernière a été calculée dans les trois blocs du dispositif au mois d'octobre 2009. Les valeurs obtenues sont de 15,5, 17,4 et 24,3 cm par heure pour les blocs 1, 2 et 3 respectivement. Ces valeurs élevées s'expliquent par le taux élevé de particules aux dimensions supérieures à 2 mm, ces derniers représentant en moyenne 27,4 % du volume du sol. Une telle conductivité peut être favorable à un écoulement hydrique saturé principalement vertical dans un profil de sol. La pierrosité importante mesurée est défavorable à l'écoulement latéral de l'eau dans le sol. En effet, une telle texture crée principalement des macropores. Le mouvement latéral de l'eau sera principalement conséquent au phénomène de capillarité engendré par la présence de micropores. Étant donné le faible diamètre des micropores, l'eau peut être retenue par les forces de capillarité et d'adsorption dues aux particules solides, autrement dit le potentiel matriciel (Allaire, 2004). Cette force permet donc un mouvement latéral de l'eau dans le sol (Duval et Simonne, 2003). La prépondérance des macropores favorisera l'écoulement par gravité au travers du profil de sol. Ainsi, la texture fortement grossière de ce sol expliquerait partiellement la faible humectation de la butte.

Afin de favoriser le mouvement latéral de l'eau, il y avait un intérêt à utiliser un débit supérieur à celui de la conductivité hydraulique saturée lors des épisodes d'irrigation. Toutefois, les mesures

de K_s effectuées indiquent que cette solution n'est pas envisageable dans le sol à l'étude. Les différents débits utilisés selon les traitements d'irrigation, malgré que certains soient supérieurs à ce qui est habituellement utilisé, sont insuffisants. En effet, en posant l'hypothèse que le débit à la saturation du sol est égal aux débits des différents traitements, les valeurs de K_s seraient de l'ordre de 0,24 à 0,79 cm h⁻¹, soit plus de 95 % inférieures aux valeurs de K_s mesurées. Ces valeurs de conductivité s'apparentent généralement aux sols sableux, ceux-ci contenant une forte proportion de gravier. Pour la saison 2010, la conductivité hydraulique saturée a été mesurée le 14 octobre dans les blocs 1 et 2. Les lectures obtenues pour les 2 blocs étaient semblables, pour une valeur de K_s égale à 2,48 cm par heure. Les valeurs de 2010, plus faibles que celles de 2009, peuvent être expliquées par une texture de sol différente. En effet, la majorité du sol de 2009 était qualifié de loam sablo-argileux (52,1 % de sable moyen) comparativement à celui de 2010 qualifié de loam argileux (34,8 % de sable moyen) (ANNEXE 3. Analyses texturales des parcelles expérimentales). La plus grande proportion de sable du dispositif de 2009 peut expliquer les valeurs supérieures de K_s observées comparativement à celles de 2010. Tout de même, la réflexion faite précédemment, concernant l'hypothèse que le débit à saturation du sol est égal aux débits des différents traitements, s'applique toujours, soit que les débits des divers traitements étudiés seraient trop faibles pour reproduire K_s .

La caractérisation du système racinaire a également été effectuée pour chacun des traitements. Premier constat, les racines ont colonisé l'ensemble des zones de sol pour les deux saisons, quoique la densité soit plus faible dans les zones hors de portée du système d'irrigation. En sachant que les zones non alimentées en eau par l'irrigation sont colonisées par les racines, il serait alors profitable de rejoindre ces zones afin d'optimiser l'absorption de l'eau et des nutriments. L'étude de Oliveira et al. (1996) a démontré une forte relation entre la masse sèche des parties souterraines des plants et leurs rendements. Une irrigation efficace de l'ensemble de la butte de sol rejoignant la totalité du système racinaire, favoriserait une croissance accrue de ce dernier et engendrerait une hausse potentielle des rendements en fruits.

5.1.2 Prévenir le lessivage des éléments minéraux en limitant le volume d'eau d'irrigation qui atteint la zone de sol inexplorée par les racines.

Les racines sont la partie de la plante qui permet de prélever les éléments nutritifs présents dans la solution du sol. Outre le système racinaire des plantes, la microfaune et la microflore du sol pourront également capter de ces éléments nutritifs. Finalement, notons qu'une autre portion de ces éléments pourra être plus ou moins adsorbée sur la partie solide du sol selon la texture de ce dernier. Malgré ces diverses capacités de rétention des éléments fertilisants, la solution du sol qui les contient peut échapper aux prélèvements du système racinaire. Une solution riche en éléments fertilisants, telle que celle utilisée lors des fertirrigations, a davantage à traverser la zone racinaire de la culture dans son patron d'écoulement. Ce faisant, un maximum d'éléments fertilisants pourra être capté par la plante, limitant ainsi les pertes par lessivage.

Aux mois d'octobre 2009 et 2010, des « tranches » de sol ont été prélevées dans chacun des traitements (Figure 16). Chacune des tranches a été divisée en 14 zones, tel qu'illustré à la Figure 3 et Figure 4. Fait à noter, les fraisiers étaient implantés en quinconce sur la butte, ce qui influence la densité des racines mesurée dans chacune des zones. Autrement dit, le fraisier

n'étant pas implanté au centre de la butte, la distribution des racines sera asymétrique. Le plant est situé sur la zone 13, alors que la zone 12 représente l'espace entre deux fraisiers.

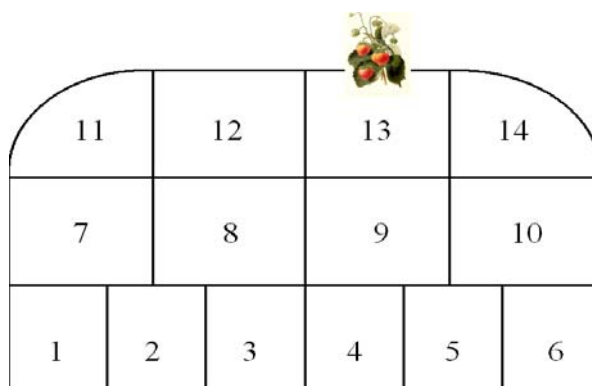


Figure 16. Disposition des 14 zones où la densité racinaire est considérée.

Pour chacun des traitements à l'étude lors des 2 saisons, les 14 zones de sol ont été colonisées par le système racinaire des plants, et ce, à une densité variable. Étant donné la colonisation de l'ensemble du profil de sol par les racines, la perte des éléments minéraux devrait être minimale si les apports en eau sont optimaux. Toutefois, la présence de canaux d'écoulement préférentiel et de lessivage occasionné par une pierrosité importante augmente les risques de perdre des éléments minéraux en profondeur.

Malgré la présence de racines dans l'ensemble du sol caractérisé, la capacité du système racinaire à absorber l'eau et les nutriments est inégalement répartie. En effet, la zone de maturation cellulaire de la racine débute à 1 cm de la pointe pour se terminer à 5 cm de celle-ci. De plus, la racine est recouverte de poils absorbants (jusqu'à 40 000 poils/cm²) qui augmentent la surface spécifique d'absorption des racines, et ce, plusieurs milliers de fois. Ces poils absorbants sont un prolongement de l'épiderme de la racine. Ils ont une dimension inférieure à 1 mm de longueur et sont présents sur l'ensemble du système racinaire. Même si les poils absorbants sont distribués sur l'ensemble du système racinaire, l'absorption de l'eau et des nutriments s'effectue majoritairement par ces derniers, et ce, dans la zone de maturation mentionnée précédemment (Moore et al., 1998). Les cinq premiers centimètres de la zone située à l'extrémité des racines sont ceux où s'effectue la majorité de l'absorption des nutriments et de l'eau par la plante. Une étude de Gao et al. (1998) arrive à des conclusions semblables. La région située derrière le méristème de la racine a une plus grande capacité d'absorption des nutriments que les segments plus âgés, qui conservent néanmoins une certaine capacité d'absorption. Les racines de faible diamètre sont alors les plus susceptibles d'être la portion du système racinaire la plus efficace. L'absorption de l'eau et des nutriments sera diminuée advenant le cas d'une croissance secondaire des racines, produisant du xylème et du phloème secondaire ainsi que du périderme (Moore et al., 1998). Donc, plus le diamètre de la racine sera important, plus la possibilité de croissance secondaire sera élevée, entraînant une diminution de l'absorption de l'eau et des nutriments.

Dix classes de diamètre ont été retenues lors des analyses, soit des valeurs allant de $]0,0 \text{ mm à } >1,8 \text{ mm}$ séparées par des intervalles de $0,2 \text{ mm}$. Les différences présentées se rapportant aux longueurs et densités racinaires entre les traitements n'ont pas été analysées statistiquement. Il ressort que les racines se retrouvent majoritairement (environ 90 %) dans les 2 plus petites classes de diamètre ($]0,0-0,2]$ et $]0,2-0,4]$ mm) (Figure 17).

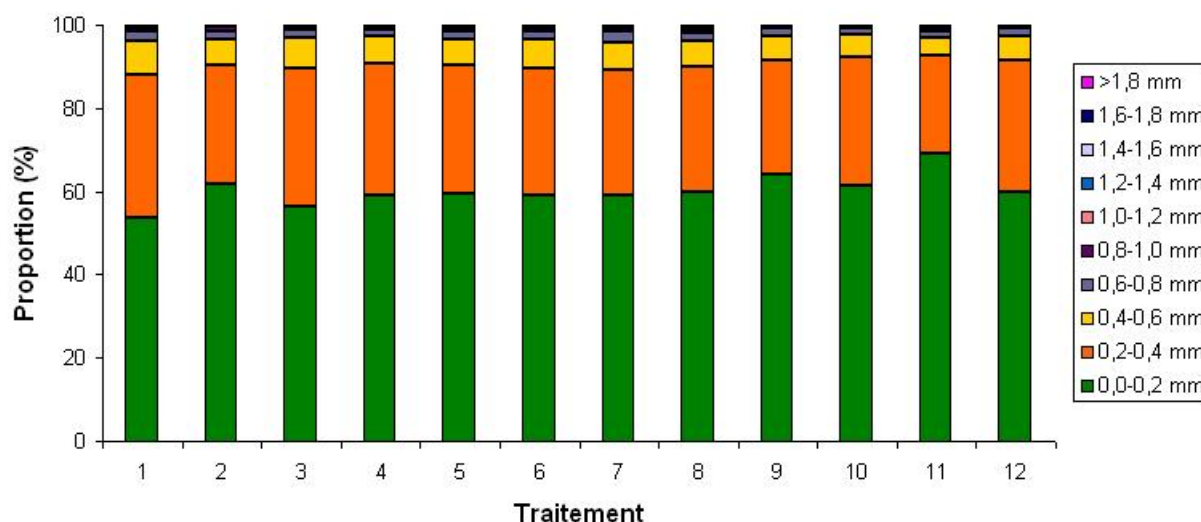


Figure 17. Proportion des classes du diamètre des racines selon les traitements de 2009.

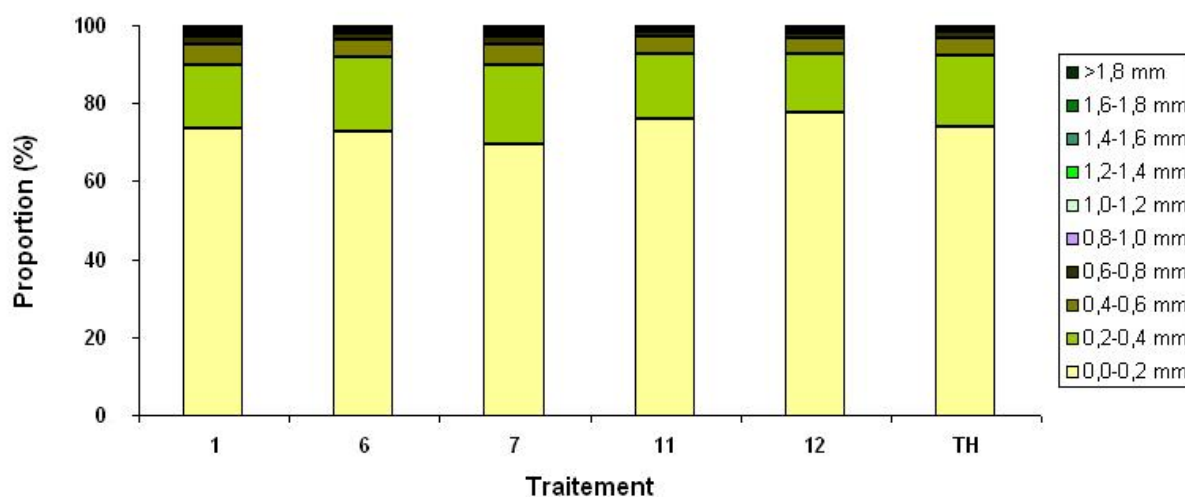


Figure 18. Proportion des classes du diamètre des racines selon les traitements de 2010.

En émettant l'hypothèse que les racines ayant le plus faible diamètre sont potentiellement celles ayant une capacité d'absorption des nutriments et de l'eau maximale, l'ensemble des traitements possède un système racinaire, toutes proportions gardées, semblable. Conséquemment, les traitements où la densité racinaire mesurée est supérieure devraient favoriser la croissance des plants (en considérant que les systèmes racinaires prélevés dans la tranche de sol proviennent de plants de taille comparable). Les densités les plus importantes de 2009 ont été mesurées dans les parcelles des T3, T6, T8, T9 et T10 (Figure 19). En 2010, la densité la plus importante a été mesurée dans le traitement 6 (Figure 20). L'expression quantitative de la distribution racinaire en densité permet de faire abstraction des variations des volumes de sol qui peuvent être conséquentes à la méthode d'échantillonnage, entre les différentes tranches et différentes zones prélevées lors de l'échantillonnage. Cependant, la densité racinaire ne permet pas de considérer les différences de taille et de poids entre les plants dont une portion du système racinaire a été prélevée. Les informations se rapportant aux racines d'une tranche de sol ayant contenu un fraisier de taille supérieure aux autres seront nécessairement augmentées. Effectivement, la masse aérienne sèche pourrait expliquer en grande partie (42 %, $r = 0,419$) la densité racinaire (Figure 21). L'importance sera donc portée sur les patrons de distribution racinaire à l'intérieur de la tranche de sol (section 5.1.3 et ANNEXE 4. Schématisation de la distribution racinaire saison 2010).

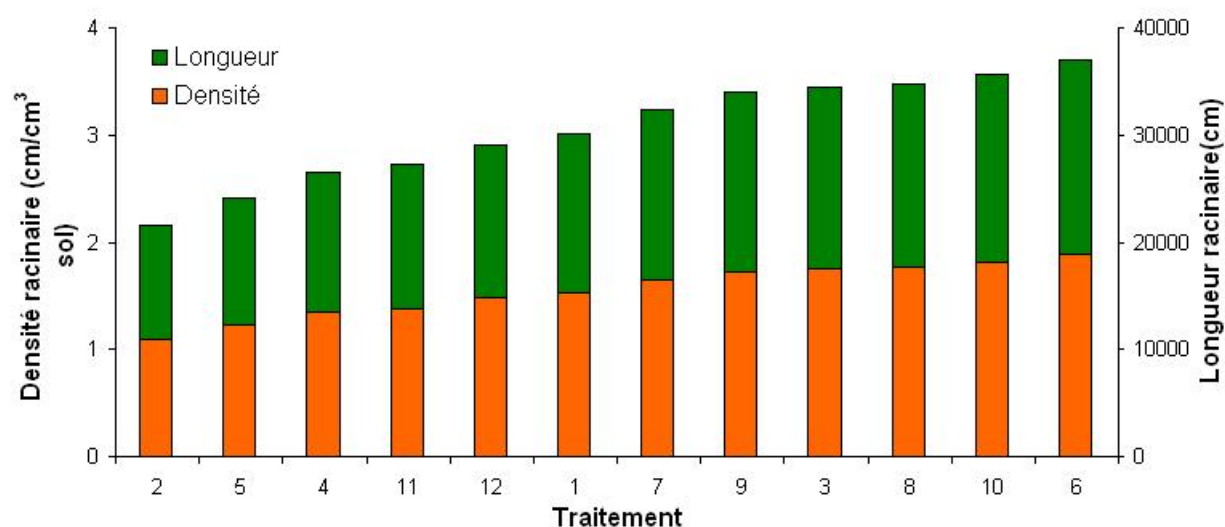


Figure 19. Densité et longueur racinaire selon les traitements de 2009.

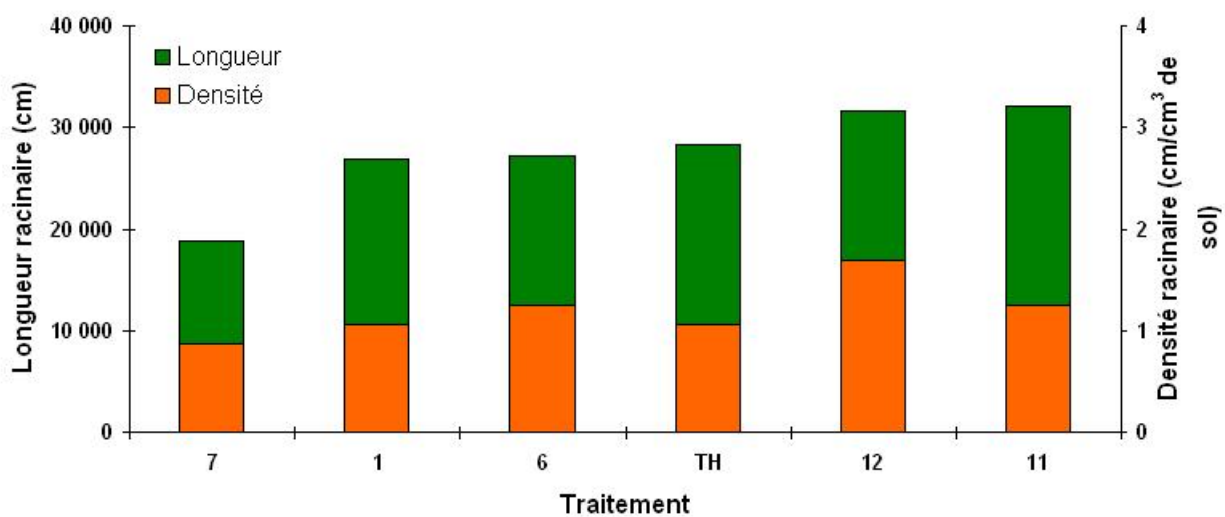


Figure 20. Densité et longueur racinaire selon les traitements de 2010.

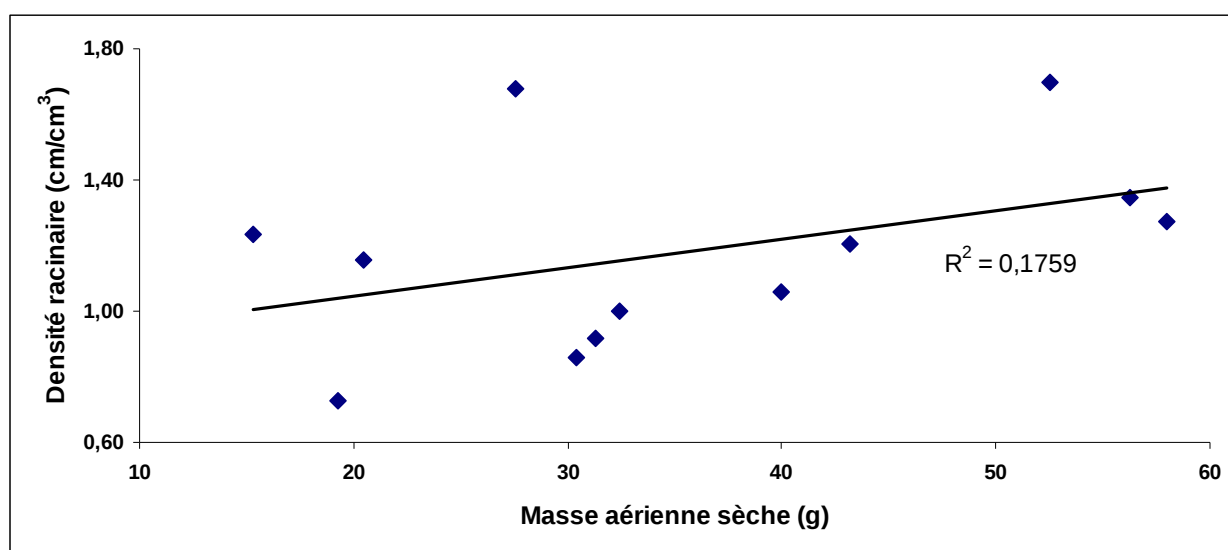


Figure 21. Corrélation entre la masse aérienne sèche et la densité racinaire, tous traitements confondus, en 2010.

5.1.3 Mesurer quantitativement le développement du système racinaire en fonction du mouvement de l'eau dans le sol.

Selon les conditions dans lesquelles les apports en eau d'irrigation sont effectués, l'eau s'écoulera à différents niveaux latéralement et transversalement. Ainsi, la connaissance du développement racinaire en fonction du mouvement de l'eau dans le sol est importante afin de limiter les apports d'eau dans une zone de sol où le prélèvement racinaire est impossible ou limité. Afin de caractériser dans l'espace le système racinaire, la distribution de ce dernier a été mesurée en fonction de l'éloignement horizontal et vertical du tube de goutte à goutte. Les valeurs moyennes de longueurs racinaires des 14 zones de sol ont été mises en relation avec les différentes valeurs de profondeur et d'éloignement latéral auxquelles elles se retrouvent. La corrélation impliquant la profondeur indique que la longueur racinaire diminue avec la profondeur ($r = 0,62$) (Figure 22). Toutefois, l'éloignement latéral n'explique pas aussi efficacement la distribution des racines dans le sol ($r = 0,43$) (Figure 23). Wang et al. (2006) mentionnent également avoir observé une absence d'effet sur la distribution latérale des racines dans la culture de la pomme de terre.

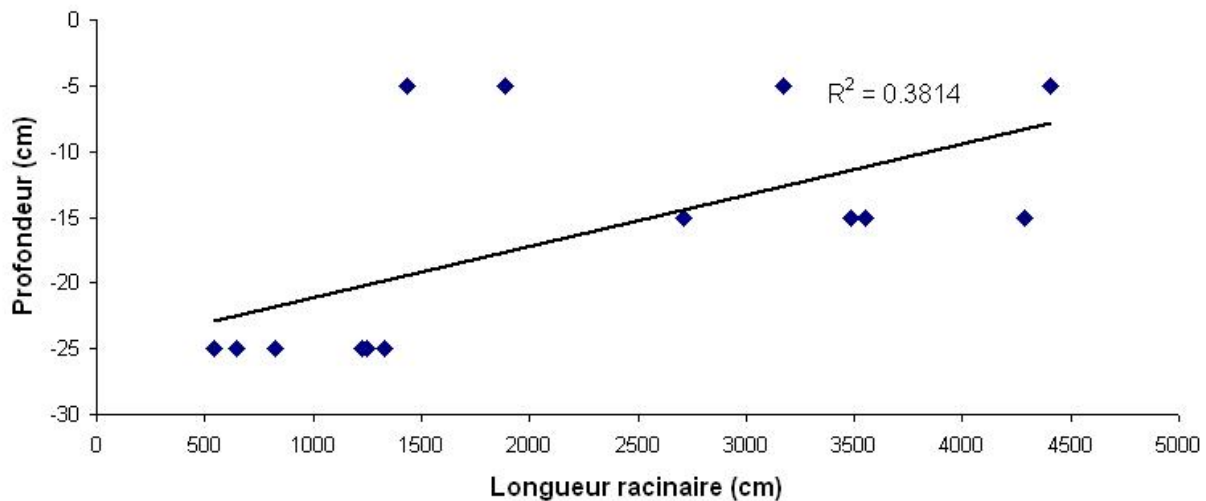


Figure 22. Corrélation entre la longueur racinaire et la profondeur dans le sol, tous traitements confondus, en 2009.

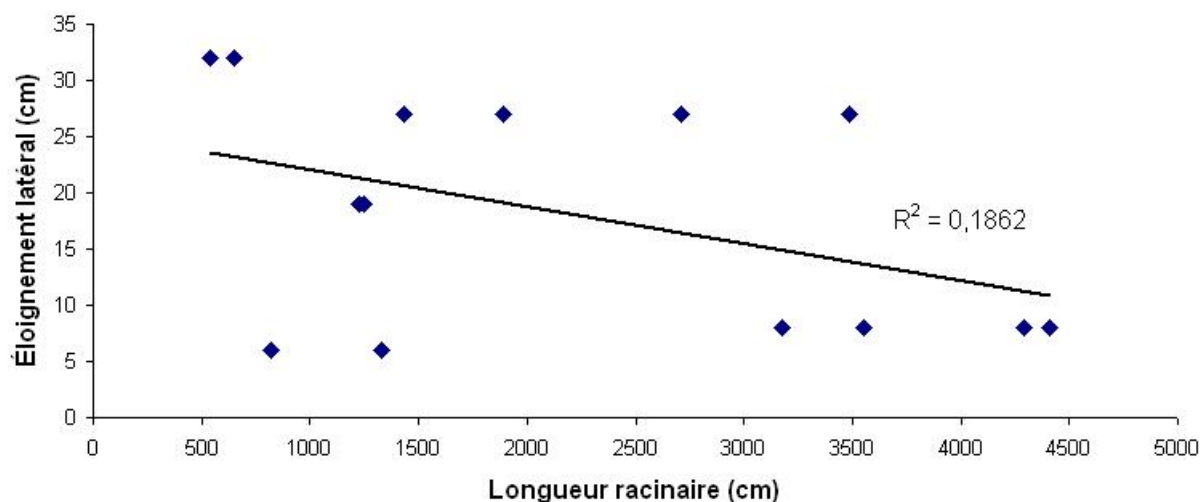


Figure 23. Corrélation entre la longueur racinaire et l'éloignement latéral par rapport au tube de goutte à goutte, tous traitements confondus, en 2009.

La colonisation des racines dans les différentes zones du profil de sol peut être exprimée en densité racinaire, c'est-à-dire la longueur des racines en cm rapportée par cm^3 de sol de la zone, et en longueur racinaire en cm. La densité et la longueur moyenne des racines mesurées dans les 12 traitements de 2009 indiquent qu'une plus grande quantité de racines est située directement sous le plant, au centre de la butte, à une profondeur de 0-10 cm (zones 12 et 13), ainsi qu'au centre de la butte à une profondeur de 10-20 cm (zones 8 et 9) (Figure 24 et Figure 25). Ces résultats ont également été observés pour la saison 2010 par des graphiques semblables (Figure 26 et Figure 27).

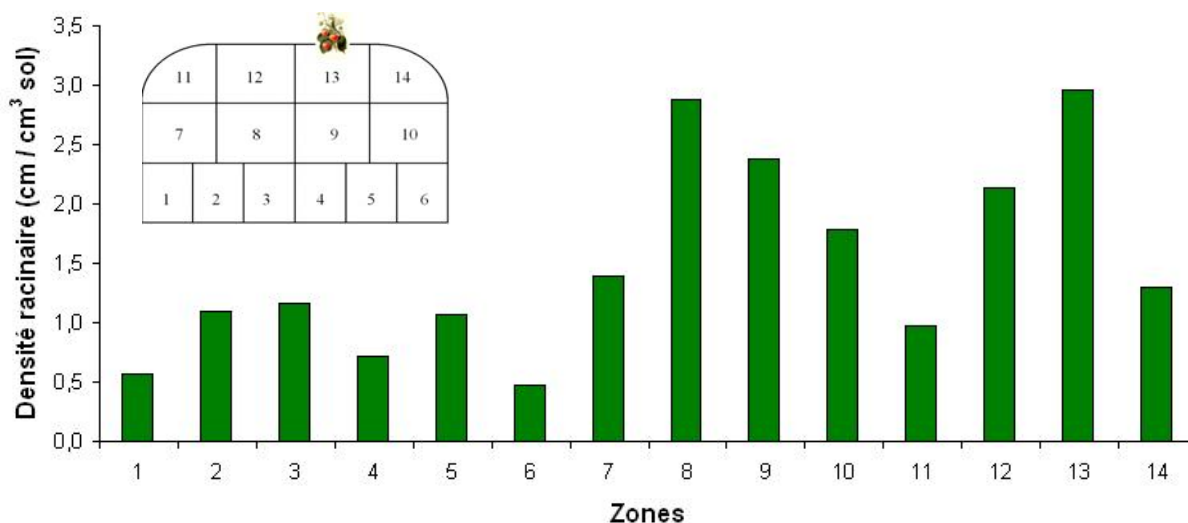


Figure 24. Densité racinaire moyenne selon la zone en 2009.

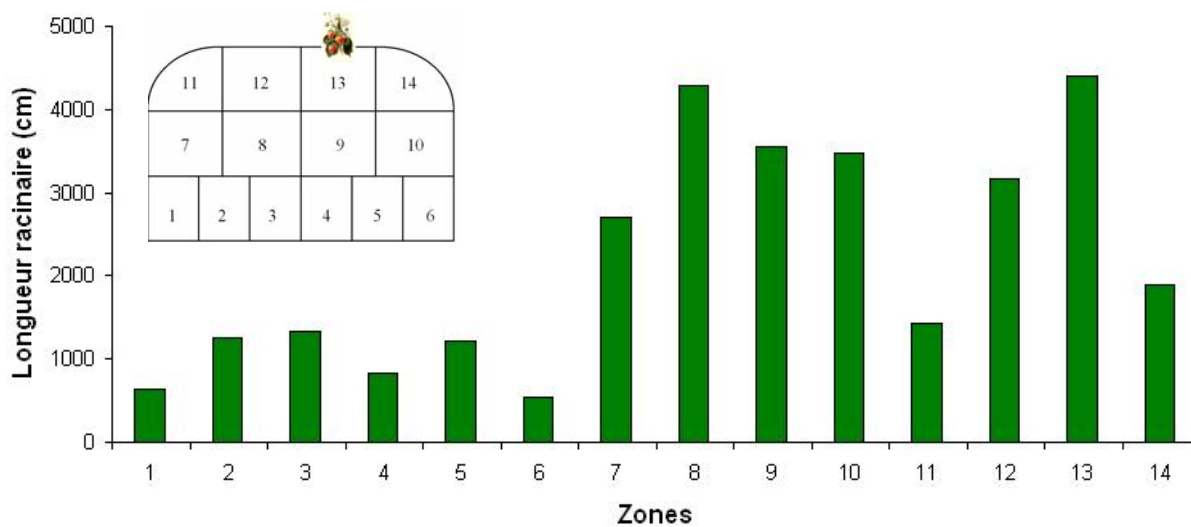


Figure 25. Longueur racinaire moyenne selon la zone en 2009.

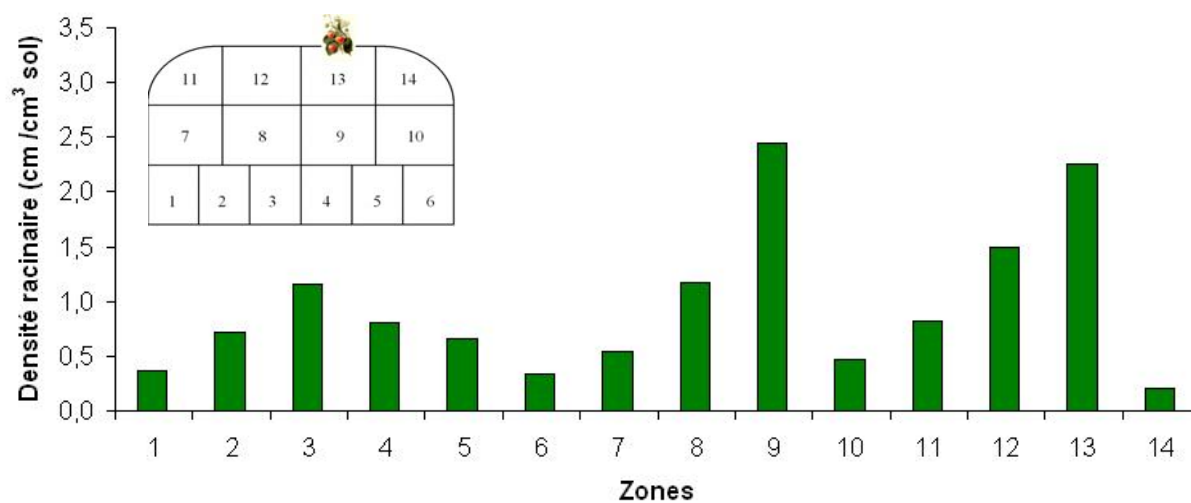


Figure 26. Densité racinaire moyenne selon la zone en 2010.

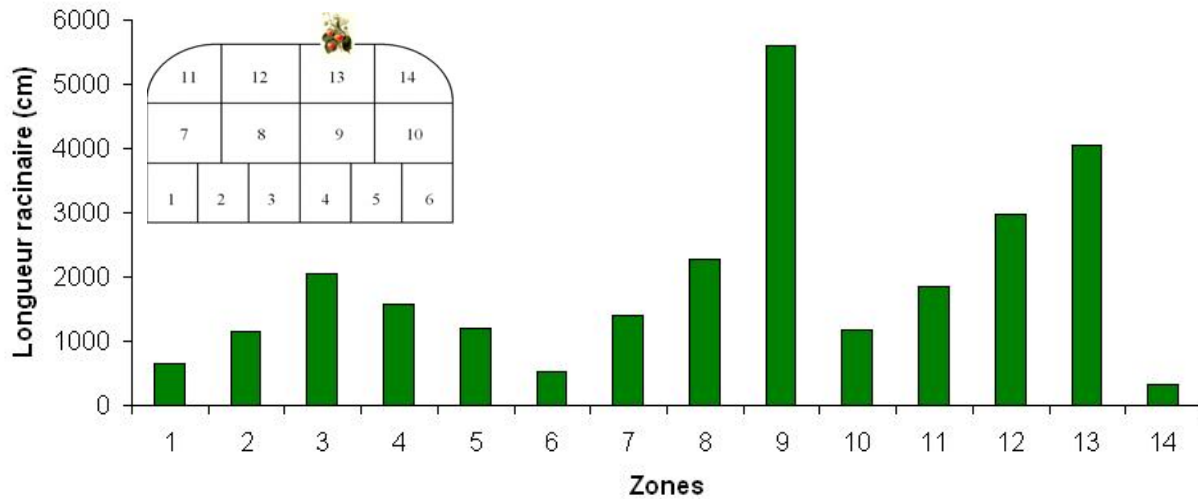


Figure 27. Longueur racinaire moyenne selon la zone en 2010.

Les apports d'irrigation s'effectuent au centre de la butte entre les zones 12 et 13 (excluant le témoin humide de 2010). En observant les variations de la teneur en eau volumique, illustrées aux Figure 6 et Figure 7, on remarque une augmentation des variations vers le centre de la butte, plus près de la position du système d'irrigation. La densité et la longueur racinaire sont également plus importantes au centre de la butte, du fait que les plants y sont positionnés, expliquant les valeurs élevées des zones 12 et 13 malgré de très faibles variations de la teneur en eau. La forte présence de racines dans les zones 8 et 9 s'explique également par la proximité des plants en surface, mais également par un apport plus efficace en eau du système d'irrigation pouvant ainsi favoriser une croissance racinaire importante.

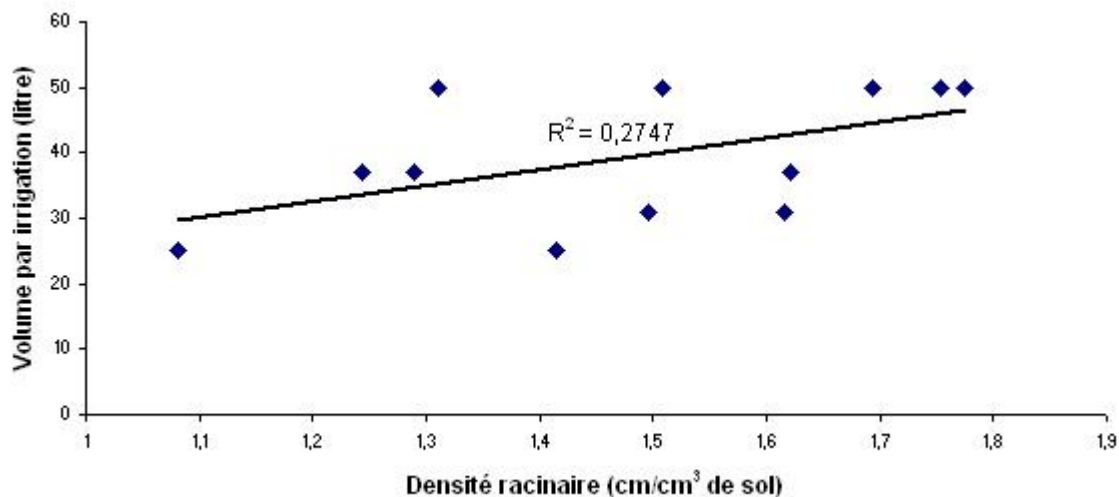


Figure 28. Corrélation entre la densité racinaire et le volume d'eau appliqué par épisode d'irrigation, tous traitements confondus, en 2009.

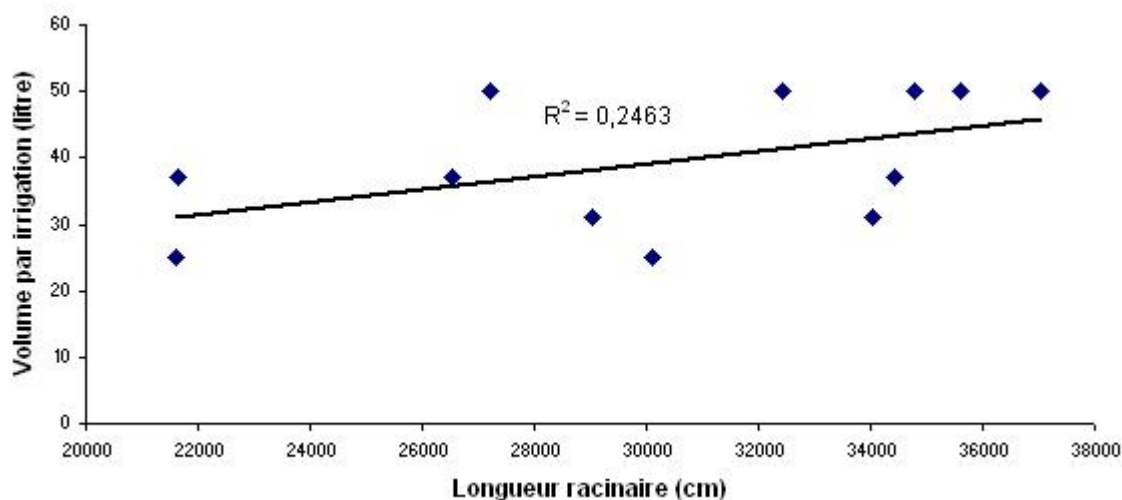


Figure 29. Corrélation entre la longueur racinaire et le volume d'eau appliqué par épisode d'irrigation, tous traitements confondus, en 2009.

Le nombre de litres apportés lors d'un épisode d'irrigation pour la saison 2009 permet d'expliquer partiellement la longueur et la densité des racines mesurées. Effectivement, des corrélations ont été effectuées avec les données de 2009 et des coefficients $r = 0,52$ et $r = 0,50$ ont été obtenus pour la densité et la longueur respectivement (Figure 28 et Figure 29). Selon ces corrélations, plus le nombre de litres par irrigation est important, plus le système racinaire sera développé. Les T6, T8 et T10 de 2009 appliquent 50 litres d'eau par épisode et les moyennes des longueurs racinaires mesurées pour ces traitements sont les plus élevées. Seule exception à la règle, les T7 et T11 n'ont pas engendré un système racinaire aux dimensions supérieures aux T3 et T9, appliquant 37 et 31 litres par irrigation respectivement. Un système racinaire colonisant l'ensemble du sol disponible aura un meilleur potentiel d'absorption puisque des nutriments et de l'eau lui sont fournis. Lors de la saison 2010, les mêmes corrélations ont été effectuées mais les coefficients obtenus ne permettent pas d'affirmer les tendances observées pour la saison 2009 ($r = 0,37$ pour la longueur et $r = 0,12$ pour la densité en relation avec le nombre de litres par épisode d'irrigation). Le système racinaire des plants de 2009 a démontré des longueurs et des densités plus importantes que celles observées en 2010. La principale différence entre les traitements de ces deux saisons est la quantité d'eau appliquée par épisode d'irrigation. Aussi, la saison 2009 à l'Île-d'Orléans fut davantage pluvieuse que la saison 2010. La plus grande disponibilité de l'eau a donc favorisé une croissance racinaire des plants de 2009 par rapport à ceux de 2010, mais n'a toutefois pas réussi à humidifier plus efficacement la butte de sol latéralement (Figure 6 et Figure 7).

La distribution racinaire à l'intérieur de la butte de sol a été très fortement influencée par le mouvement de l'eau. L'ANNEXE 4. Schématisation de la distribution racinaire saison 2010 présente la distribution de la densité racinaire des 6 traitements de 2010. Les T1, T6, T7, T11 et T12 (Figure 68 à Figure 72) présentent des patrons de distributions similaires, c'est-à-dire une densité racinaire située principalement directement sous le plant, limitée à la partie centrale de la butte de sol. De plus, de très faibles valeurs de densité racinaire sont observées en périphérie de la butte.

Cette distribution correspond fortement aux patrons d'écoulement de l'eau d'irrigation générés par l'utilisation des sondes TDR et observés précédemment. Tel que mentionné, la taille du plant prélevé dans la tranche de sol influencera les valeurs de densité racinaire. Les valeurs plus élevées du T12 s'expliquent ainsi par une masse sèche aérienne moyenne des plants prélevés supérieure, variant de 5 à 35 % selon les traitements. Une distribution racinaire différente a pu être observée avec le témoin humide. L'arrangement spatial des racines est beaucoup plus uniforme et présente une organisation très latérale comparativement aux autres traitements (Figure 73). Cette distribution s'apparente bien aux patrons des zones démontrant des variations de la teneur en eau volumique du témoin humide. Par l'utilisation de deux tubes de goutte à goutte, des variations de la teneur en eau ont été mesurées sur l'ensemble de la largeur de la butte de sol. Suite à cette humectation, les racines ont pu croître et se distribuer principalement de façon latérale dans la portion supérieure du sol. Une telle distribution est favorable à une croissance optimale des fraisiers. Comme le démontre le témoin humide, une distribution racinaire colonisant un volume de sol maximal, jumelée à un volume de sol à la portée du système d'irrigation, permet de générer un volume de sol idéal agissant comme un réservoir d'eau disponible à la culture. Ces différences entre les distributions racinaires des traitements de 2010 ont influencé les rendements en fruits, qui seront présentés à la prochaine section.

5.1.4 Vérifier s'il y a un avantage économique à favoriser une stratégie d'irrigation permettant de maintenir un plus grand volume de sol humide accessible à la plante.

5.1.4.1 Saison 2009

Le volume d'eau pouvant être emmagasiné dans le sol est proportionnel au volume de sol à la portée du système d'irrigation. Toutefois, il n'y a d'intérêt à rejoindre un plus grand volume de sol que si ce dernier est en contact avec les racines de la culture. Ainsi, plus le réservoir d'eau valorisable par les racines est important, plus le temps entre deux apports en eau par l'irrigation sera grand, diminuant ainsi la fréquence des épisodes. Selon plusieurs études, un avantage économique existe lorsqu'un plus grand volume de sol agit comme un réservoir d'eau accessible à la plante (Wang et al., 2006; Yuan et al., 2003; Shahnazari et al., 2007 et Oliveira et al., 1996).

Les rendements en fruits présentés sont rapportés sur une base relative. Ainsi le rendement le plus élevé correspondant à 100 % et les autres, nécessairement plus bas, sont exprimés en % de la valeur la plus élevée. Les traitements de 2009 ont d'abord été comparés entre eux sans être regroupés selon leurs caractéristiques communes tels que l'espacement entre les goutteurs, le nombre de litres d'eau appliqués par minute sur une distance de 10 mètres (litres/min./10 m), le nombre de litres appliqués lors d'un épisode d'irrigation (litres/épisode) et le poids des fruits produits par litre d'eau appliqué au cours de la saison (g fruit/litre). L'évaluation des rendements sur une base individuelle (sans regroupement) n'a pas permis de faire ressortir un traitement de l'ensemble. Malgré l'absence de différence significative ($p = 0,16$), certaines tendances peuvent être observées. Les rendements mesurés dans les 3 traitements où 50 litres d'eau sont appliqués lors d'un épisode (7, 10 et 11), sont parmi ceux ayant obtenu les plus hauts rendements (Figure 30). Toutefois, les rendements des traitements 1 et 12, où 25 et 31 litres d'eau étaient respectivement appliqués, se retrouvent également dans les 5 traitements les plus efficaces quant aux rendements produits.

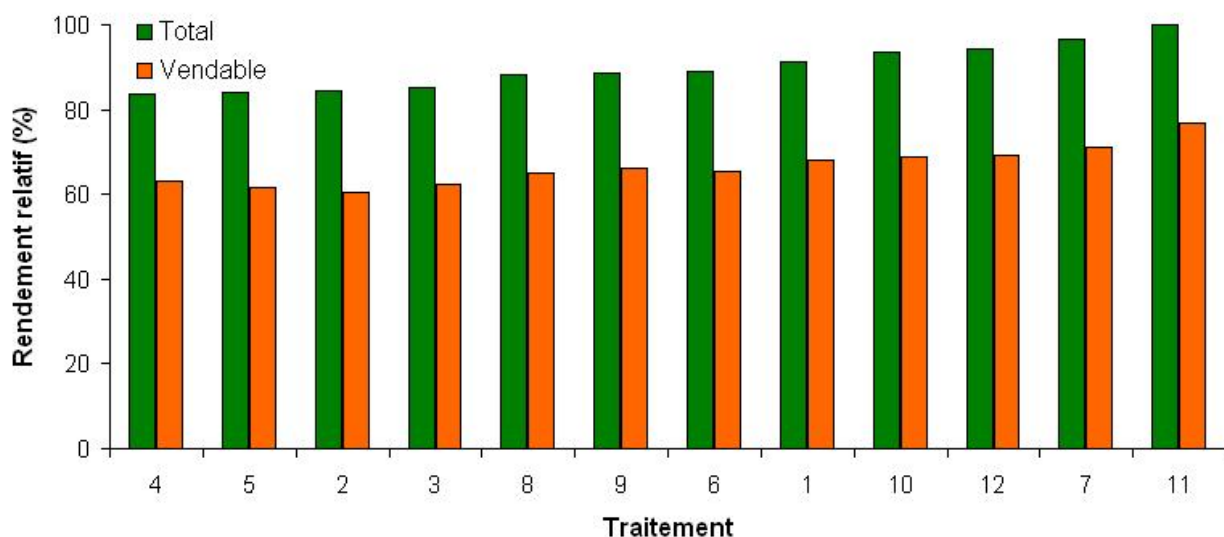


Figure 30. Rendement relatif en fruits selon le traitement pour la saison 2009.

Tel que mentionné précédemment, les 12 traitements à l'essai peuvent être regroupés et comparés entre eux selon le nombre de litres d'eau apportés lors d'un épisode d'irrigation, soit 25, 31, 37 et 50 litres. Les rendements mesurés avec les traitements à 50 litres sont significativement supérieurs de ceux à 37 litres, mais non différents des 25 et 31 litres (Figure 31). Cette différence, difficilement explicable par le seul volume d'eau appliqué par épisode d'irrigation, peut être attribuable au fait que le nombre de traitements est inégal.

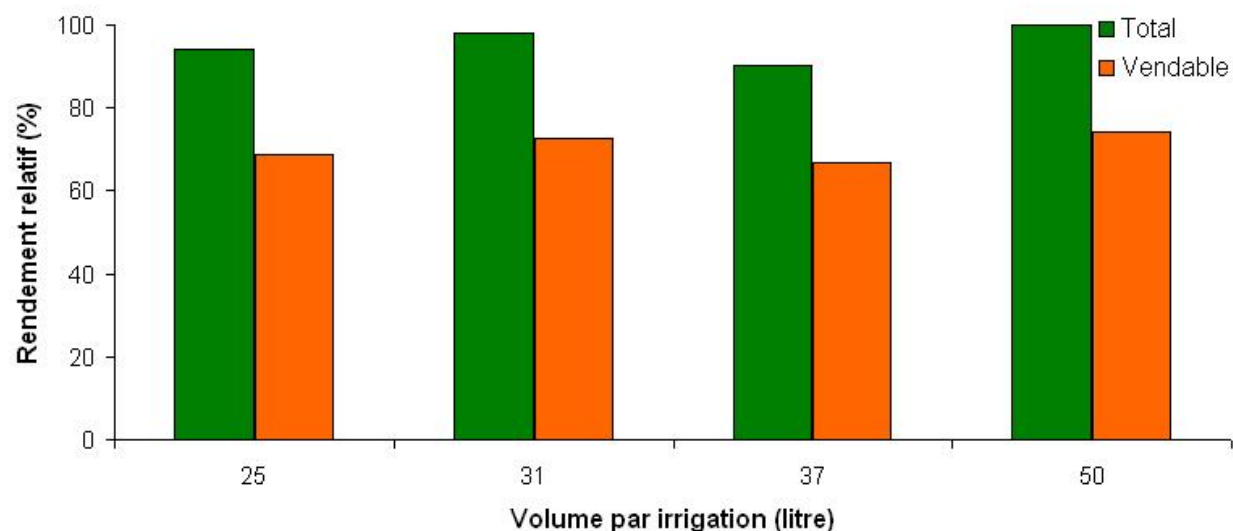


Figure 31. Rendement relatif en fruits selon le nombre de litres d'eau par épisode d'irrigation en 2009.

Maintenant, selon leur débit, les traitements sont répartis en 6 groupes, soit 0,4 - 0,5 - 0,6 - 0,8 - 1,1 et 1,6 litre/minute/10 m. Les rendements mesurés pour le groupe 1,6 litre sont significativement plus élevés que ceux des autres groupes, hormis le 1,1 (Figure 32). De plus, les rendements associés aux traitements apportant 0,6 litre/minute/10 m sont significativement plus faibles que ceux des autres traitements, exception faite des traitements ayant un débit de 0,4 litre. Les traitements 10 et 11 sont encore parmi les plus efficaces.

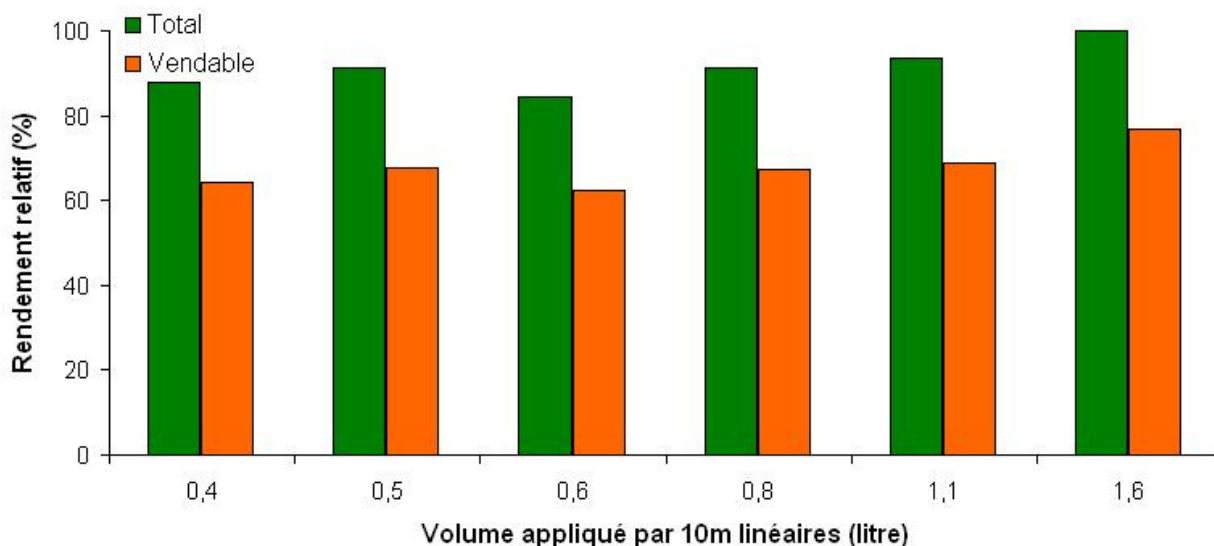


Figure 32. Rendement relatif en fruits selon le nombre de litres par épisode pour 10 m de rang en 2009.

Les rendements ont également été comparés selon l'espacement entre les goutteurs. Ainsi, les rendements associés à un espacement de 10 cm sont significativement différents de ceux associés à des valeurs de 15, 20 et 30 cm (Figure 33). Le T11 est le seul utilisant un espace de 10 cm. De l'ensemble des évaluations de rendement, le traitement 11 se situe toujours dans les valeurs des critères associés à des rendements significativement plus élevés. Quoique non différent des T1, T10, T12 et T7, il reste un traitement se démarquant des autres. Le T7 tire également son épingle du jeu, il a produit les deuxièmes meilleurs rendements totaux et vendables, de plus, des variations de la teneur en eau volumique ont pu être observées dans plusieurs zones de sol (Figure 6).

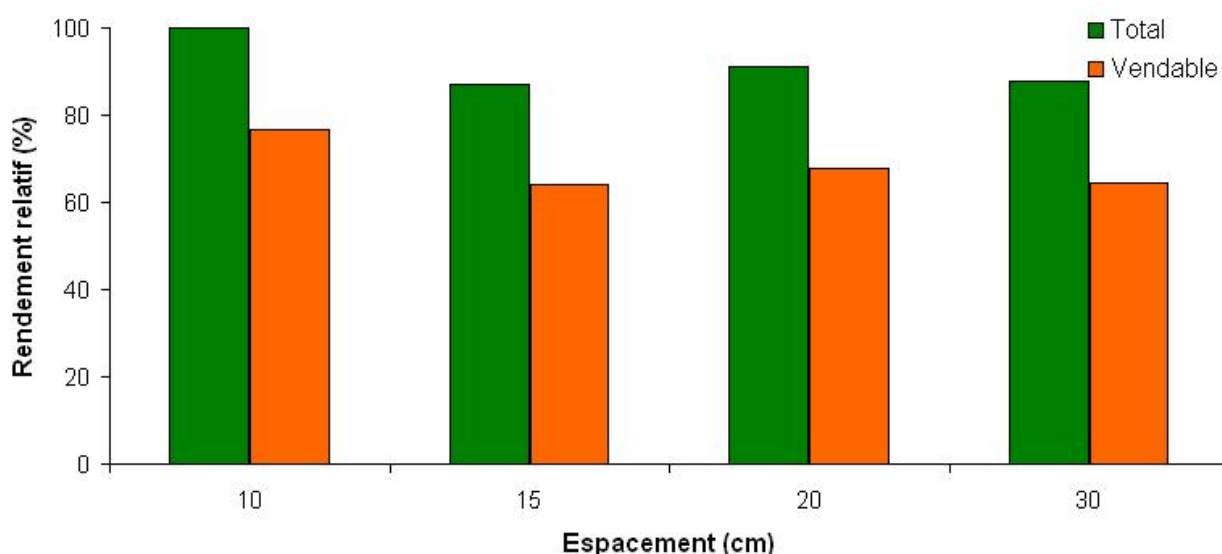


Figure 33. Rendement relatif en fruits selon l'espacement entre les goutteurs en 2009.

En additionnant le nombre d'épisodes d'irrigation qui a été nécessaire pour chacune des parcelles tout au long de la saison 2009, on obtient le volume total des apports en eau. Ce volume peut ainsi être utilisé pour calculer le coefficient d'efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation, soit le nombre de grammes de fruits produits par litre d'eau apporté (Figure 34). Rapporté sur une base relative, davantage de fruits (en termes de poids) ont été produits pour chacun des litres d'eau apportés avec les T9, T12, T2 et T1. Le T1 (25 litres/épisode), avec des rendements comparables aux plus élevés, est le plus efficace en termes de rendement produit par volume d'eau d'irrigation appliqué. Ce traitement applique 31 litres d'eau par épisode d'irrigation, une valeur intermédiaire entre les 25 et 50 litres des autres traitements.

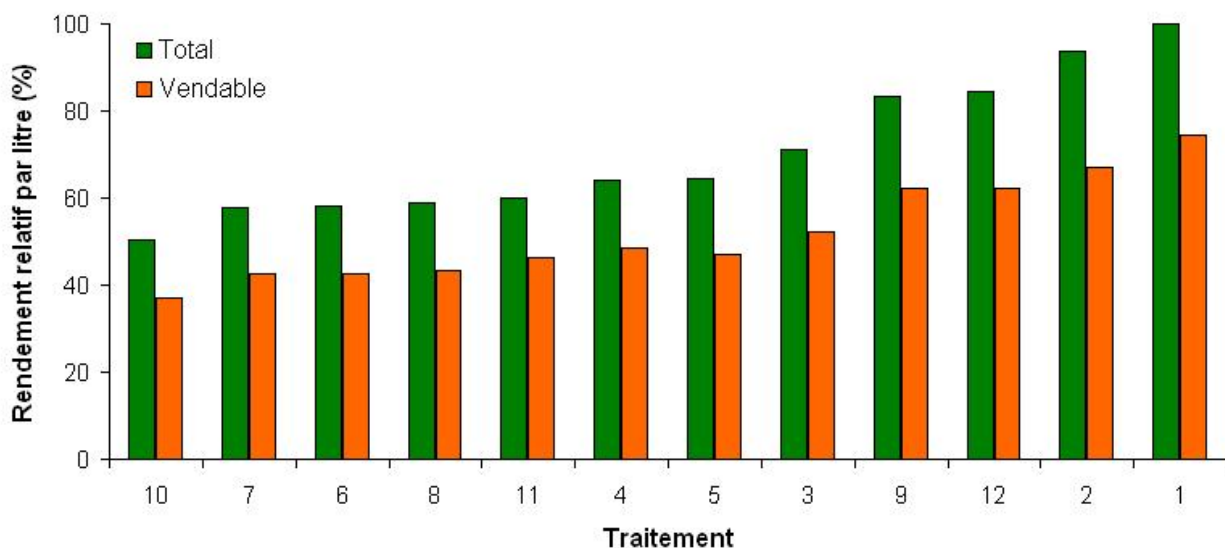


Figure 34. Rendement relatif (grammes de fruits produits/litre d'eau appliqué) selon le traitement en 2009.

Des indicateurs de la croissance des plants et des fruits ont été mesurés pour la saison estivale 2009. Ces derniers permettent d'appuyer l'évaluation et l'analyse des rendements. Il faut toutefois mentionner que ces données n'ont pas été analysées statistiquement, mais permettent tout de même d'illustrer des tendances.

Afin de dresser un portrait moyen d'un fraisier pour chacun des traitements de 2009, le poids moyen de la masse sèche aérienne et le poids en matière sèche du système racinaire ont été schématisés (Figure 35). Le nombre de cymes bipares et de feuilles a été comptabilisé tout au long de la saison. Aucune différence significative n'est cependant ressortie entre les différents traitements. Toutefois, il existe une forte corrélation ($R^2 = 0,52$ ou $r = 0,72$) entre le nombre de cymes bipares et de feuilles produites pour l'ensemble de la saison (Figure 36). Dans le cas des rendements totaux observés pour la saison 2009, une forte corrélation ($R^2 = 0,54$ ou $r = 0,73$) est également ressortie entre ces derniers et la masse sèche aérienne totale des traitements (Figure 37). Cependant, aucune corrélation n'a pu être observée entre le nombre de feuilles et de cymes bipares avec la masse sèche aérienne totale et par plant. Le taux de croissance des feuilles et des cymes (inflorescences) a été mesuré et rapporté en 8 périodes bihebdomadaires. Ainsi, ces périodes s'échelonnent du 12 juin au 5 octobre 2009 (Tableau 2).

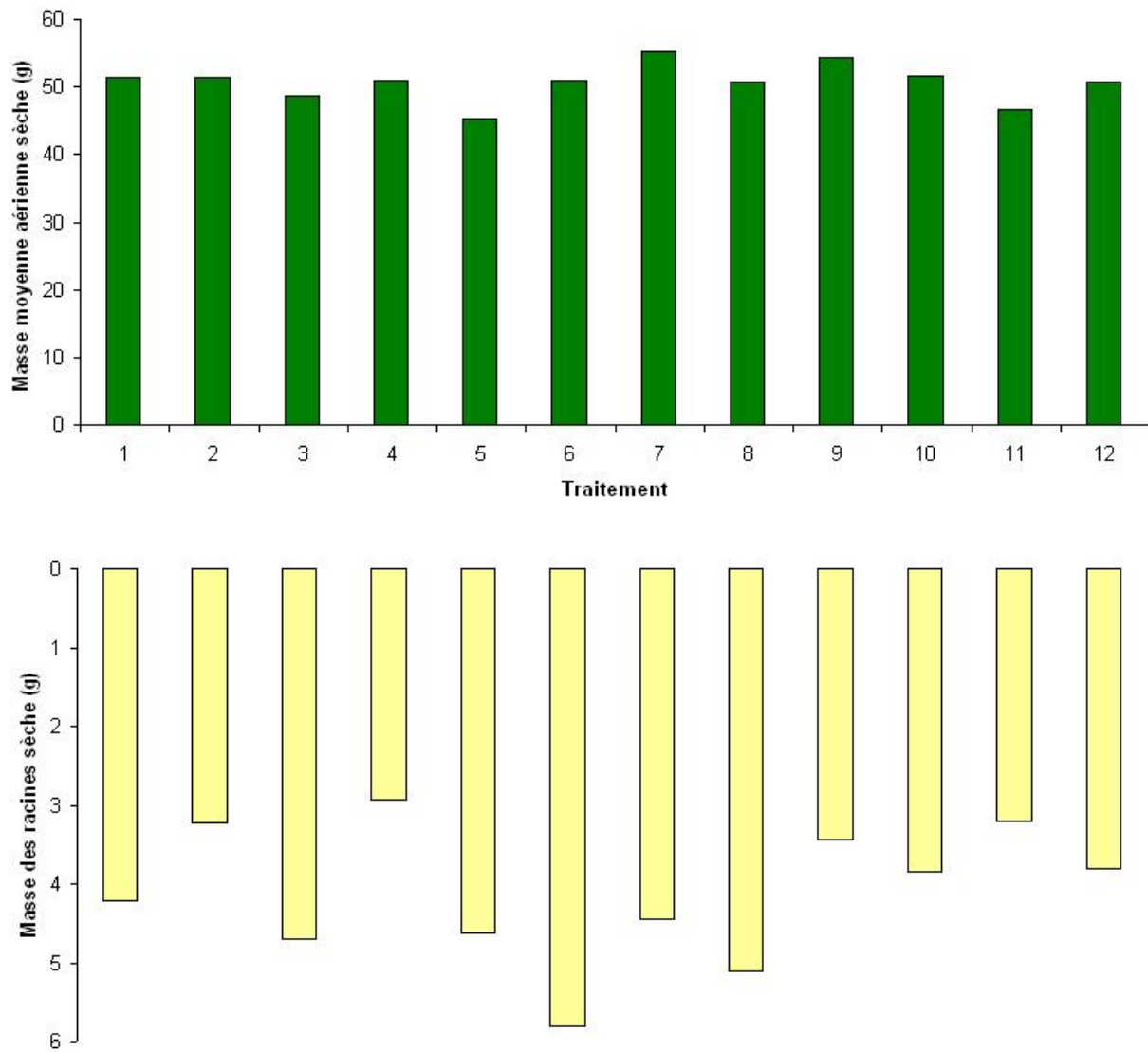


Figure 35. Poids en matière sèche des parties aériennes (g/plant) et des racines (g/tranche de sol) selon le traitement (bloc 2) en 2009.

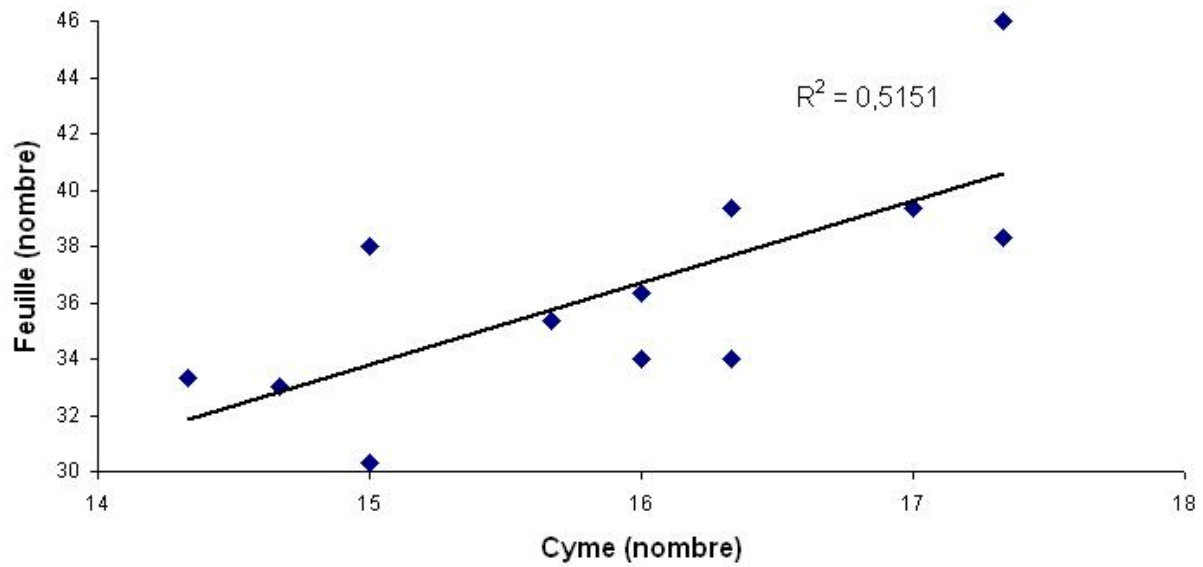


Figure 36. Corrélation entre le nombre de cymes (inflorescences) et de feuilles par plant en 2009.

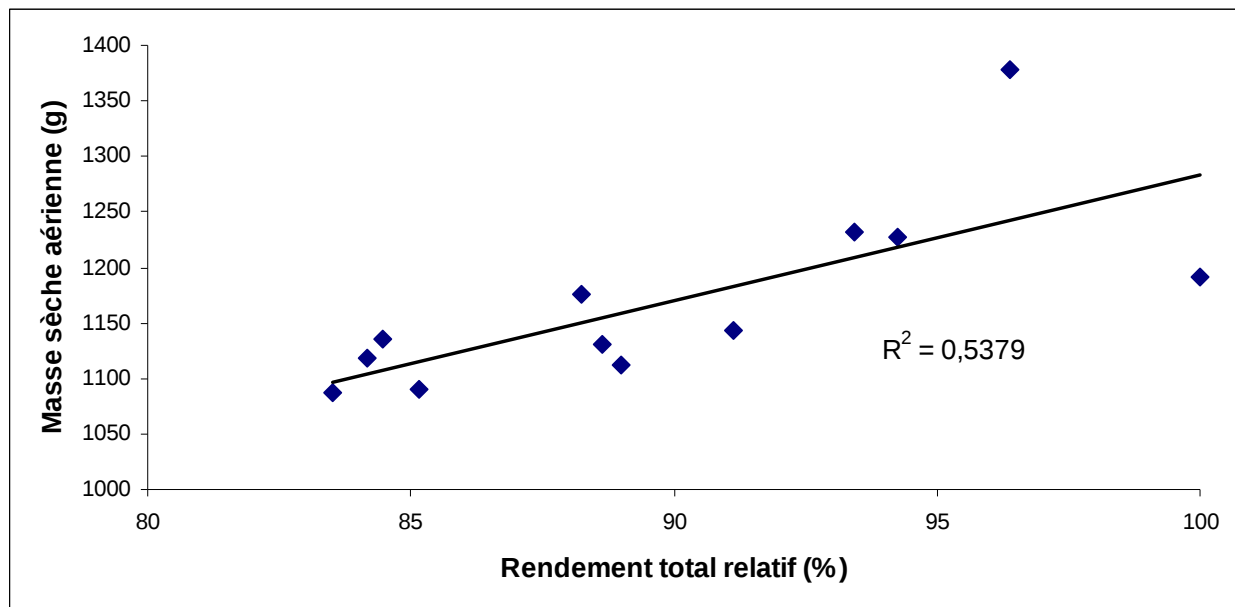


Figure 37. Corrélation entre le rendement total relatif en fruits et le poids en matière sèche des parties aériennes par parcelle pour l'ensemble des traitements du bloc 2 en 2009.

Tableau 2. Les 8 périodes correspondant au suivi du taux de croissance des inflorescences et des feuilles pour la saison 2009.

Période	Début	Fin
1	12 juin	25 juin
2	26 juin	9 juillet
3	10 juillet	23 juillet
4	24 juillet	6 août
5	7 août	20 août
6	21 août	3 septembre
7	4 septembre	17 septembre
8	18 septembre	5 octobre

Le taux de croissance végétatif et celui ayant trait aux inflorescences sont croissants jusqu'à la période 5 où la diminution marquée à partir de la période suivante va de pair avec l'augmentation de la production en fruits (Figure 38 et Figure 41). De plus, la recrudescence de la croissance observée aux périodes 7 et 8 coïncide avec la diminution de la production en fruits. Il est à noter que les quantités rapportées pour chacune des périodes ont été mesurées sur 36 fraisières. Aussi, les quantités présentées pour la première période incluent le nombre de feuilles et d'inflorescences au moment du premier recensement.

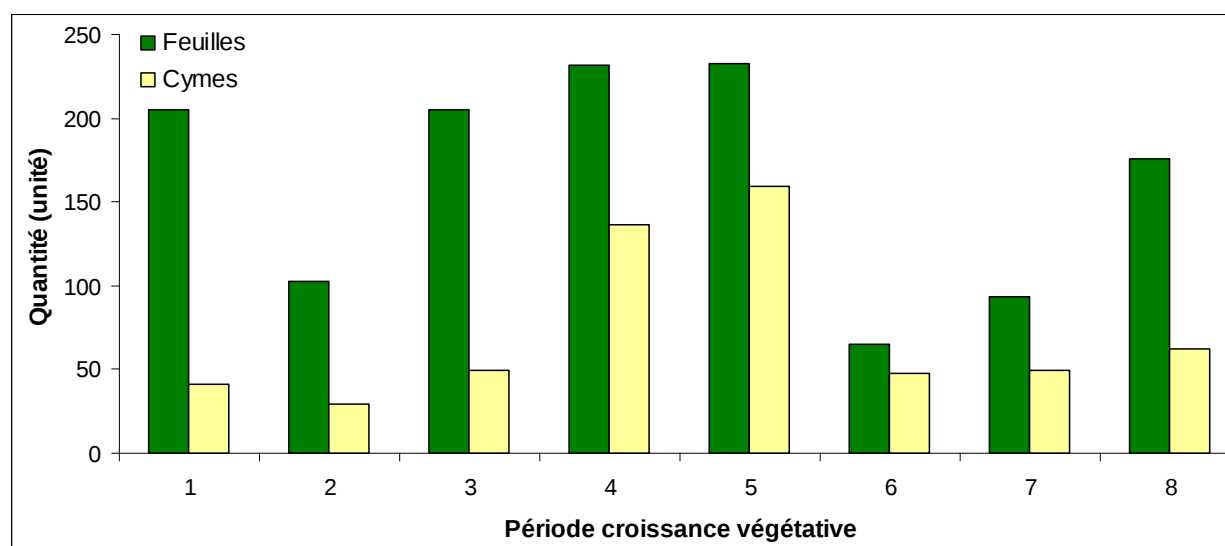


Figure 38. Production de feuilles et de cymes par période en 2009 (valeurs pour 36 parcelles).

Le nombre de jours moyens nécessaires à la production d'une fraise mûre, toutes périodes confondues, a été mesuré tout au long de la saison. Ce nombre a varié entre 23 et 26 pour la saison 2009 (Figure 39). Quoique le nombre de jours soit peu différent entre les 12 traitements, l'intérêt d'une telle mesure est réel en contexte québécois de production. La saison de production étant limitée, une diminution du nombre de jours entre la fleur et le fruit mûr attribuable aux pratiques culturales pourrait être économiquement favorable. Pour cette étude, les traitements 3 et 12 ont été les seuls à avoir une moyenne de jours de croissance inférieure à 24.

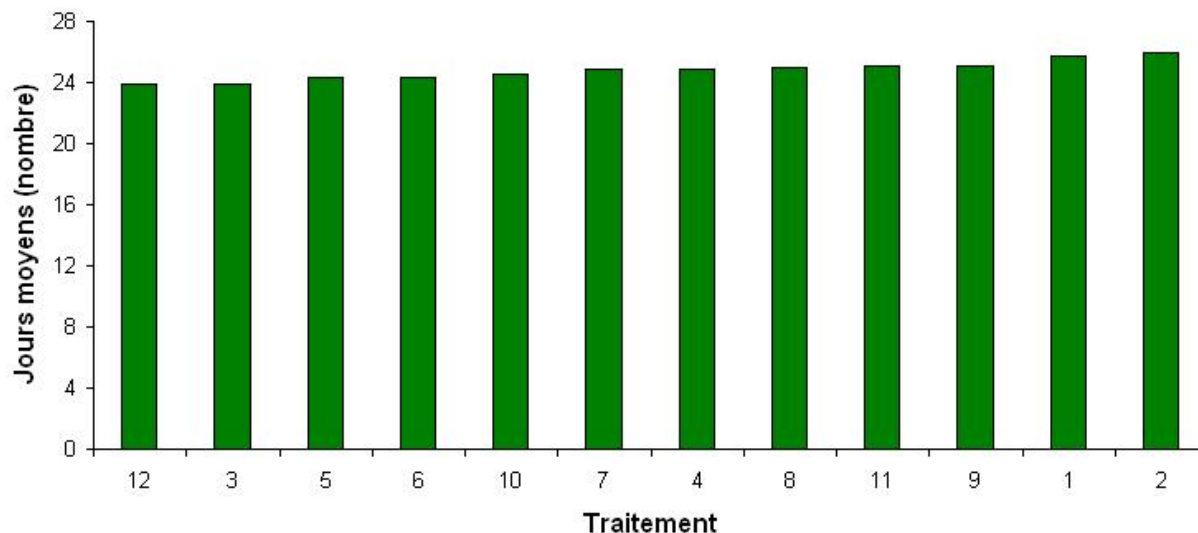


Figure 39. Jours moyens entre la fleur nouvellement ouverte et le fruit récolté selon le traitement en 2009.

Pour effectuer ce suivi, la saison a été divisée en 15 périodes hebdomadaires. Ainsi, l'identification et les récoltes des fruits se sont effectuées du 22 juin au 5 octobre 2009 (Tableau 3).

Tableau 3. Les 15 périodes correspondant au suivi du nombre de jours nécessaires pour produire un fruit mûr en 2009.

Période	Début	Fin
1	22 juin	28 juin
2	29 juin	5 juillet
3	6 juillet	12 juillet
4	13 juillet	19 juillet
5	20 juillet	26 juillet
6	27 juillet	2 août
7	3 août	9 août
8	10 août	16 août
9	17 août	23 août
10	24 août	30 août
11	31 août	6 septembre
12	7 septembre	13 septembre
13	14 septembre	20 septembre
14	21 septembre	27 septembre
15	28 septembre	5 octobre

Pour chacune de ces périodes, il est donc possible de connaître la date moyenne d'ouverture de la fleur ainsi que la durée de production des fruits (Figure 40). Les fraises récoltées lors des périodes 8, 9 et 10, soit du 10 au 30 août 2009, ont été les plus rapidement produites (21 jours) et proviennent de fleurs ayant éclos entre le 20 juillet et le 9 août 2009.

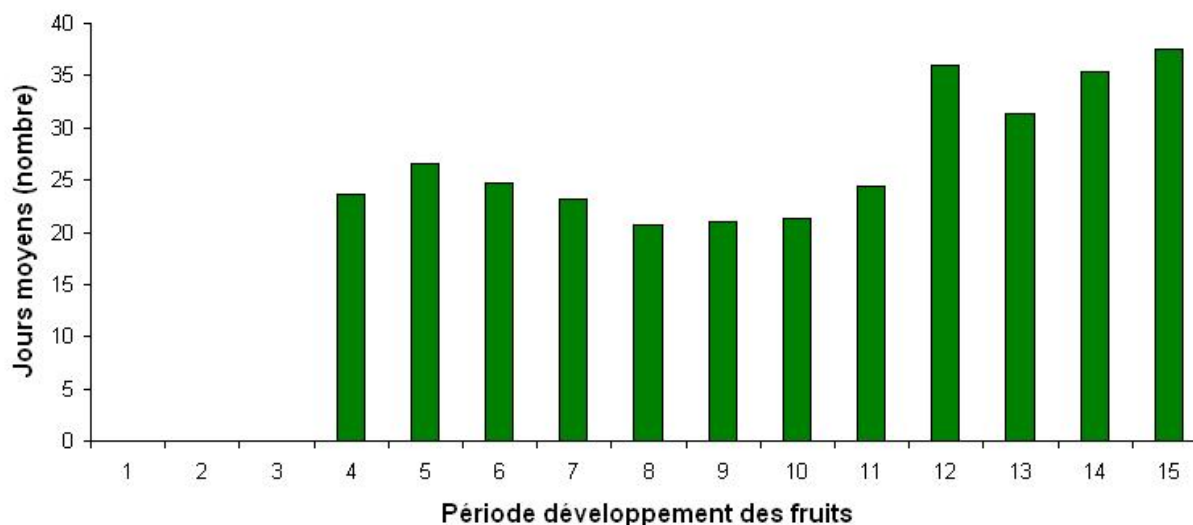


Figure 40. Durée de maturation des fraises en fonction de la période de récolte en 2009.

Les rendements totaux et vendables peuvent être répartis selon les huit périodes bihebdomadaires précédemment utilisées afin d'observer dans le temps la variation des volumes de fruits produits (Figure 41). Les rendements les plus élevés, tant totaux que vendables pour l'ensemble des traitements, ont été obtenus du 21 août au 17 septembre 2009 (périodes 6 et 7). Cette période correspond à des valeurs de jours de maturation illustrées à la Figure 40 (périodes 9 à 13). La période de production maximale, en termes de rendement en fruits, correspond aux périodes où le taux d'apparition des inflorescences est le plus important, car la durée entre ces deux périodes est la même que le nombre de jours nécessaires à la production de ces fruits.

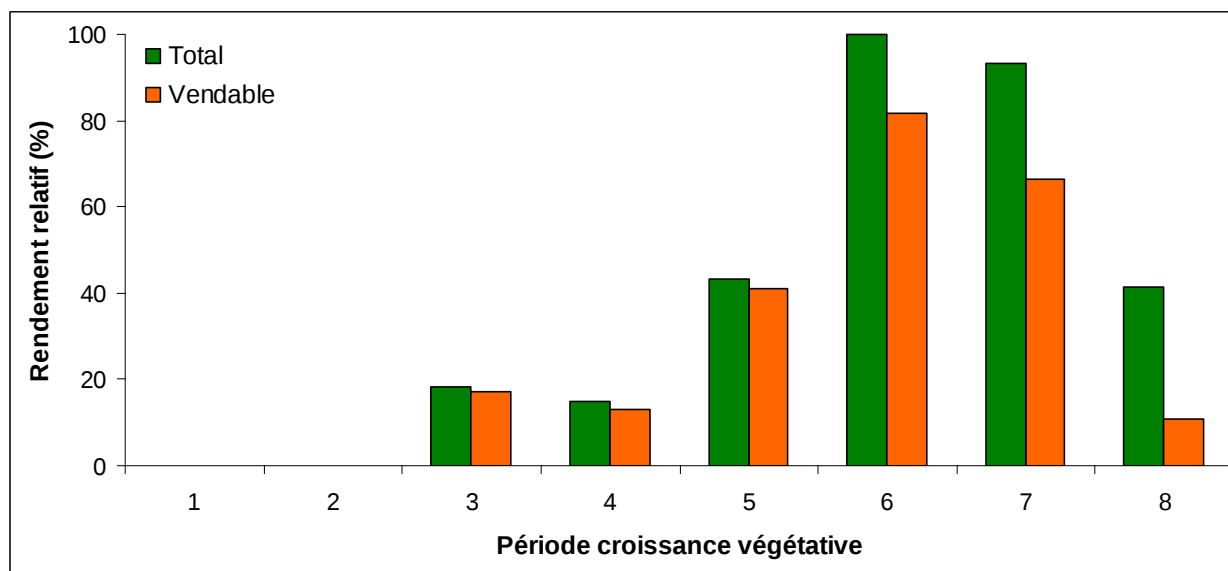


Figure 41. Rendement relatif en fruits en fonction de la période de suivi du taux de croissance végétatif en 2009.

Des 12 traitements à l'essai en 2009, seulement 5 ont été répétés en 2010. Afin de déterminer ces derniers, les critères de sélection suivants avaient été retenus : réponse des zones de sol aux irrigations, densité et longueur racinaire, rendement total et vendable et coefficient d'efficacité d'utilisation de l'eau apportée par l'irrigation.

À propos du volume de sol à la portée des épisodes d'irrigation, les traitements où une variation de la teneur en eau du sol a été observée dans le plus grand nombre de zones sont les T1, T3, T4, T5, T7 et T9. L'ampleur des variations mesurées était plus élevée pour les T5, T7 et T9 (Figure 6). Il est toutefois difficile d'identifier une caractéristique commune à ces traitements (débit, espacement entre les goutteurs, etc.). De plus, pour un traitement donné, même lorsque plusieurs zones de sol étaient rejointes par les apports en eau, ces dernières ne l'étaient pas toujours d'une façon optimale, considérant la réserve utile en eau (RU). Pris individuellement, aucun traitement n'a permis de rejoindre plus de 70 % du volume de sol de la butte (Figure 13). Enfin, une des stratégies à l'étude impliquait d'utiliser des débits supérieurs à la conductivité hydraulique saturée du sol afin de favoriser le mouvement latéral de l'eau. Cependant, les mesures effectuées au champ indiquent que cette solution n'est pas envisageable, du moins pour ce sol; les plus grands débits utilisés étant 95 % inférieurs à la conductivité hydraulique mesurée.

Maintenant, à partir des mesures effectuées en octobre 2009, il a été possible de déterminer la densité racinaire pour chacun des traitements selon 14 zones, les mêmes qui ont fait l'objet d'un suivi de la teneur en eau avec des sondes TDR (Figure 16). D'abord, la distribution asymétrique des racines dans la butte de sol résulte de l'implantation en quinconce des fraisiers. Cela dit, 90 % des racines ont un diamètre inférieur à 0,4 mm, peu importe le traitement (Figure 17). Les traitements où les densités les plus importantes ont été mesurées sont les T3, T6, T8, T9 et T10 (Figure 19). Avec une densité de $1,9 \text{ cm/cm}^3$ de sol et une longueur totale de 37 051 cm, le T6 figure parmi les meilleurs traitements, alors que le T2 avec une densité de $1,1 \text{ cm/cm}^3$ de sol et

21 615 cm fait partie des valeurs mesurées les plus faibles. Aussi, les densités les plus importantes se retrouvent au centre de la butte sous le plant, et ce, jusqu'à une profondeur de 20 cm (Figure 24 et Figure 25).

En ce qui a trait aux rendements total et vendable mesurés en 2009, les traitements ont été comparés entre eux selon leurs caractéristiques communes tels que l'espacement entre les goutteurs, le nombre de litres d'eau appliqués par minute sur une distance de 10 mètres (litres/minute/10 m), le nombre de litres appliqués lors d'un épisode d'irrigation (litres/épisode) et le coefficient d'efficacité d'utilisation de l'eau apportée. Comparé sur une base individuelle (sans regroupement), on observe une tendance où les plus grands écarts sont de 20 % pour le rendement total et de 27 % pour les rendements vendables (Figure 30). Toutefois, selon le nombre de litres apportés par minute par 10 m (longueur des parcelles), les rendements mesurés avec le traitement 1,6 litre par minute par 10 m sont significativement plus élevés que les 0,4 - 0,5 - 0,6 et 0,8 litre par minute par 10 m (Figure 32). De plus, selon l'espacement entre les goutteurs, les rendements total et vendable pour l'espacement de 10 cm sont significativement différents des 15, 20 et 30 cm, dans un ordre de grandeur d'environ 15 % pour le rendement total et 20 % pour le vendable (Figure 33). L'espacement de 10 cm et le débit de 1,6 litre par minute par 10 m réfèrent au T11.

Enfin, le volume total des apports en eau d'irrigation par traitement et les rendements mesurés permettent d'établir un coefficient d'efficacité d'utilisation de l'eau appliquée. Les T1 (25 litres par épisode) et T12 (31 litres par épisode) se classent parmi les plus efficaces, tout en ayant des rendements comparables aux plus élevés (Figure 34).

Ainsi, comme l'un des principaux objectifs de la première année était d'identifier les traitements qui ont offert les meilleures performances afin de les répéter en 2010, les résultats orientent le choix vers les T1, T6, T7, T11 et T12. Les rendements tendent à être plus élevés dans les T1, T7, T11 et T12. De plus, les coefficients d'efficacité d'utilisation de l'eau des T1 et T12 sont parmi les meilleurs. Aussi, la plus grande densité racinaire a été mesurée dans le T6. Enfin, un sixième traitement fût inclus au dispositif où deux tubes de goutte à goutte ont été installés.

5.1.4.2 Saison 2010

Les rendements relatifs totaux et vendables (cumulés sur la saison et exprimés par parcelle) des différents traitements de 2010 sont présentés à la Figure 42. Les rendements totaux possèdent, entre certains des traitements, des différences significatives ($p = 0,070$). Le T12 est ainsi différent du T6 ($p = 0,024$), T7 ($p = 0,037$) et TH ($p = 0,004$), de plus le TH est différent du T1 ($p = 0,085$). Les rendements vendables, quant à eux, n'ont démontré aucune différence statistiquement significative entre eux ($p = 0,22$). On peut toutefois affirmer que les rendements vendables sont tous proportionnels aux rendements totaux correspondants.

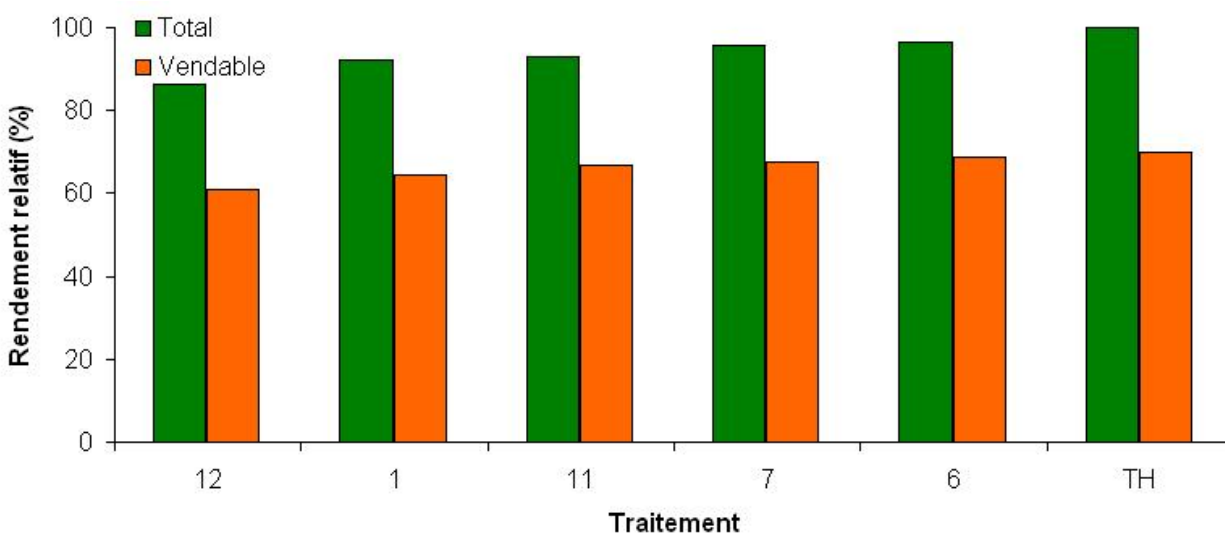


Figure 42. Rendement relatif en fruits selon les traitements pour la saison 2010.

Le nombre de fruits par traitement, total et vendable (Figure 43), n'a démontré aucune différence statistiquement significative. Les calibres vendable et total, semblables statistiquement entre les traitements, sont présentés à la Figure 44. Le calibre vendable moyen est d'environ 13 g par fruit et le calibre total moyen oscille entre 10 et 11 g par fruit. Le calibre varie tout au long de la saison de production. En observant ces variations dans les 8 périodes de suivi de la croissance des plants, ces dernières peuvent être en partie expliquées par le nombre de feuilles produites durant ces mêmes périodes. Ces deux paramètres possèdent un coefficient de corrélation moyen qui pourrait expliquer plus de 50 % des variations de rendement observées ($r = 0,56$) (Figure 45).

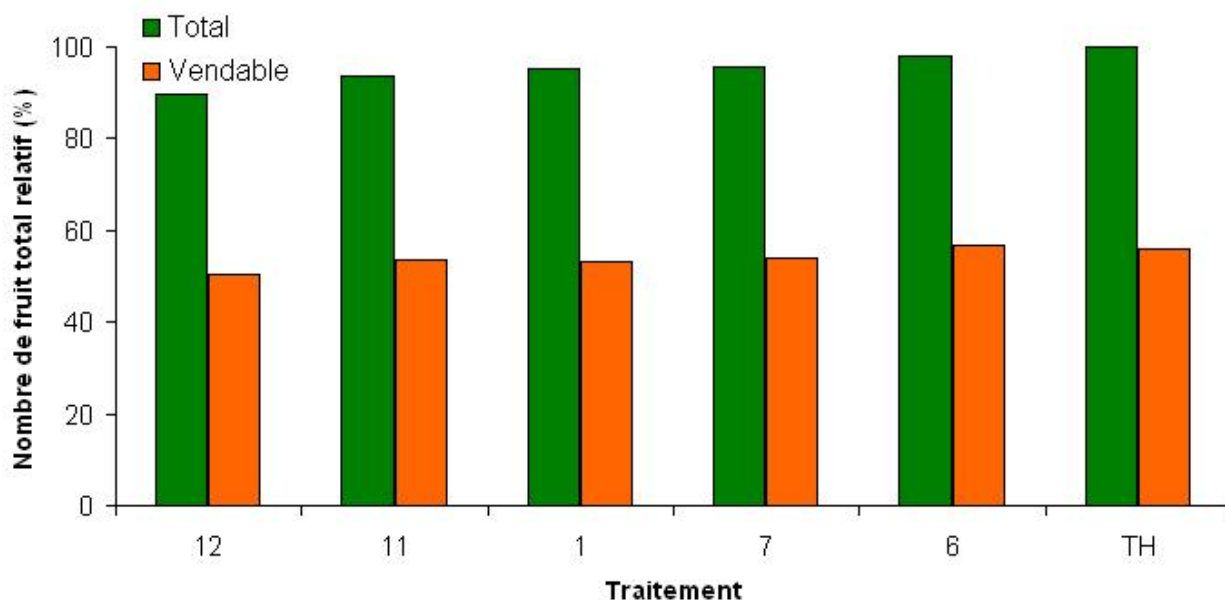


Figure 43. Nombre de fruits total relatif (%) pour la saison 2010.

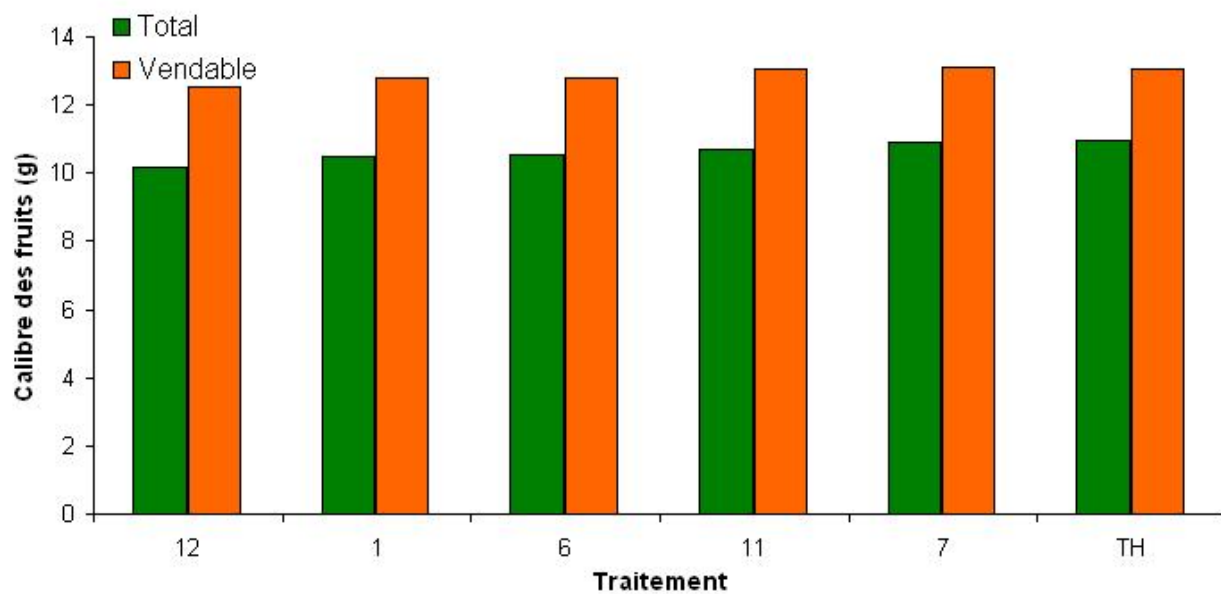


Figure 44. Calibre des fruits en 2010.

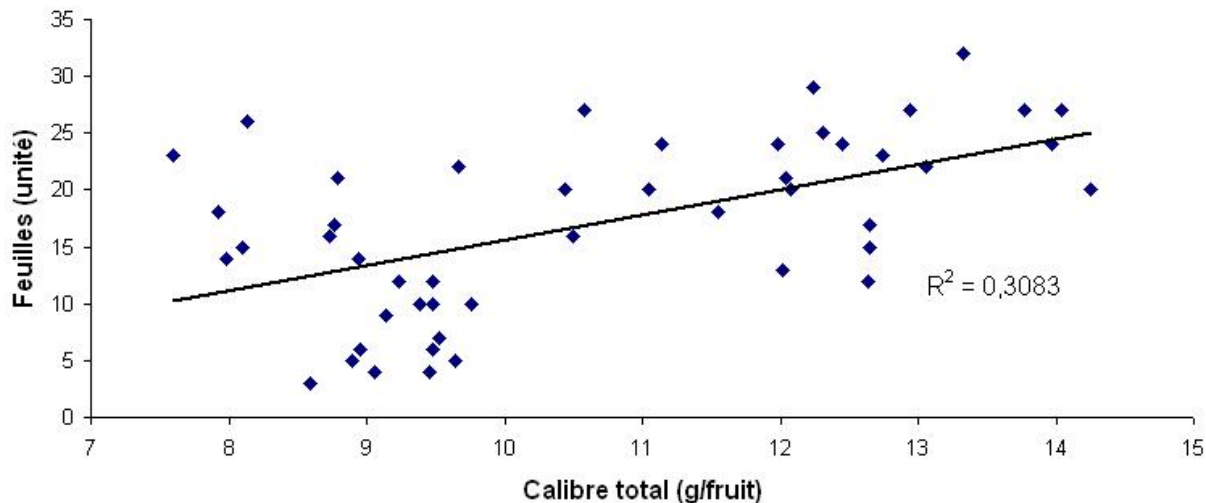


Figure 45. Corrélation entre le nombre de nouvelles feuilles et le calibre des fruits totaux par période bihebdomadaire en 2010.

Les rendements ont également été analysés statistiquement par période bihebdomadaire (8) et par période de production de fruits (3), couvrant la durée entre la première et la dernière récolte (Tableau 4).

Tableau 4. Périodes bihebdomadaires couvrant la durée des récoltes de 2010.

Période	Début	Fin
1	28 juin	10 juillet
2	11 juillet	23 juillet
3	24 juillet	5 août
4	6 août	18 août
5	19 août	31 août
6	1 septembre	13 septembre
7	14 septembre	26 septembre
8	27 septembre	8 octobre

Cette analyse permet d'évaluer l'évolution des rendements entre les traitements, pendant la portion de la saison où avait lieu des récoltes. Les rendements totaux ont démontré des différences significatives entre certains traitements, pendant les périodes 4, 5 et 6. La période 4 correspond au moment de la saison où les plus forts rendements, tous traitements confondus, ont été mesurés (Figure 46).

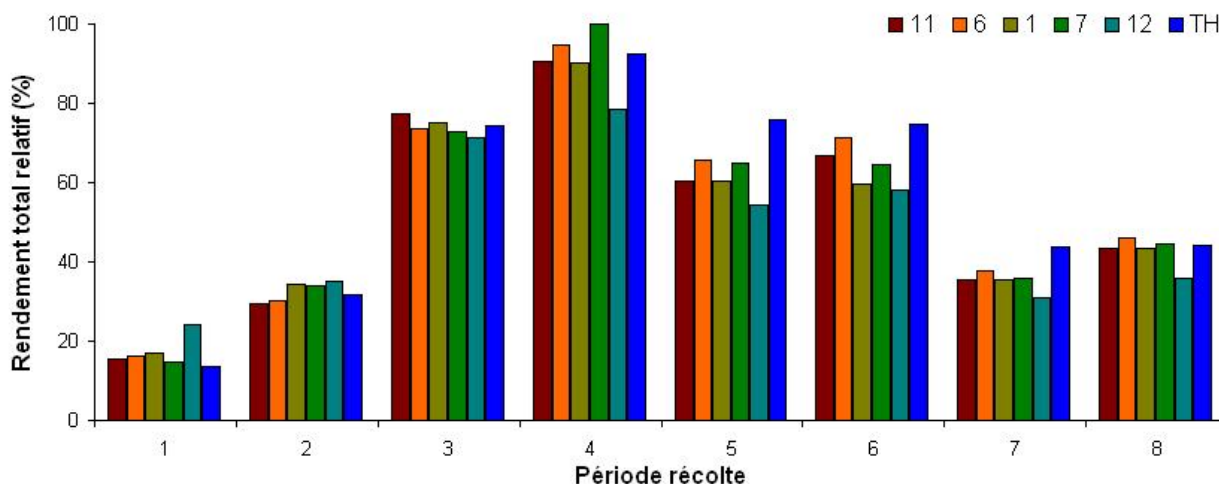


Figure 46. Rendement total relatif (%) en fruits en fonction des périodes de récolte en 2010.

C'est 50 % du poids total en fruits qui a été produit dans la période comprise entre le 2 août et le 6 septembre 2010. Lors de cette période, le T12, possédant l'espacement entre les goutteurs le plus important (30 cm), a produit les plus faibles rendements (79 %), significativement différents de tous les autres traitements (Figure 47).

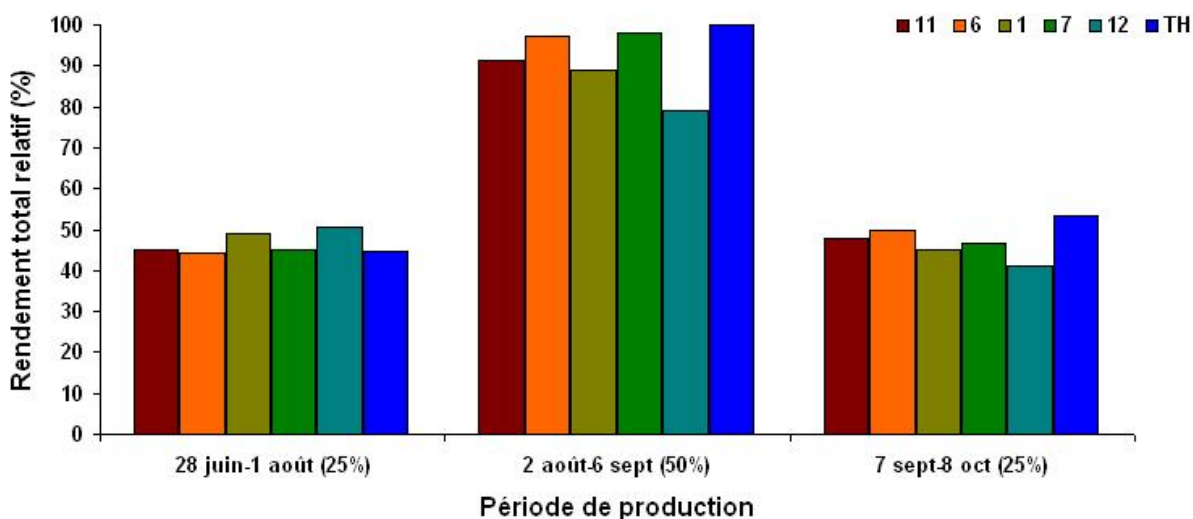


Figure 47. Rendement total relatif selon la proportion de fruits produits.

Ainsi, pour un même volume d'eau apporté par épisode d'irrigation (12 litres), les T1 et T7 ont pu générer un réservoir plus volumineux créé par des espacements moins larges entre les goutteurs. Lors d'une période de forte demande hydrique de la part de la culture, ces espacements se sont avérés bénéfiques et se sont traduits par des rendements supérieurs (88 % T1 et 98 % T7). Les différents espacements entre les goutteurs pourront toujours influencer l'humidification du sol longitudinalement à l'intérieur de la butte par la variation du nombre de goutteurs pour une même longueur de rang en culture irriguée. Par l'augmentation du nombre de

points d'entrée d'eau, le volume de sol humidifié se trouve à augmenter proportionnellement avec ces derniers, créant un plus grand réservoir d'eau disponible au système racinaire de la culture. Dans un contexte de saison de production où les conditions météorologiques sont peu pluvieuses et chaudes, un système d'irrigation pourrait avoir avantage à maximiser ce réservoir d'eau. Des différences aussi marquées n'ont cependant pas pu être observées entre les traitements aux espacements plus rapprochés (10, 15 et 20 cm). Toutefois, le témoin humide s'est démarqué des autres traitements de manière significative entre le 19 et le 31 août 2010, période caractérisée par de forts rendements totaux en fruits. Cette différence peut être attribuable à l'utilisation de deux tubes de goutte à goutte, disposés de part et d'autre du centre de la butte de sol. Cette disposition a permis une humectation latérale maximale, la seule observable pour l'ensemble des traitements et pour le type de sol rencontré dans le cadre de cette étude. Le fait d'avoir utilisé deux tubes de goutte à goutte, où l'espacement entre les goutteurs de 20 cm équivaut à un espacement de 10 cm (à la différence que les points d'entrée d'eau sont disposés théoriquement en quinconce), optimise ainsi le volume de sol atteignable par le système d'irrigation.

Les rendements vendables, quant à eux, ont démontré des différences lors des périodes 4 et 5. Les résultats de l'analyse statistique ne permettent toutefois pas de déterminer entre quels traitements ces différences avaient lieu. Le nombre de fruits totaux et vendables par période bihebdomadaire a également été analysé, mais comme pour les rendements vendables, les résultats ne nous permettent pas d'identifier les traitements différents entre eux malgré les différences entre les périodes 5, 6 et 7 (total) et 4 et 5 (vendable).

En rapportant les rendements sur la quantité totale de litres d'eau utilisés au cours de la saison 2010, nous pouvons évaluer l'efficacité d'utilisation de l'eau (Figure 48). Ce paramètre peut être illustré selon les périodes de production présentées précédemment au Tableau 4.

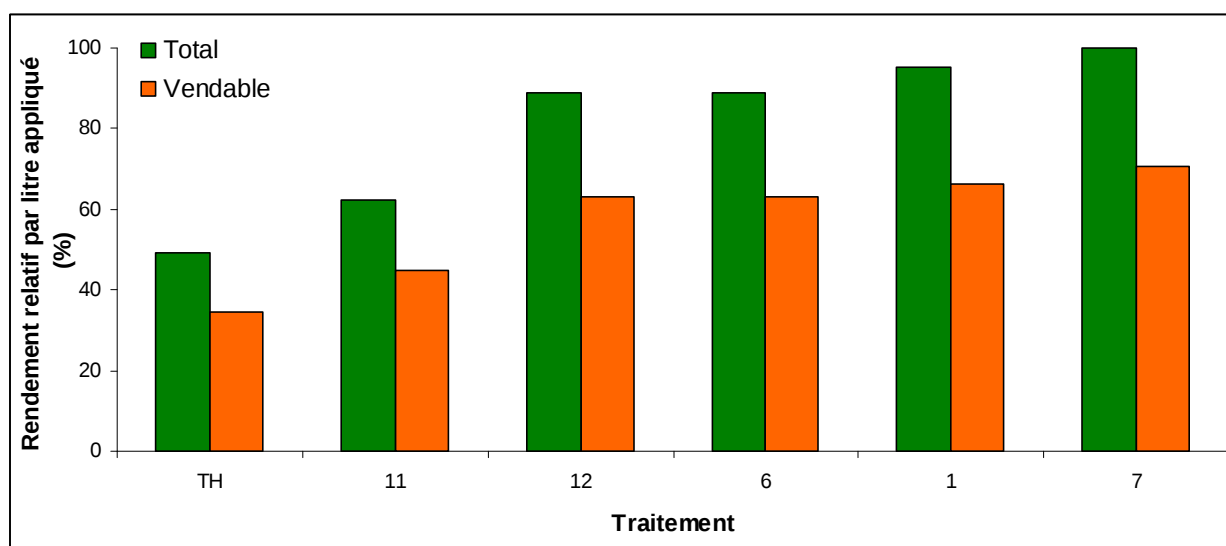


Figure 48. Rendement relatif en fruits par litre d'eau appliqué pour la saison 2010.

Du 6 août au 13 septembre 2010 des différences significatives entre les rendements totaux ont été observées. L'efficacité d'utilisation de l'eau pour T1 et T7, qui utilisent le même volume d'eau par unité expérimentale et possèdent des rendements similaires, a augmenté jusqu'à 17,1 %, pour le T7, par l'utilisation d'un débit de 0,6 contre un de 0,3 litre par minute (Figure 49). Cette différence est principalement observable lors de la période à plus fort rendement (6 au 18 août 2010) mais tend à diminuer par la suite. Les quantités d'eau appliquées ont donc un impact majeur sur l'efficacité d'utilisation de l'eau pendant la période de rendement optimal. Le T7 tend à se démarquer par les valeurs les plus importantes d'efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation pour la saison entière.

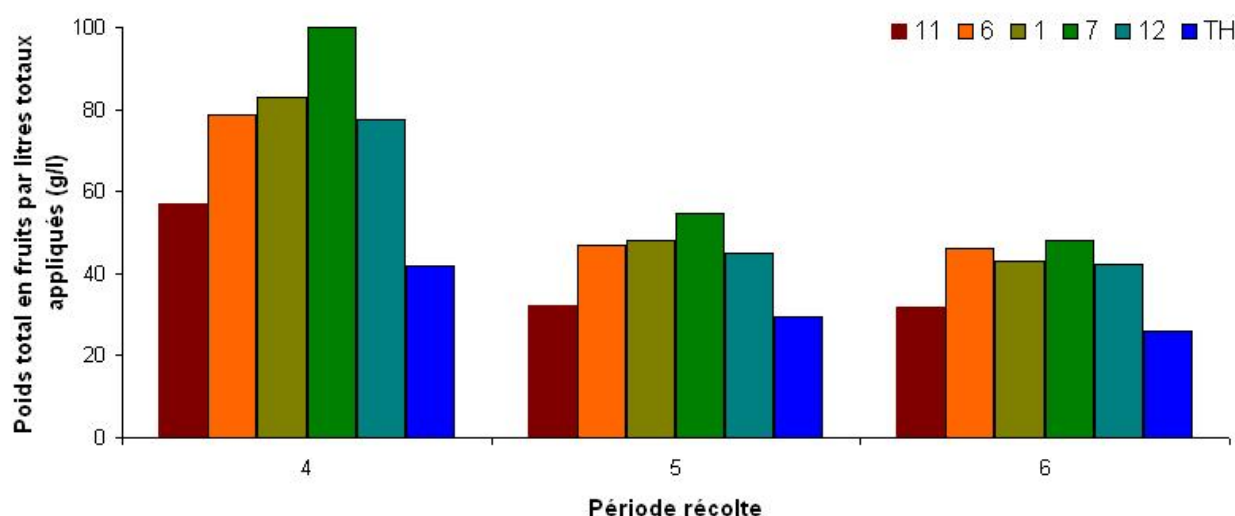


Figure 49. Efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation selon les périodes où les rendements sont maximaux en 2010.

Tel qu'observé précédemment dans la description des traitements (Tableau 1), les T11 et TH utilisent jusqu'à deux fois plus d'eau par épisode d'irrigation. Le volume total d'eau appliqué a été le plus important pour ces derniers traitements que pour l'ensemble des autres traitements (Figure 50), malgré les volumes d'eau supérieurs utilisés ainsi que le nombre d'épisodes d'irrigation.

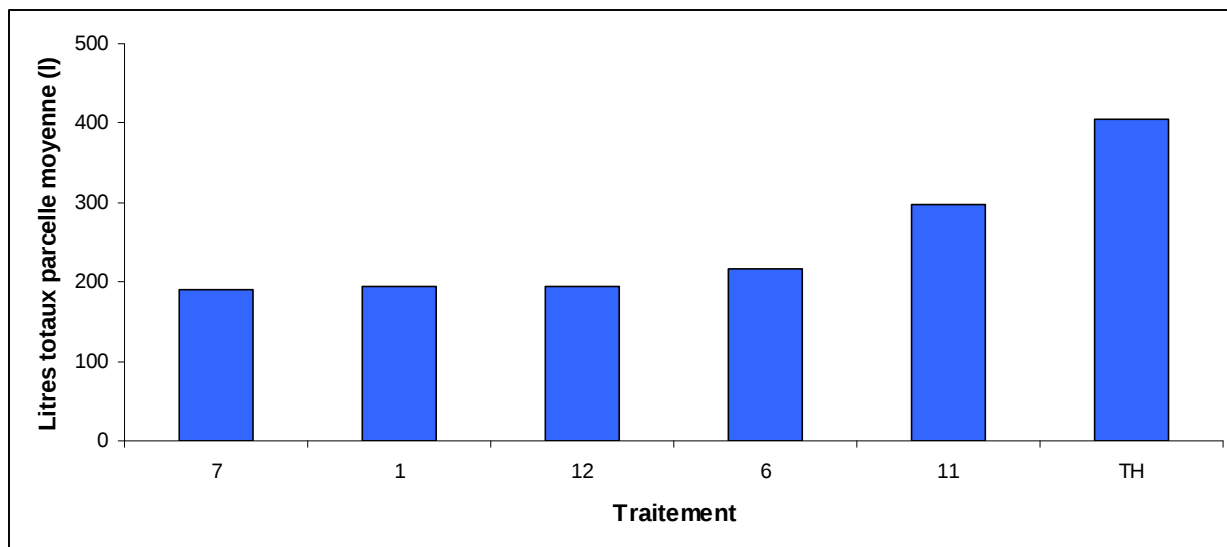


Figure 50. Volume d'eau d'irrigation total (litre) des traitements pour la saison 2010.

Cette situation peut être expliquée par l'observation de la masse sèche des plants produite sur l'ensemble de la saison. En fournissant aux fraisiers de T11 et TH un volume d'eau supérieur, leur croissance en a été tout autant augmentée (Figure 51).

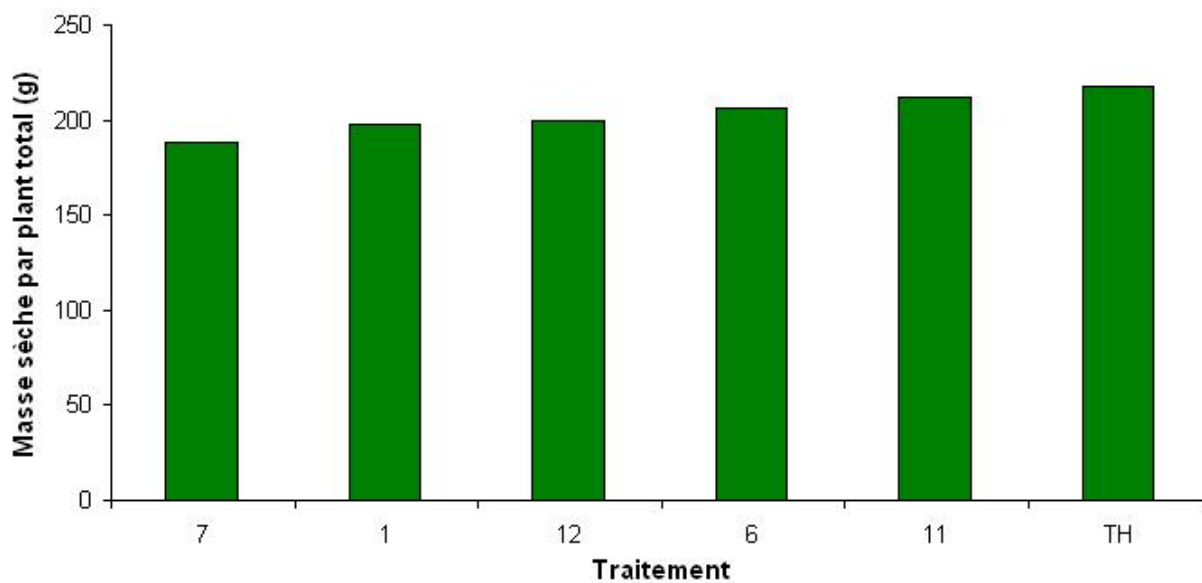


Figure 51. Masse sèche aérienne par plant total (g) en 2010.

De plus, une corrélation ($r = 0,47$) de force moyenne existe entre la masse sèche des plants et les quantités d'eau appliquées (par parcelle) (Figure 52). La masse sèche par plant permet également d'expliquer, de manière très forte par un coefficient de corrélation $r = 0,78$, le poids des fruits produits par plant (Figure 53). Ainsi, plus la masse sèche d'un plant est importante, plus ce dernier produira un rendement en fruits, en termes de poids, important.

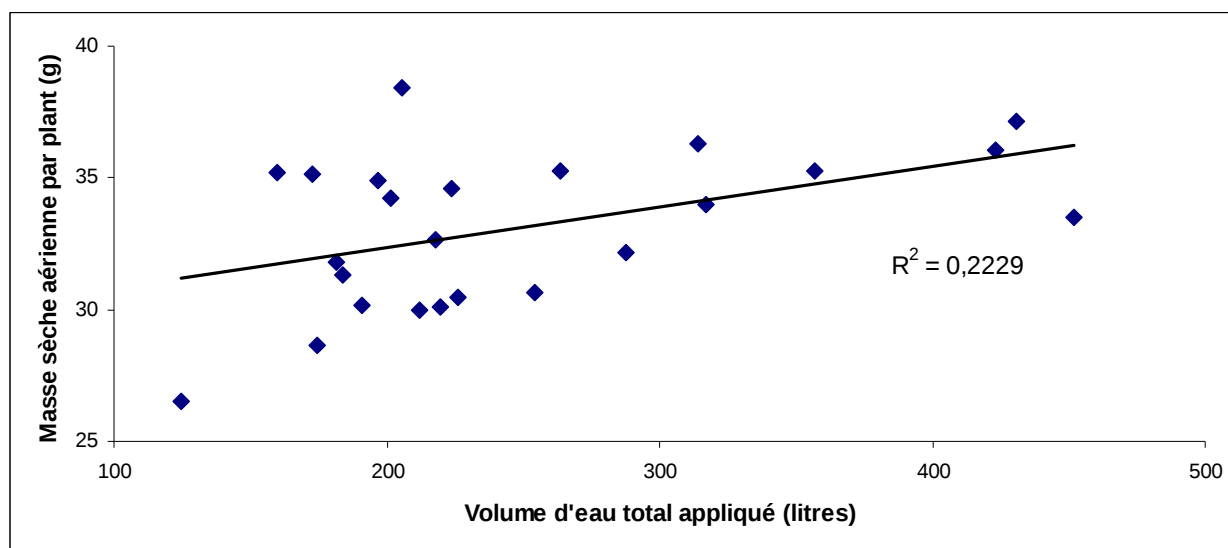


Figure 52. Corrélation entre la masse sèche aérienne par plant (g) et le volume d'eau total appliqué (litre) en 2010.

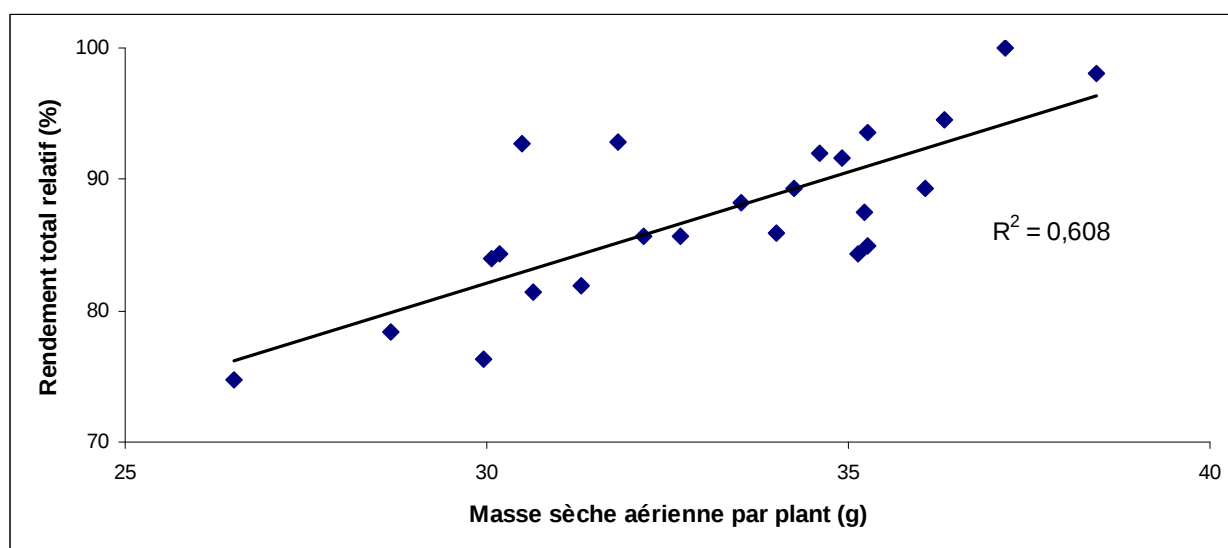


Figure 53. Corrélation entre la masse sèche aérienne par plant (g) et le rendement total relatif (%) en fruits en 2010.

Tout comme en 2009, un suivi hebdomadaire de l'évolution des stades phénologiques des plants de chaque parcelle a été effectué en 2010 (feuilles et cymes). Aucune différence significative n'a pu être démontrée pour ces deux paramètres, entre les traitements. Il existe quand même une forte corrélation ($r = 0,89$), supérieure à celle observée en 2009, entre le nombre de nouvelles feuilles et de nouvelles cymes (Figure 54) démontrant que ces deux paramètres sont fortement liés.

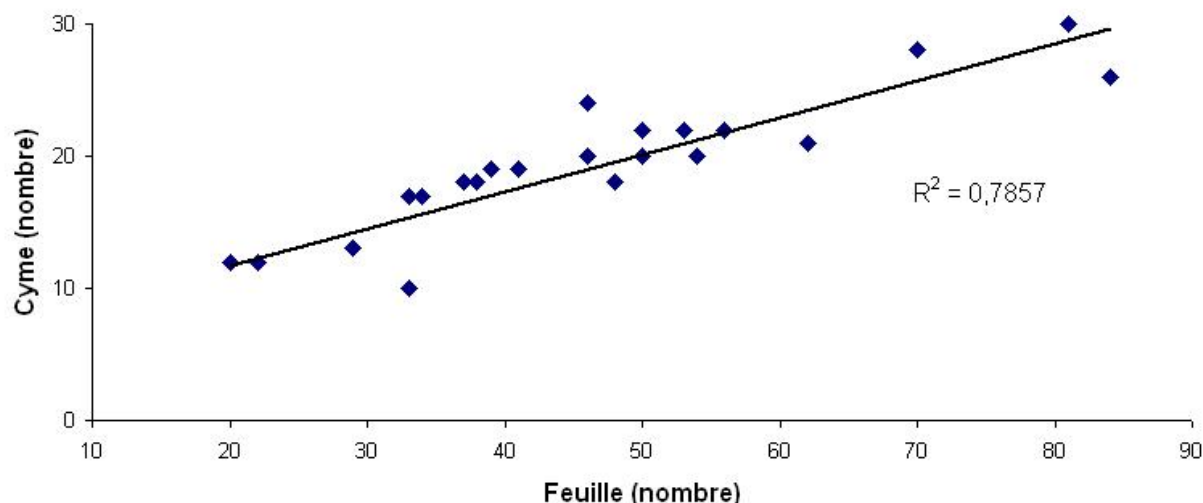


Figure 54. Corrélation entre le nombre de nouvelles feuilles et de nouvelles cymes en 2010.

L'évolution des nouvelles feuilles et cymes a été observée du 27 mai au 9 octobre 2010. Ces observations sont présentées selon des périodes précises (Tableau 5) et sont rapportées à la Figure 55. Le taux de croissance des feuilles a été relativement constant pour atteindre son maximum à la période 3, plus tôt par rapport à la saison 2009 (Figure 38). Le nombre de nouvelles feuilles diminue ensuite progressivement jusqu'à la période 8. La baisse marquée des nouvelles feuilles à la période 7 ne reflète cependant pas la réalité observée au champ. Un dénombrement des feuilles prévu à la période 7 a été reporté à la période 8. Ainsi, la valeur relative à la période 7 devrait être bonifiée et celle de la période 8 diminuée, ceci explique la hausse observée à la période 8. Le décompte du nombre de nouvelles cymes a débuté à la période 2, période durant laquelle la suppression manuelle des inflorescences a cessé. Le maximum de nouvelles cymes a été observé à la période 4 pour ensuite diminuer en moyenne de 20 unités par période. La productivité maximale de 2010, observée à la période 5, a été obtenue suite à l'émergence de 61 % du total des feuilles et de 46 % du total des cymes (Figure 56).

Tableau 5. Les 8 périodes correspondant au suivi du taux de croissance des inflorescences et des feuilles pour la saison 2010.

Période	Début	Fin
1	27 mai	12 juin
2	13 juin	29 juin
3	30 juin	16 juillet
4	17 juillet	2 août
5	3 août	19 août
6	20 août	5 septembre
7	6 septembre	22 septembre
8	23 septembre	9 octobre

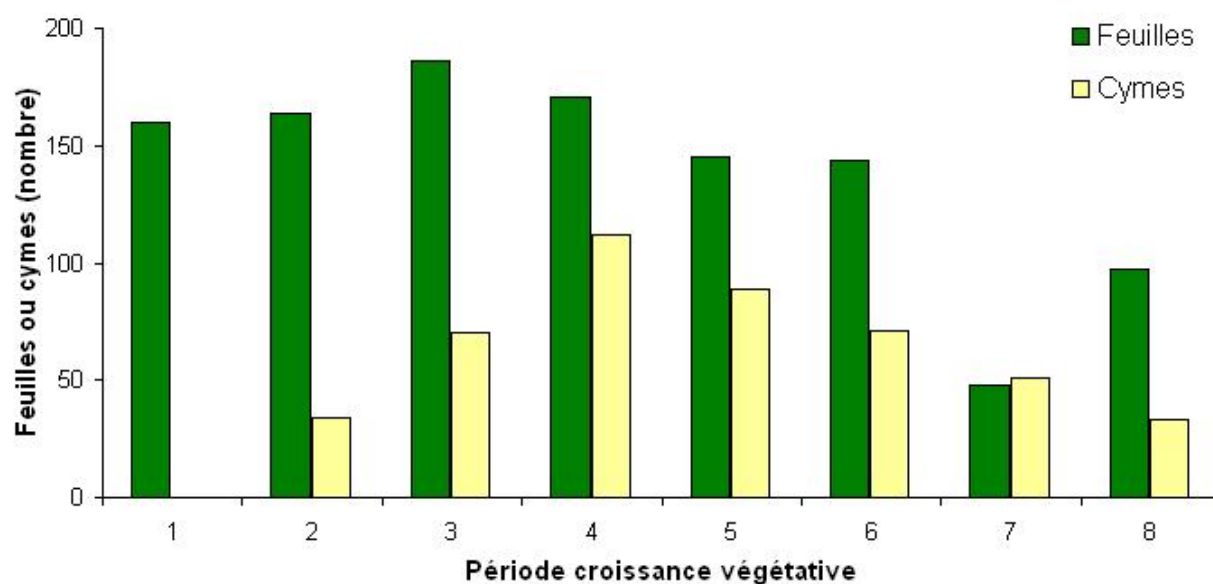


Figure 55. Production de feuilles et de cymes par période (valeurs pour 24 parcelles) en 2010.

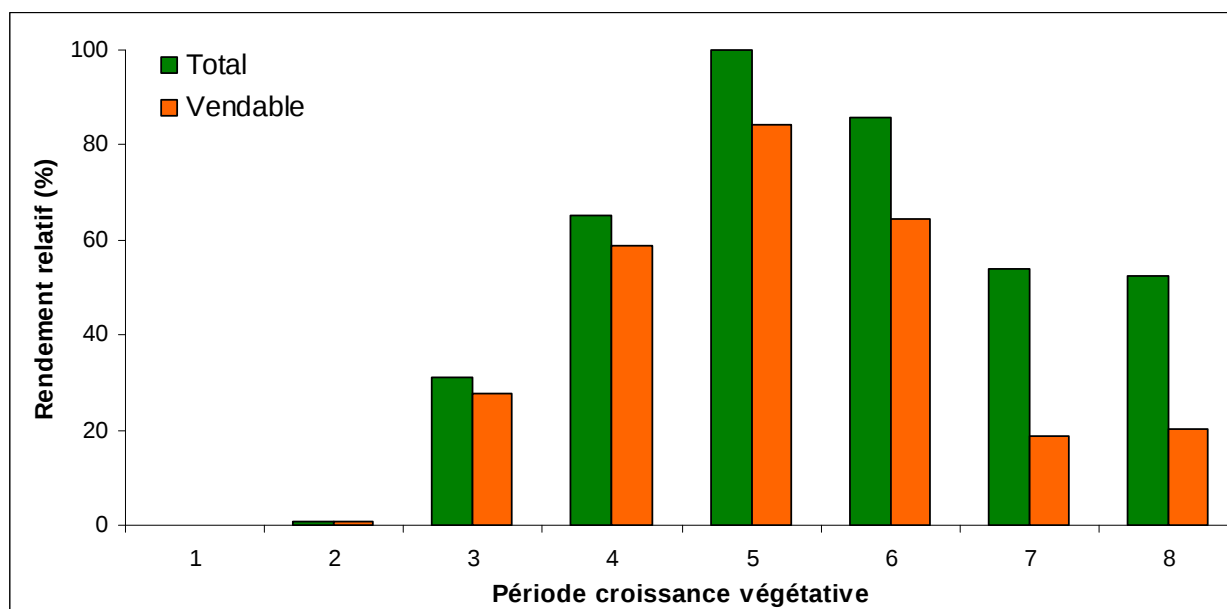


Figure 56. Rendement relatif en fruits en fonction des périodes de suivi de la croissance végétative en 2010.

Le nombre de jours entre une fleur nouvellement ouverte et la récolte du fruit mûr a été mesuré et reporté dans 15 périodes hebdomadaires (Tableau 6). La période 5 est celle où les fruits ont été produits le plus rapidement avec une moyenne de 18,6 jours (Figure 57). Le nombre de jours moyens ne cesse d'augmenter par la suite, pour atteindre 42 jours à la période 15. Le nombre de jours moyens par traitement se situe entre 23 et 25, pour une durée minimale de 24,0 jours pour le T12 et d'une durée maximale de 25,3 jours pour le TH. Aucune différence significative entre les traitements n'a été observée quant au nombre de jours moyens entre la fleur nouvellement ouverte et le fruit mûr (Figure 58). Le pic de production de fraises, observé durant la période 5, correspond à des fruits ayant mis 23 jours entre le stade de fleur nouvellement ouverte et le fruit mûr. Ces fruits ont donc été produits à l'intérieur des périodes 3 et 4, correspondant à une des périodes de la saison où le développement des cymes était maximal (Figure 55). Le rendement relatif de la période 6 démontre une diminution comparativement à la période 5. Durant cette période, les fruits ont mis 25 jours à se développer, débutant donc au cours des périodes 4 et 5. Ces deux périodes correspondent au début de la diminution du nombre de nouvelles feuilles et cymes, se répercutant donc sur les rendements observés à la période 6.

Tableau 6. Les 15 périodes correspondant au suivi du nombre de jours nécessaires pour produire un fruit mûr en 2010.

Période	Début	Fin
1	15 juin	22 juin
2	23 juin	1 juillet
3	2 juillet	9 juillet
4	10 juillet	17 juillet
5	18 juillet	25 juillet
6	26 juillet	2 août
7	3 août	10 août
8	11 août	18 août
9	19 août	26 août
10	27 août	3 septembre
11	4 septembre	11 septembre
12	12 septembre	19 septembre
13	20 septembre	27 septembre
14	28 septembre	5 octobre
15	6 octobre	13 octobre

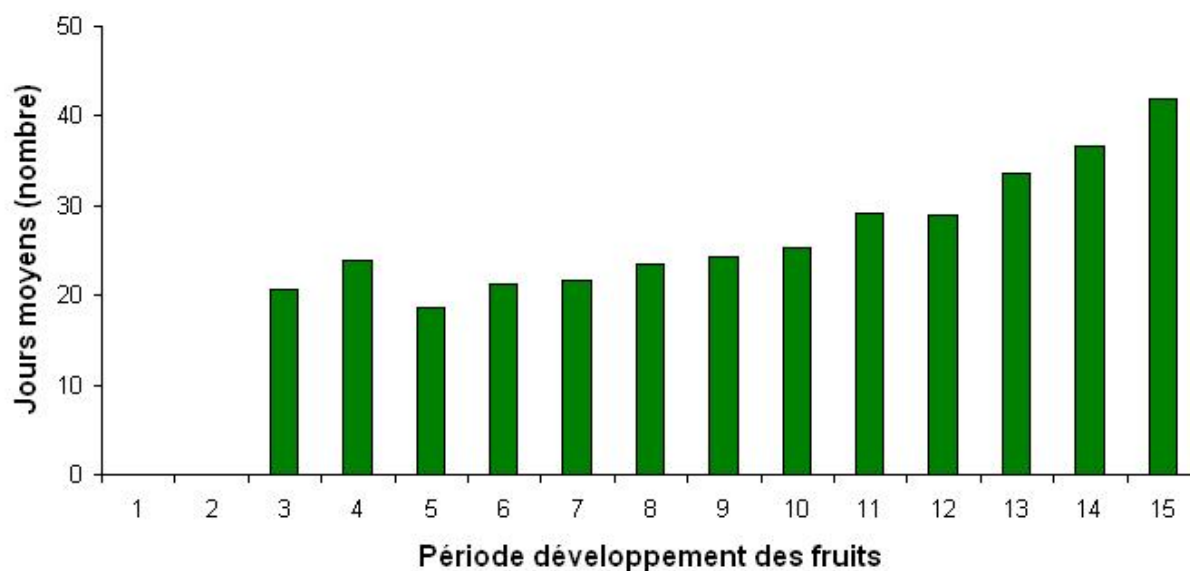


Figure 57. Nombre de jours moyens entre une fleur ouverte et la récolte d'un fruit mûr en 2010.

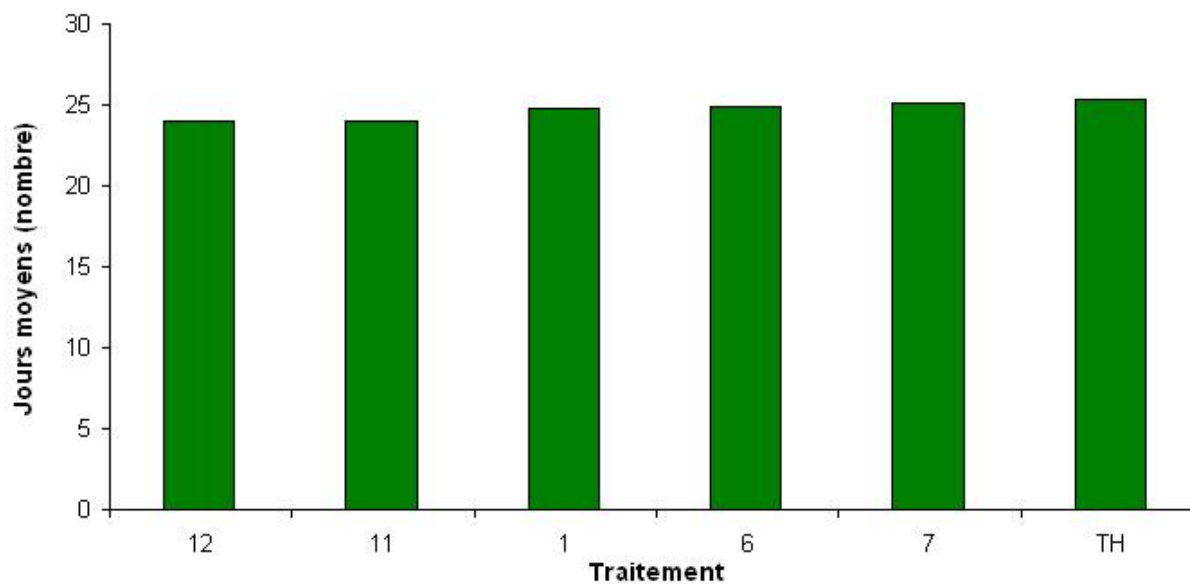


Figure 58. Nombre de jours moyens par traitement entre une fleur nouvellement ouverte et un fruit mûr en 2010.

Les volumes d'eau appliqués dans le cadre de ce projet peuvent être exprimés à l'échelle d'un hectare (l/ha) afin de visualiser plus facilement la demande en eau générée par les différents traitements au cours de la saison 2010. Ainsi, les traitements T1, T6, T7 et T12, ramenés sur une surface d'un hectare, auraient engendré une consommation en eau apportée par l'irrigation d'environ 500 000 litres (T6 : 542 295; T1 : 484 012; T7 : 477 204; T12 : 484 012 litres par hectare). Pour les T11 et TH, utilisant des volumes d'eau plus importants, le nombre de litres qu'ils auraient utilisé serait respectivement de 745 212 et 1 013 235 (Figure 59). Les volumes d'eau peuvent donc être largement différents entre les traitements. Le choix d'une stratégie d'irrigation devra nécessairement se faire en considérant de tels volumes en fonction des réserves d'eau disponibles.

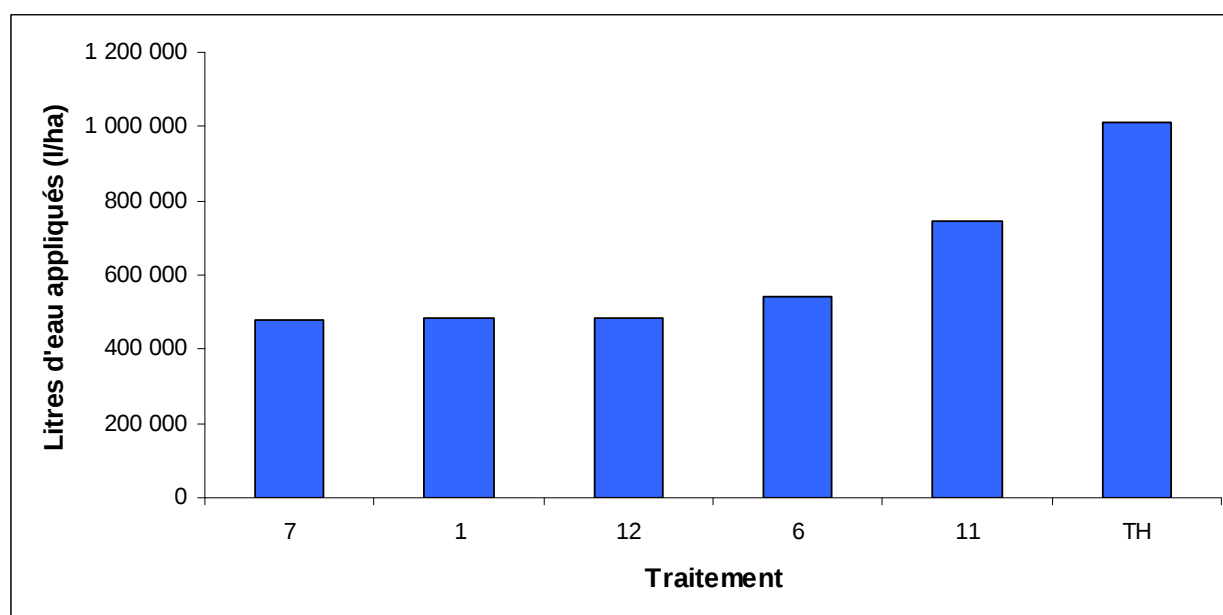


Figure 59. Volumes d'eau appliqués par traitement (litres par hectare) en 2010.

Ces valeurs peuvent être comparées avec une quantité d'eau généralement utilisée en agriculture, la valeur du « un pouce de hauteur d'eau par semaine ». Pour mesurer cette valeur, il suffit de connaître la surface du sol à irriguer. Dans le cas de la culture des fraises à jours neutres concernée dans ce projet, la surface à considérer serait un hectare de sol en culture, excluant les entre rangs (surface totale 1 ha – surface d'entre rang compris dans 1 ha = surface en culture à considérer). Cette valeur serait donc d'environ 975 000 litres pour l'ensemble de la saison 2010, en considérant les précipitations totales (ANNEXE 2. Précipitations mesurées pour les saisons 2009 et 2010). Ainsi, les irrigations auraient été en moyenne de 54 000 l/ha par semaine ou 7 700 l/ha par jour. Avec une densité de plantation de 54 362 fraisiers par hectare, chacun des plants aurait reçu un volume total en eau apporté par l'irrigation de 18 litres pour la saison. Par contre, la présence d'un paillis de plastique vient possiblement biaiser l'impact des précipitations dans le cumulatif de la hauteur d'eau. Afin de préciser ce scénario, il faudrait mettre sur pied un coefficient prenant en charge le véritable volume des précipitations pénétrant dans la butte de sol malgré la présence de paillis de plastique à la surface du sol. Ce volume d'eau se rapproche de celui observé pour le TH, mais ne tient compte en aucun cas du type de sol. Effectivement, les sondes TDR ont démontré que le transport de l'eau à l'intérieur de la butte du sol à l'étude est principalement

confiné au centre de cette dernière. Dans cette estimation, l'utilisation de la surface entière de la butte fait en sorte de surestimer le volume d'eau apporté pouvant être accumulé dans le sol de la butte. Si les précipitations ne sont pas considérées dans les apports d'eau, les quantités d'eau nécessaires s'élèvent à 2 444 000 litres, soit plus de deux fois le volume du TH, traitement ayant appliqué le plus d'eau.

5.1.4.3 Données économiques

Dans ce projet, l'approche retenue initialement pour mener l'analyse économique était celle de la budgétisation partielle (BP). L'objectif était alors de vérifier s'il y a un avantage économique à favoriser une stratégie d'irrigation permettant de maintenir un plus grand volume de sol humide accessible à la plante. Si l'objectif n'a pas changé, la méthodologie a quant à elle été légèrement modifiée, tout en reposant sur les mêmes principes de base. La BP consiste à mesurer la rentabilité d'un changement sur l'entreprise agricole qui n'affecte pas la structure de celle-ci. En tant qu'approche d'analyse marginale, la BP tient compte des changements prévus aux modes de production et qui ne touchent que certaines ressources bien spécifiques, lesquelles peuvent être changées sans modifier les opérations principales de l'entreprise (ex. : changement de type d'élevage, changement de culture nécessitant le remplacement de la majeure partie de la machinerie, etc. (Castle et al., 1987). Dans la BP, l'amélioration de la rentabilité est estimée en calculant les revenus en plus et les coûts en moins. La détérioration de la rentabilité est quant à elle mesurée en compilant les revenus en moins et les coûts en plus.

Cette approche suppose qu'un lien clair peut être fait entre le changement apporté et ses impacts sur les coûts et les revenus. Or, avec les résultats obtenus, il est difficile d'établir ce lien. En effet, parmi les stratégies à l'étude, aucune n'a permis de régler la problématique d'assèchement de façon souhaitée. Conséquemment, cette stratégie d'irrigation, qui aurait été le témoin, n'est que peu différente des résultats obtenus avec les autres stratégies.

Par ailleurs, en faisant varier les rendements, l'irrigation a un impact sur d'autres coûts. Dans le contexte de la production de fraises, les coûts de commercialisation sont particulièrement affectés puisqu'ils sont fonction du volume récolté vendable. Or s'il est difficile de déterminer la part de la variation du rendement attribuable à l'irrigation, cette difficulté s'amplifie si l'on veut déterminer la relation entre le coût d'irrigation et les coûts de commercialisation.

Ces explications étant faites, l'approche adoptée en est toujours une d'analyse marginale. On sait de la théorie de la firme que celle-ci est incitée à produire jusqu'au niveau de production où le coût marginal de la dernière unité produite égale le prix obtenu sur le marché (Debertin, 1986). En d'autres mots, l'entreprise maximise son profit au point où le coût de la dernière unité de production égale le prix. C'est donc plutôt cette approche qui a été adoptée afin de comparer les différentes stratégies entre elles et cette approche est expliquée plus en détail à la section suivante.

Au cours d'une saison de production, un producteur de fraises doit décider quand déclencher l'irrigation et quand arrêter son fonctionnement. Cette décision se prend principalement à court terme. Dans cette perspective, le producteur doit prendre, quasi quotidiennement, la décision d'irriguer ou non. À l'échelle d'une saison de production, le producteur doit décider jusqu'à quel

moment il gardera son système d'irrigation opérationnel ou encore, quand il arrêtera définitivement l'irrigation. Dans les faits, le système d'irrigation est maintenu opérationnel pendant toute la saison de production, car cette pratique est essentielle. Les résultats agronomiques de ce projet permettent de vérifier comment certaines stratégies d'irrigation se comparent aux témoins « plus humide » et « plus sec », et ce, sur différents paramètres agronomiques. Avec l'analyse marginale des revenus et des coûts, l'objectif est de vérifier comment se comparent les différentes stratégies d'irrigation en comparant la zone de profit positif associée à chacune d'elles. La méthode de calcul de cette zone est décrite en détail plus loin dans cette partie. Mais avant, les lignes qui suivent présentent le mode de calcul des coûts et des revenus marginaux.

Dans un contexte idéal où un producteur de fraises aurait toute l'information sur les impacts de l'irrigation quant aux revenus et aux coûts, son objectif à l'échelle de la saison serait de générer un profit tout au long de la saison, c'est-à-dire de maximiser sa zone de profit positif. Cette zone existe tant que le coût d'un épisode d'irrigation supplémentaire est récupéré par le revenu associé à cet épisode. Or, il est difficile, voire même impossible dans le contexte de ce projet, de déterminer le niveau de revenu et de coût attribuable à l'irrigation car il n'y a pas de traitement témoin non irrigué. Cependant, afin de comparer les stratégies entre elles et pour alimenter l'approche utilisée, il serait raisonnable d'émettre l'hypothèse que le producteur doit au moins cesser définitivement l'irrigation lorsque celle-ci engendre des coûts marginaux qui ne sont pas récupérés par le revenu marginal, soit le prix de marché. On sait en effet que dans une perspective de gestion à court terme, le producteur est incité à produire tant que les revenus égalent ou excèdent les coûts variables (Castle et al., 1987). Dans la production de fraises, les coûts variables incluent le coût des intrants, des opérations culturales, de la main d'œuvre, de commercialisation, d'assurance agricole et de financement à court terme (CRAAQ, 2007). Les variations dans la régie d'irrigation peuvent affecter certains coûts de façon directe et indirecte. Directement, les coûts d'irrigation varieront principalement selon l'équipement utilisé de même que le débit et le volume d'eau irrigué. Puisque les différentes régies d'irrigation sont susceptibles de faire varier le rendement, d'autres coûts seront indirectement affectés, dont les coûts de commercialisation en l'occurrence. Ces coûts sont calculés sur la base des volumes récoltés vendables et ils incluent les coûts de cueillette, des contenants, de prérefroidissement et de transport. De ces coûts, ceux associés à la cueillette et les contenants accaparent la plus grande part des coûts variables à court terme (CRAAQ, 2007).

L'analyse économique consiste donc à établir la zone de profit positif lorsque les coûts variables marginaux sont entièrement récupérés par les revenus marginaux. Lorsque les coûts de commercialisation et d'irrigation sont exclus, les coûts variables sont estimés à 1,62 \$/kg de fraises vendues et ils ne changent pas selon les différentes régies d'irrigation mises à l'essai (CRAAQ, 2007). Les coûts d'irrigation et de commercialisation, eux, varient selon ces différentes régies. L'ANNEXE 5. Méthodologie de calcul pour les coûts d'irrigation et de commercialisation) présente la méthodologie de calcul pour les coûts d'irrigation et de commercialisation.

Concernant les prix, l'Association des producteurs de fraises et framboises du Québec (APFFQ) fait une enquête de prix pour les fraises vendues en plateau de 8 ou 12 chopines, et ce, 3 fois par semaine tout au long de la saison de production. Le prix du plateau de 12 chopines a été converti

en prix par kilogramme. L'analyse qui pouvait être faite relativement au revenu marginal (prix) et au coût marginal (coût variable de chaque épisode d'irrigation) devenait très intéressante car les observations de prix et de coût étaient concomitantes.

Il est donc possible de combiner une observation de coût marginal à chaque observation de prix. Autrement dit, pour chaque épisode d'irrigation et de récolte, une observation de prix est disponible pour ce jour précisément, sinon la veille ou le lendemain. Cette richesse des données permet de mettre en parallèle le revenu marginal obtenu pour chaque observation de coût marginal, et ce, pour chaque traitement. Précisons cependant qu'un certain nombre d'épisodes d'irrigation est fait avant que les récoltes débutent. Tous traitements confondus, il y a eu, en moyenne, 42 épisodes d'irrigation et 34 récoltes en 2009 alors qu'en 2010, c'était 36 épisodes d'irrigation et 39 récoltes. Ainsi, les coûts d'irrigation sont divisés par le nombre de récoltes de façon à correspondre au revenu marginal associé à chacune des récoltes. On peut alors déterminer une relation entre le coût marginal et le revenu marginal à chaque récolte.

Lorsque les observations de coût et de revenu marginaux sont illustrées graphiquement, on a remarqué que ces observations suivaient une tendance polynomiale, surtout en 2010. La Figure 60 offre un exemple en utilisant les observations du traitement 11 de l'année 2010.

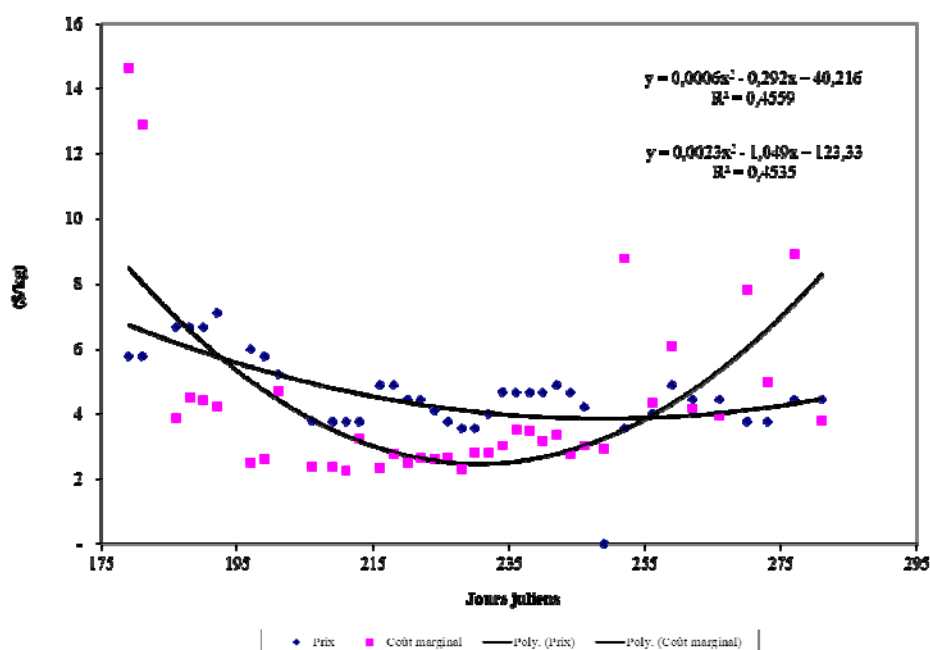


Figure 60. Coûts et revenus marginaux de l'irrigation de la fraise à jours neutres du traitement 11 de l'année 2010.

La forme polynomiale convexe de chaque courbe illustre le fait que le prix, comme le coût marginal, suit une tendance baissière au fur et à mesure que la production progresse dans la saison pour ensuite emprunter une tendance haussière lorsque la production diminue. De plus, il est possible de déterminer la zone de profit positif, c'est-à-dire une zone où la courbe de revenu marginal est au-dessus de la courbe de coût marginal. Par le calcul intégral, on peut déterminer la différence entre les aires sous la courbe des deux courbes. L'objectif devient alors d'obtenir un résultat positif, ce qui illustre le fait que la courbe de revenu marginal est suffisamment distancée de la courbe de coût marginal pour générer un profit tout au long de la saison.

Les courbes de coût et de revenu marginal sont illustrées aux graphiques de l'ANNEXE 6. Courbes de coût marginal et de prix. Pour l'année 2009, on constate qu'il n'y a pas de zone de profit pour plusieurs traitements, soit une zone où la courbe de revenu marginal est au-dessus de la courbe de coût marginal. Même pour les traitements où une telle zone existe, elle est trop mince pour dégager un profit positif tout au long de la saison. Même lorsqu'il existe une zone de profit positif, le calcul intégral permet d'établir que pour ces traitements, l'aire sous la courbe du coût marginal est supérieure à celle sous la courbe de revenu. L'objectif devient donc d'obtenir un résultat positif pour le calcul de la zone de profit.

Le Tableau 7 présente le résultat du calcul de la zone de profit pour tous les traitements des deux années d'expérimentation. On constate d'abord que tous les traitements de 2009 ne permettent pas de dégager une zone positive de profit. Il faut toutefois interpréter ce résultat avec prudence car les coefficients de détermination (R^2) sont plutôt faibles en 2009 relativement aux courbes de coût marginal. Ce fait s'explique par la plus grande dispersion des observations de coût marginal, ce qui rend plus difficile la détermination d'une équation qui illustre bien la tendance des observations. Cette dispersion s'explique probablement par les volumes d'eau irrigués passablement plus élevés en 2009.

Tableau 7. Période optimale d'arrêt définitif de l'irrigation (POADI) pour différents traitements d'irrigation dans la production de la fraise à jours neutres.

Année	Traitements	Zone de profit	R^2 (revenus marginaux)	R^2 (coûts marginaux)
2009	1	-150	0,56	0,06
	2	-234		0,34
	3	-166		0,11
	4	-230		0,11
	5	-317		0,12
	6	-271		0,01
	7	-167		0,06
	8	-289		0,33
	9	-325		0,23
	10	-1 436		0,06
	11	-162		0,17
	12	-237		0,10
2010	11	121	0,46	0,46
	6	482		0,35
	1	-16		0,25
	7	285		0,44
	12	-78		0,30
	TH	15		0,45

Concernant les traitements de 2010, l'analyse possible est plus intéressante. Premièrement, les coefficients de détermination sont plus élevés et nous donnent plus de confiance sur la capacité des courbes polynomiales à bien illustrer la tendance des observations de coût et de revenu marginaux. Par ailleurs, les résultats sur la zone de profit obtenue pour chaque traitement

permettent de faire ressortir les traitements au meilleur potentiel. En ordre décroissant de zone de profit positif, le traitement 6 offre la meilleure performance suivi des traitements 3, 7 et TH. Les traitements 1 et 12 présentent plutôt une zone de profit négatif. Lorsque ces résultats sont mis en parallèle aux coûts d'irrigation (ANNEXE 5. Méthodologie de calcul pour les coûts d'irrigation et de commercialisation), il est intéressant de noter que les traitements 1 et 12 sont à la fois ceux qui affichent les plus faibles coûts d'irrigation et les moins bonnes performances en termes de zone de profit. En contrepartie, les traitements dont les coûts d'irrigation sont plus élevés ne sont pas forcément ceux aux meilleures zones de profit (traitements 11 et TH). Les résultats nous amènent donc à conclure que les traitements aux valeurs médianes de coût d'irrigation offrent les meilleures performances de rentabilité. Cette conclusion est conforme au principe des rendements marginaux décroissants qui veut que le niveau optimal d'utilisation d'un intrant de production ne soit pas forcément le point qui procure la production maximale, mais celui où le revenu marginal est égal au coût marginal. Ce point se situe souvent à un niveau d'utilisation d'un intrant qui est moindre que le niveau maximal de production.

Ces premiers constats tirés, il peut être intéressant de chercher une relation entre les résultats de zone de profit des différents traitements et leurs traits distinctifs au regard des paramètres d'irrigation. À cet effet, les Figure 61 à Figure 63 illustrent la zone de profit des différents traitements en fonction de l'espacement des goutteurs, du volume et du débit d'irrigation respectivement.

Au regard de la relation entre le profit et l'espacement entre les goutteurs, il semble qu'un espacement trop grand joue en défaveur du profit. En effet, le moins bon traitement en termes de rentabilité est aussi celui où l'espacement entre les goutteurs est le plus grand. Cet espacement, de 30 cm, est grandement utilisé dans le milieu et les résultats tendent à démontrer qu'il serait inapproprié dans ce type de sol. Les stratégies où un espacement de 20 cm entre les goutteurs est utilisé présentent aussi un potentiel de rentabilité décevant pour deux des trois traitements, soit les traitements 1 et TH. Le traitement 7, aussi à 20 cm, offre une zone de profit intéressante mais il se distingue du traitement 1 par un débit plus fort et du traitement TH par un volume plus faible.

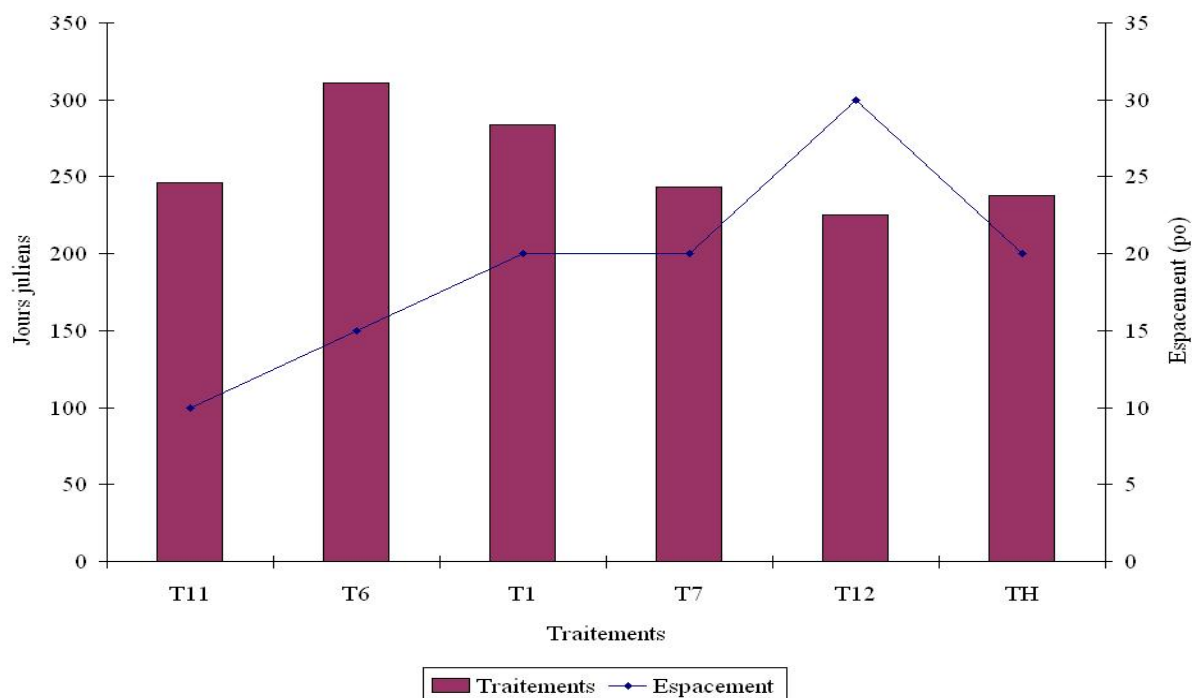


Figure 61. POADI en fonction de l'espacement entre les goutteurs.

Concernant le volume d'eau irrigué, il est difficile de tirer des conclusions mais il semble que les valeurs médianes de volume offrent le meilleur potentiel de rentabilité. En effet, le traitement à la meilleure zone de profit utilise un volume d'eau de 8 litres tandis que les traitements les moins performants utilisent des volumes de 5 ou de 10 litres (parcelle de 7 mètres de longueur).

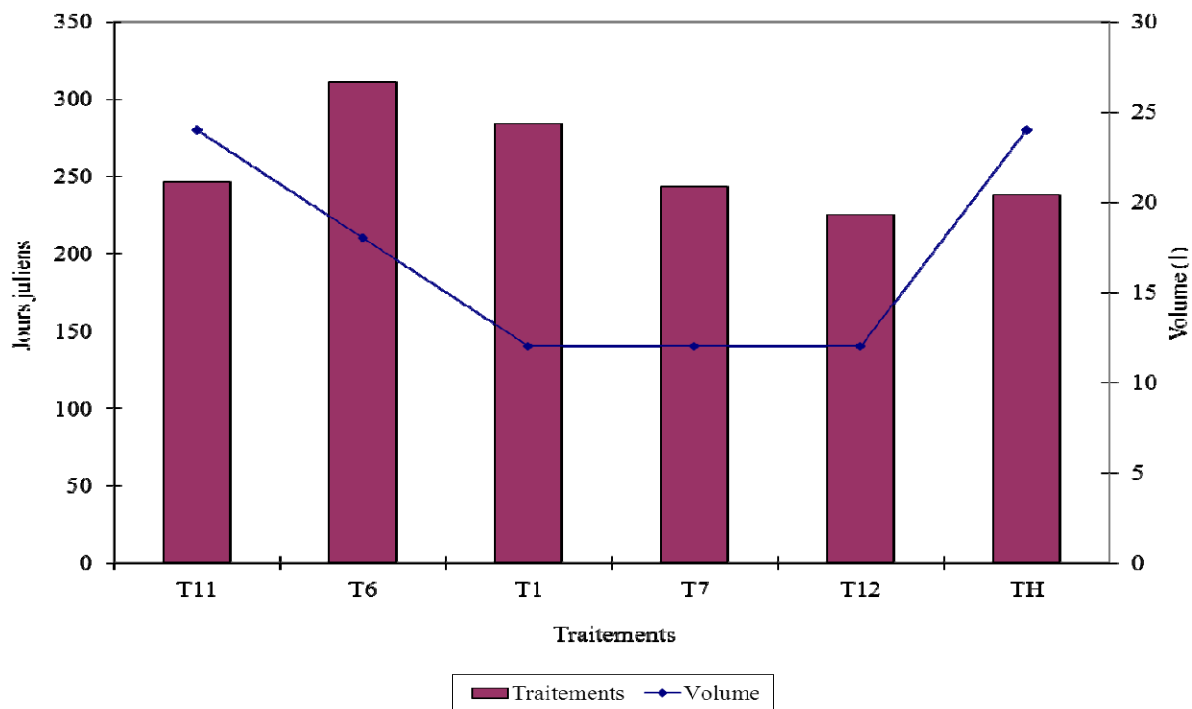


Figure 62. POADI en fonction du volume d'eau irrigué.

Enfin, au sujet du débit d'irrigation, il semble qu'une zone positive de profit ne peut être obtenue que lorsque le débit par parcelle est de 0,6 litre par minute (l/min.) ou plus.

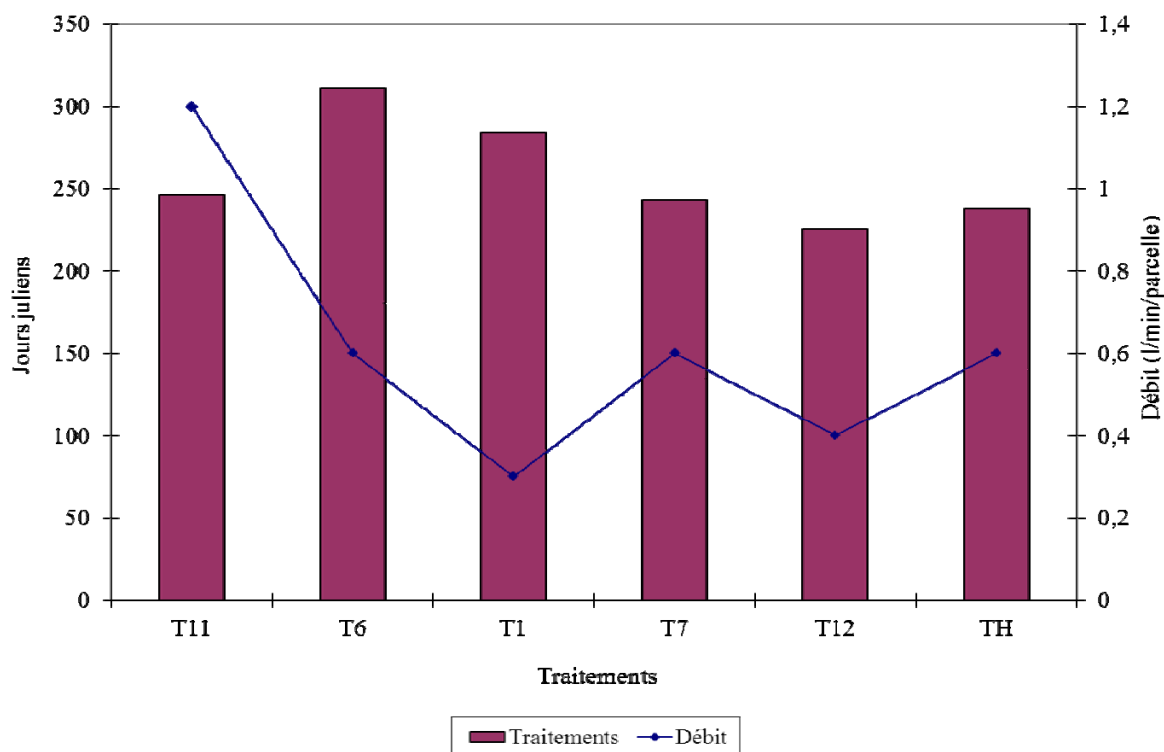


Figure 63. POADI en fonction du débit d'irrigation.

Les essais de différentes régies d'irrigation de la fraise à jours neutres ont permis de développer une nouvelle méthodologie au regard de l'analyse technico-économique. En effet, grâce à la disponibilité des données de prix de la fraise à jours neutres et à leur concomitance avec les épisodes d'irrigation et de récolte, il a été possible de générer une banque de données des revenus et des coûts marginaux pour tous les traitements. Ainsi, pour chaque traitement, une zone de profit a pu être établie en calculant les différences d'aire sous la courbe des courbes de revenus marginaux et de coût marginal à l'aide du calcul intégral.

L'analyse a permis de tirer des constats instructifs, autant pour ce projet que pour d'autres projets à venir sur l'irrigation des fraises à jours neutres. Premièrement, le calcul de la zone de profit propose que les volumes d'eau utilisés en 2009 ne permettent pas la faisabilité technico-économique, et ce, pour aucun des traitements. Au sujet des résultats de 2010, la zone de profit et du coût d'irrigation indique que la rentabilité maximale ne s'atteint pas lorsque le coût d'irrigation est à ses valeurs extrêmes mais plutôt dans des régions médianes, ce qui va dans le sens du principe des rendements marginaux décroissants. Les résultats révèlent aussi que l'espacement des goutteurs à 30 cm ne serait pas à favoriser. La pratique largement répandue de l'espacement à 30 cm serait donc à repenser dans ces conditions, car les meilleurs résultats de rentabilité dans ce projet correspondent plutôt à un espacement à 15 cm.

L'analyse est sensiblement la même pour les paramètres d'irrigation. En effet, autant pour le volume que le débit, les meilleurs résultats quant à la zone de profit sont obtenus pour des valeurs médianes de ces deux paramètres, soit généralement à 8 litres de volume (parcelle de 7 mètres) et 0,6 l/min. de débit.

Cela dit, les résultats de l'analyse technico-économique sont appréciables pour les producteurs de fraises et les intervenants de cette industrie car ils tendent à démontrer qu'il serait rentable de se questionner à propos de certaines pratiques d'irrigation largement répandues. De plus, il serait opportun de valider la méthode développée dans ce projet sur la base des données recueillies en plusieurs contextes de production.

5.1.4.4 Positionnement des tensiomètres en fonction de l'évolution du système racinaire et de l'écoulement hydrique dans le sol.

Afin d'optimiser la gestion de l'irrigation basée sur la tensiométrie, les mesures effectuées par les tensiomètres doivent être représentatives, c'est-à-dire, réalisées dans une zone de sol à la portée du système d'irrigation et du système racinaire des plants. La caractérisation du système racinaire réalisée dans l'ensemble des traitements, ainsi que les variations de la teneur en eau volumique mesurée par les sondes TDR, permettent d'évaluer un positionnement optimal des tensiomètres tout en considérant certains impératifs conséquents aux situations observées.

Lors de la saison 2009, les tensiomètres ont été initialement insérés entre 2 plants à une profondeur de 10 cm (Figure 65). Cet emplacement correspond à la zone 12 de la butte (tranches de sol à la Figure 16). Cette zone est bien colonisée par le système racinaire tel que présenté aux Figure 24 et Figure 25. La zone 8 possède par contre une plus grande densité racinaire que la zone 12, suggérant un prélèvement plus efficace de l'eau et des nutriments dans cette zone plus profonde. La zone 12 est certainement un endroit adéquat pour y installer un tensiomètre en début de saison, car la densité racinaire y sera plus importante que dans la zone 8. Plus la saison avance, plus profondément ce dernier devra être enfoncé pour demeurer dans la zone racinaire des plants, étant la plus active en ce qui a trait à l'absorption de l'eau et des nutriments, soit dans la zone 8 entre 10 et 20 cm de profondeur.

Le tensiomètre doit également être positionné dans une zone accumulant l'eau d'irrigation. Idéalement, cette zone serait la 12 en début de saison pour devenir la 8 vers la fin de saison afin de demeurer dans les zones possédant les plus fortes densités racinaires. Tel qu'observé aux Figure 6 et Figure 7, ces deux zones ne sont pas rejointes par les apports en eau par l'irrigation, pour l'ensemble des traitements. Cette nécessité est alors complexe, car tous les patrons d'humectation des profils de sol sont différents entre les traitements. Une seule zone de sol commune à tous les traitements d'irrigation semble répondre aux apports d'eau et ainsi agir efficacement comme un réservoir (outre le témoin humide de 2010); c'est la zone 3 (Figure 6 et Figure 7). Cette dernière se trouve à une profondeur de 20 à 30 cm entre 2 plants. Cette zone est problématique quant au positionnement du tensiomètre. La densité racinaire n'est pas connue pour l'ensemble de la saison, mais une hypothèse probable est qu'il n'y a pas de racines à cette profondeur au début de la saison. La présence de racines est nécessaire au bon positionnement du tensiomètre afin de déterminer la condition hydrique du sol colonisé par les plants. Par contre, en fin de saison, il y a présence racinaire dans la zone 3. De plus, cette dernière possède les valeurs de longueur et de densité racinaire les plus élevées aux profondeurs de 20 à 30 cm (Figure 24 et Figure 26).

Le fait d'avoir de fortes densités racinaires dans des zones de sol n'ayant apparemment aucun apport d'eau laisse présager une méthode indirecte d'approvisionnement en eau dans ces dernières. Malgré les épisodes chauds et secs de l'été 2009, les valeurs de la teneur en eau volumique des zones de sol hors de l'influence des systèmes d'irrigation ne fluctuaient que très peu. Un apport en eau est donc présent, aussi minime soit-il. Le problème de l'assèchement des buttes de sol, traité précédemment dans ce rapport, peut être expliqué par la conductivité

hydraulique non saturée (K_{ψ}) et une teneur en eau faible. Normalement, la valeur de K_{ψ} est plus importante pour un sable que pour une argile dans un sol contenant une forte teneur en eau. Cependant cette affirmation devient erronée lorsque cette teneur en eau est faible; le sable contient alors moins de micropores remplis d'eau, comparativement à l'argile, faisant diminuer la valeur de K_{ψ} du sable (Allaire, 2004). Si l'eau ne peut se mouvoir dans les micropores, elle ira nécessairement dans les macropores et lessivera en profondeur, n'humectant donc pas latéralement le sol. Le sol à l'étude est composé d'environ 50 % de sable en plus de contenir une forte proportion de particules aux dimensions supérieures à 2 mm de diamètre. La proportion argileuse du sol (15-25 %) permettra un apport d'eau par la capillarité en provenance des zones, principalement en profondeur, accumulant l'eau d'irrigation.

Un tensiomètre situé dans une zone de sol ayant des apports indirects d'eau, n'affichera pas de chutes drastiques des valeurs du potentiel contrairement à un autre qui serait situé dans une zone où une alternance de saturation et de non-saturation est observable. Le positionnement des tensiomètres dans ce sol pourrait donc se situer dans un premier temps à 10 cm de profondeur lors de l'établissement pour être déplacé à 20 cm une fois le système racinaire assez développé. Un positionnement trop profond emmènerait de trop faibles valeurs de potentiel, causées par une teneur en eau volumique située entre 40 et 50 %, sous-estimant les besoins en eau des plants. Un suivi rigoureux des valeurs de la teneur en eau volumique, par les sondes TDR, doit être effectué afin de déterminer si de tels apports indirects d'eau surviennent pour éviter une surestimation des besoins hydriques des plants.

Lors de la saison 2010, les tensiomètres furent insérés dans le sol à une profondeur de 15 cm (zone de mesure), soit un intermédiaire entre les profondeurs de 10 cm en début de saison, et de 20 cm à la mi-saison. Le positionnement des tensiomètres à 15 cm de profondeur c'est avéré adéquat en termes de maintien de l'efficacité de lecture de ces derniers. En effet, au cours de la saison 2009, le déchargement fréquent des tensiomètres (la tension du sol arrive à briser l'équilibre de potentiel entre la matrice du sol et la colonne d'eau à l'intérieur du tensiomètre, ce dernier se vide donc de son contenu et les mesures de tension sont erronées) a nécessité de nombreuses manipulations de ces appareils afin de les rendre de nouveau opérationnels. En 2010, de telles situations ont été beaucoup moins fréquentes. En plus d'une profondeur adéquate, le type de sol a pu influencer favorablement le maintien de la colonne d'eau reliant celle du sol à celle du tensiomètre. En 2010, le sol sous culture possédait une proportion d'argile plus faible comparativement à celui de 2009 (ANNEXE 3. Analyses texturales des parcelles expérimentales). Le sol ayant une proportion argileuse plus importante pourra engendrer une tension plus grande auprès du tensiomètre, lors des périodes d'assèchement, qu'un sol avec une plus faible proportion. Ce dernier minimisera donc les bris de la colonne d'eau. Un suivi constant des tensiomètres au champ est tout de même nécessaire afin d'assurer la qualité des tensions mesurées.

5.2 Diffusion des résultats

Activités prévues	Activités réalisées pour la période couverte par le rapport	Description (thème, titre, endroit, etc.)	Date de réalisation	Nombre de personnes rejointes	Visibilité accordée au CDAQ et à AAC (logo, mention)
Rapport d'étape	Rapport d'étape		Avril 2010	Variable	LOGO et mention
Rapport final	Rapport final		Novembre 2011	Variable	LOGO et mention
Texte de conférence	Texte de conférence	Journées horticoles Saint-Rémi 2009	3 décembre 2009	+/- 125	Mention
Article dans une revue spécialisée		Colloque sur l'irrigation en horticulture 2010 http://www.agrireseau.qc.ca/petitsfruits/documents/Deschenes_resume.pdf	20 octobre 2010	+/- 240	Mention
Feuillelet informatif					
Conférences : • Journées horticoles Saint-Rémi 2009	Conférence : <i>Stratégies d'irrigation dans la fraise à jours neutres</i>	Journées horticoles Saint-Rémi 2009 http://www.agrireseau.qc.ca/petitsfruits/documents/11h10%20Strat%C3%A9gie%20d'irrigation%20(C.%20Boivin).pdf	3 décembre 2009	+/- 125	Mention
• Colloque sur l'irrigation en horticulture 2010	Conférence : <i>Impact du débit et de l'espacement entre les goutteurs sur la gestion de la micro-irrigation en fraisière</i>	Colloque sur l'irrigation en horticulture 2010	25 novembre 2011	+/- 240	Mention

Activités prévues	Activités réalisées pour la période couverte par le rapport	Description (thème, titre, endroit, etc.)	Date de réalisation	Nombre de personnes rejointes	Visibilité accordée au CDAQ et à AAC (logo, mention)
Journée horticole de l'Estrie 2011	Conférence : <i>Impact du débit et de l'espacement entre les goutteurs sur la gestion de la micro-irrigation en fraisière</i>	Journée horticole de l'Estrie 2011	9 mars 2011	55	Mention
Présentation du projet sur le site de l'IRDA	Présentation du projet sur le site de l'IRDA	http://www.irda.qc.ca/projets/liste/287.html	Dès 2009 et pour la durée du projet	Variable	Mention

6 CONCLUSIONS

Ce projet avait pour objectif d'évaluer l'impact économique et environnemental d'une gestion de l'irrigation qui permet de maintenir un plus grand volume d'eau dans le sol colonisé par les racines de la culture. Réalisé en collaboration avec des intervenants de l'IRDA, du MAPAQ de la Direction régionale de la Capitale-Nationale, du RLIO, d'HORTAU et de Dubois Agrinovation, ce projet s'est déroulé à la Ferme François Gosselin située à l'Île-d'Orléans (Québec).

Les 12 stratégies de gestion de l'irrigation, comparées en 2009, différaient entre elles selon l'espacement entre les goutteurs (10,16 à 30,48 cm ou 4 à 12 po.), le volume d'eau appliqué lors d'un épisode, le débit (1,29 à 5,07 lpm/30,48 m) et la durée d'un épisode (20 à 60 min.). En 2010, 5 des 12 traitements à l'étude ont été sélectionnés afin d'être répétés pour la deuxième et dernière saison du projet. Il s'agit des traitements 1, 6, 7, 11 et 12. Le choix de ces traitements a pu être fait en considérant plusieurs critères. Ces derniers étaient la réponse des 14 zones de sol aux épisodes d'irrigation, la densité et la longueur racinaire, le rendement total et vendable et le coefficient d'efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation.

Pour l'ensemble des stratégies, l'écoulement de l'eau était principalement vertical. Ainsi, ni l'augmentation du débit par goutteur, ni l'espacement entre ceux-ci ou le volume d'eau appliqué par épisode ne se sont avérés efficaces pour favoriser un écoulement latéral. La forte proportion de particules d'un diamètre supérieur à 2 mm dans le sol explique possiblement une partie de cette problématique.

Toutefois, la réduction de l'espacement entre les goutteurs a permis d'augmenter l'efficacité d'application de l'eau. En effet, pour un même volume appliqué par épisode et pour la saison (500 000 l/ha), les fraisiers irrigués avec un système où l'espacement entre les goutteurs était de 30,48 cm (12 po.) ont produit 13 % moins de fruits durant le pic de production (6 août au 13 sept. 2010) comparativement à un espacement de 20,32 cm (8 po.).

De plus, l'augmentation du nombre de points d'apport en eau (goutteurs), conséquent à l'ajout d'un second tube de GàG, a permis d'atteindre une plus grande proportion de sol valorisable par le plant. Cette stratégie utilise un volume d'eau 2 fois plus élevé par épisode, sans pour autant diminuer le nombre total d'épisodes (nombre d'épisodes d'irrigation moyen de 36,6 comparativement à 43,3). Toutefois, l'arrangement spatial des racines était plus uniforme et les rendements ont été plus élevés (19,4 %) durant la 2e moitié d'août 2010. Cette différence pourrait être expliquée par une hausse de la production de biomasse par le plant, comparativement aux autres traitements. Cette différence de croissance est justifiable par des apports d'eau d'irrigation en volume supérieurs et répartis de manière optimale dans le sol. Suite

à cette croissance, les besoins hydriques de la culture augmentent, générant une hausse du nombre d'épisodes d'irrigation.

Au terme de la saison 2010 et pour l'ensemble des stratégies, 100 % du volume de sol sous le paillis de plastique était colonisé par les racines (0,96 cm de racine par cm³ de sol comme densité moyenne), mais ces dernières étaient concentrées au centre de la butte. En moyenne, 50 % de la butte était hors de portée des apports en eau (avec un tube). Cette situation confirme l'importance de connaître la portée du système d'irrigation utilisé, si ce n'est que pour le positionnement du tensiomètre. De plus, cela appuie l'objectif de vouloir gérer l'ensemble du sol colonisé par les racines, afin d'uniformiser la densité racinaire et possiblement, pour valoriser davantage les ressources disponibles aux plants et diminuer la fréquence des épisodes d'irrigation et les risques que la plante subisse un stress hydrique.

7 REMERCIEMENTS

La réalisation de ce projet a été rendue possible grâce à la contribution financière du Programme pour l'avancement du secteur canadien de l'agriculture et de l'agroalimentaire (PASCAA). Ce programme d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) est livré par l'intermédiaire du Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ).

8 BIBLIOGRAPHIE

Allaire, S. 2004. *Physique et hydrodynamique des sols*, SLS-12420. Notes de cours, automne 2004, Université Laval.

Allison, L.E. 1965. Organic Carbon. p. 1367-1378. In C.A. Black et coll. (éd.). *Methods of Soil Analysis*. Part 2. Agronomy Monograph no. 9. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.

Banton, O., D. Côté et M. Trudelle. 1991. *Détermination au champ de la conductivité hydraulique saturée à l'aide de l'infiltromètre à charge constante de Côté : théorie et approximations mathématiques*, Can. J. Soil Sci., vol. 71, pp. 119-126.

Barry, Peter J., C.B. Baker, P.N. Ellinger et J.A. 1988. Hopkin. *Financial Management in Agriculture*. Interstate Publisher inc. 666 pages.

Castle, Emery N., M.H. Becker et A.G. Nelson. 1987. *Farm Business Management – The Decision-Making Process*. Macmillan Publishing Company. 413 pages.

Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). *Fraise à jour neutre, Budget – AGDEX 232/821b*. CRAAQ. Avril 2007. 5 pages.

Référence de l'AGDEX 232/821b indexé à l'indice de prix des entrées en agriculture (2007=100)

Conseil des Productions Végétales du Québec (CPVQ). 1988. Méthodes d'analyse des sols, des fumiers et des tissus végétaux. Méthode PH-1. Détermination du pH à l'eau. Agdex 533. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. Québec, QC.

Debertin, D.L. 1986. *Agricultural Production Economics*. Macmillan Publishing Company. 366 p.

Duval, J.R. et E. Simonne. 2003. *Water movement in strawberry beds*. IFAS Extension, HS912, University of Florida.

Gao, S., W.L. Pan et R.T. Koenig. 1998. *Integrated root system age in relation to plant nutrient uptake activity*, Agronomy journal, vol. 90, pp. 505-510.

Gee, G.W. et Bauder, J.W. 1986. Particle-size analysis. p. 383-411. In A. Klute (ed) *Methods of soil analysis*. Part 1. ASA. Monograph No 9. 2nd edition. Madison, WI.

Goulet, M. 2001. *Science du sol*, SLS-12503. Notes de cours, automne 2002, Université Laval.

Kumar, S., M. Imtiyaz, A. Kumar et R. Singh. 2007. *Response of onion (Allium cepa L.) to different levels of irrigation water*. Agricultural water management, vol. 89, pp. 161-166.

Lamhamedi, M.S., M. Renaud et H. Margolis. 2002. *La réflectométrie dans le domaine temporel : une technique d'optimisation de l'irrigation et de réduction du lessivage en pépinière forestière au Québec*. Cahiers agricultures, vol. 11, pp. 275-283.

Mengel, K. et L.C. Von Braunschweig. 1972. *The effect of soil moisture upon the availability of potassium and its influence on the growth of young maize plants (Zea mays L.)*. Soil science, vol. 114, no 2, pp. 142-148.

Miyazaki, T. 2006. *Water flow in soils, second edition*. CRC/Taylor and Francis Group.

Moore, R., W.D. Clark et D.S. Vodopich. 1998. *Botany*, second edition, WCB/McGraw-Hill.

Munoz-Arboleda, F., R.S. Mylavarapu, C.M. Hutchinson et K.M. Portier. 2006. *Root distribution under seepage-irrigated potatoes in Northeast Florida*. Amer. J. of Potato Res., vol. 83, pp. 463-472.

Oliveira, M.R.G., A.M. Calado et C.A.M. Portas. 1996. *Tomato root distribution under drip irrigation*, J. Amer. Soc. Hort. Sci., vol. 121, n° 4, pp. 644-648.

Shahnarazi, A., F. Liu, M.N. Andersen, S.-E. Jacobsen et C.R. Jensen. 2007. *Effects of partial root-zone drying on yield, tuber size and water use efficiency in potato under field conditions*. Field crops research, vol. 100, pp. 117-124.

Topp, G.C., Galganov, Y.T., Ball, B.C. et Carter, M.R. 1993. Soil water desorption curves. p. 569-580. In M.R. Carter (éd.) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.

Trout, T., T. Scaggs et Y. Rothfuss. 2005. *Irrigation practices that improve drip fumigation*, Research conference proceedings. Annual international research conference on methyl bromide, Alternatives and emissions reduction conference.

Wang, F.-X., Y. Kang et S.-P. Liu. 2006. *Effects of drip irrigation frequency on soil wetting pattern and potato growth in North China plain*. Agricultural water management, vol. 79, pp. 248-264.

Yuan, B.-Z., S. Nishiyama et Y. Kang. 2003. *Effects of different irrigation regimes on the growth and yield of drip-irrigated potato*. Agricultural water management, vol. 63, pp. 153-167.

ANNEXE 1. Photos



Figure 64. Les sept sondes TDR insérées dans la demi-butte.

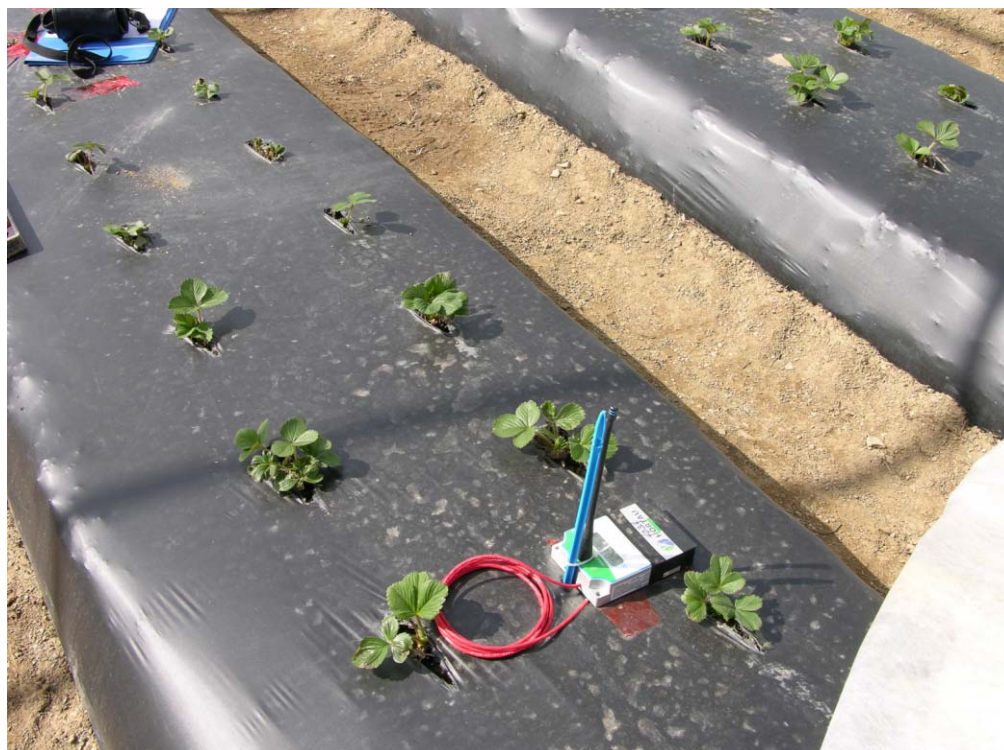


Figure 65. Positionnement initial des tensiomètres pour la saison 2009.

ANNEXE 2. Précipitations mesurées pour les saisons 2009 et 2010

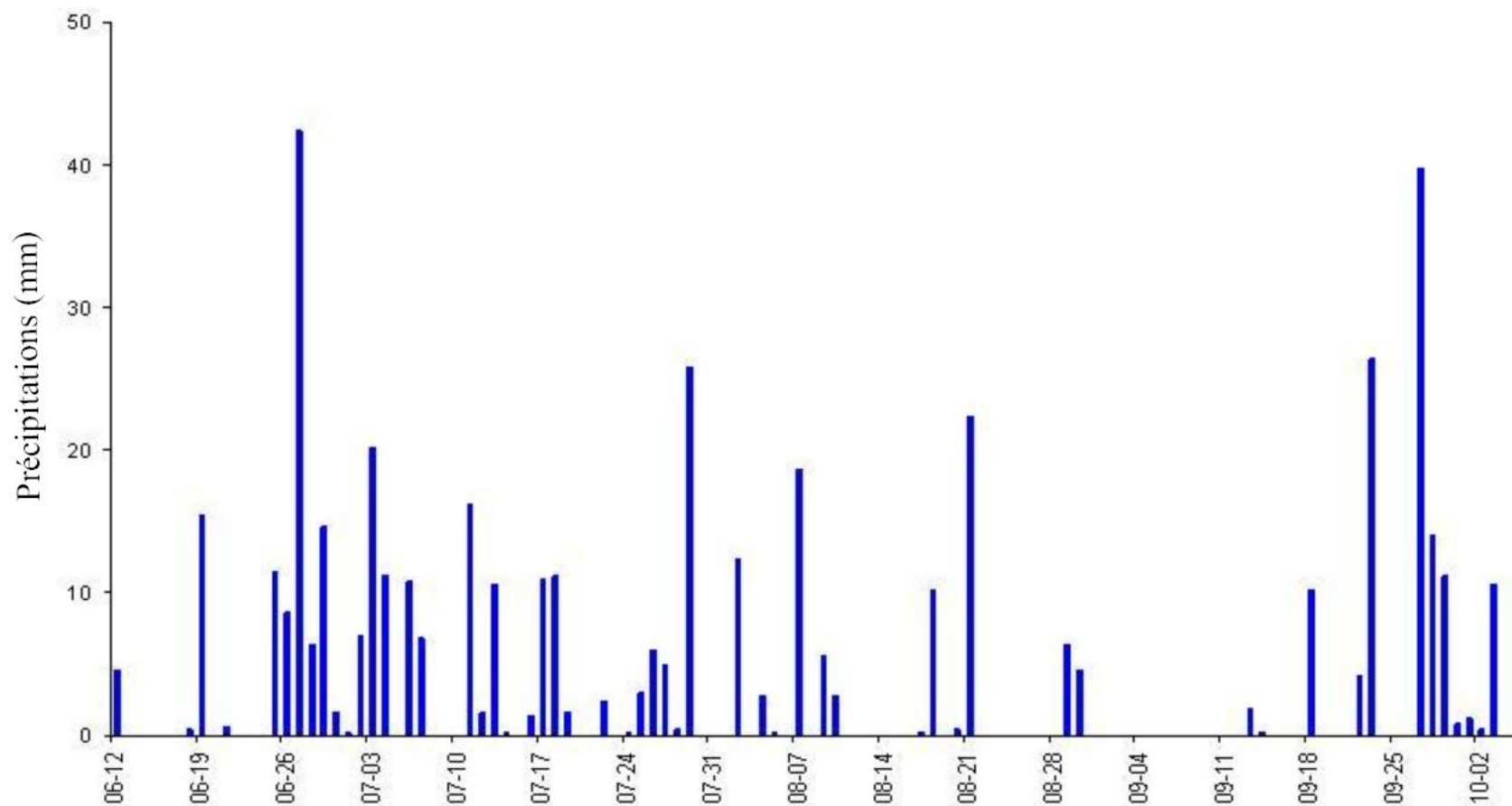


Figure 66. Pluviométrie du 12 juin au 5 octobre 2009 au site expérimental.

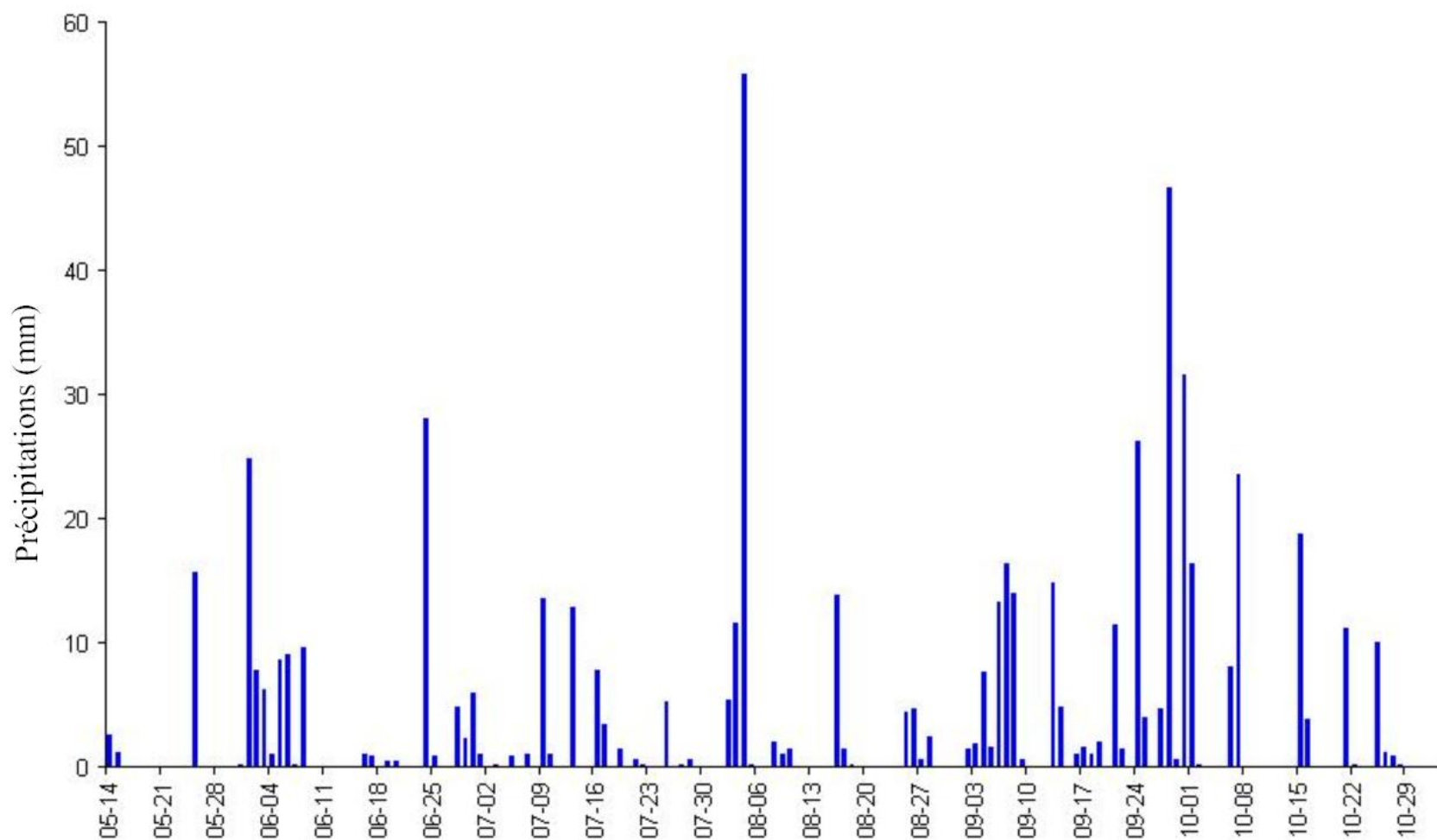


Figure 67. Pluviométrie du 14 mai au 2 novembre 2010 au site expérimental.

ANNEXE 3. Analyses texturales des parcelles expérimentales

2009					
Parcelle	Détritus ¹	Sable	Limon	Argile	Texture
		%			
B1-1	27	52	26	22	Loam sablo-argileux
B1-2	20	51	27	22	Loam sablo-argileux
B1-3	24	51	26	23	Loam sablo-argileux
B1-4	28	62	20	18	Loam sableux
B1-5	21	47	28	25	Loam
B1-6	30	62	22	16	Loam sableux
B1-7	21	55	22	23	Loam sablo-argileux
B1-8	22	51	27	22	Loam sablo-argileux
B1-9	27	53	25	22	Loam sablo-argileux
B1-10	23	54	26	20	Loam sableux
B1-11	24	57	26	17	Loam sableux
B1-12	21	58	23	19	Loam sableux
	24	54	25	21	
B2-1	21	46	33	21	Loam
B2-2	23	46	29	25	Loam
B2-3	24	44	31	25	Loam
B2-4	34	46	29	25	Loam
B2-5	23	49	26	25	Loam sablo-argileux
B2-6	23	51	24	25	Loam sablo-argileux
B2-7	23	50	28	22	Loam
B2-8	33	52	25	23	Loam sablo-argileux
B2-9	24	54	25	21	Loam sablo-argileux
B2-10	23	48	31	21	Loam
B2-11	33	60	21	19	Loam sableux
B2-12	24	51	28	21	Loam
	26	50	28	23	
B3-1	32	52	26	22	Loam sablo-argileux
B3-2	35	52	26	22	Loam sablo-argileux
B3-3	30	54	24	22	Loam sablo-argileux
B3-4	35	54	24	22	Loam sablo-argileux
B3-5	33	50	28	22	Loam
B3-6	29	49	27	24	Loam sablo-argileux
B3-7	34	53	24	23	Loam sablo-argileux
B3-8	31	52	26	22	Loam sablo-argileux
B3-9	29	52	25	23	Loam sablo-argileux
B3-10	31	54	26	20	Loam sableux
B3-11	37	48	30	22	Loam
B3-12	35	57	21	22	Loam sablo-argileux
	33	52	26	22	
	27	52	26	22	

¹ Particules ayant un diamètre supérieur à 2 mm.

2010					
Bloc	Détritus²	Sable	Limon	Argile	Texture
	%				
B1	28	34	38	28	Loam argileux
B2	28	32	38	30	Loam argileux
B3	30	34	36	30	Loam argileux
B4	30	39	33	28	Loam argileux
	29	35	36	29	

² Particules ayant un diamètre supérieur à 2 mm.

ANNEXE 4. Schématisation de la distribution racinaire saison 2010

Schématisme réalisée par l'emploi de GS+ version 9.0
Gamma Design Software, LLC

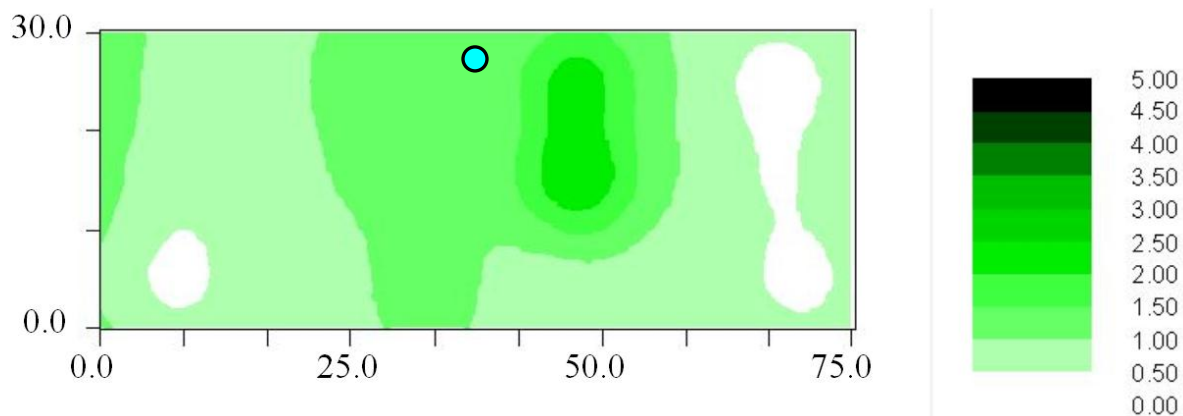


Figure 68. Densité racinaire moyenne T1 (cm racine/cm³ sol).

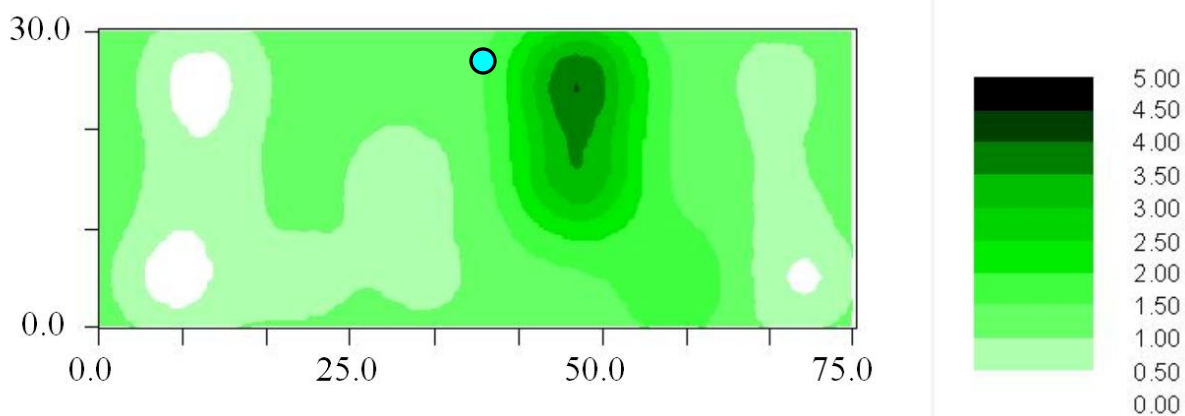


Figure 69. Densité racinaire moyenne T6 (cm racine/cm³ sol).

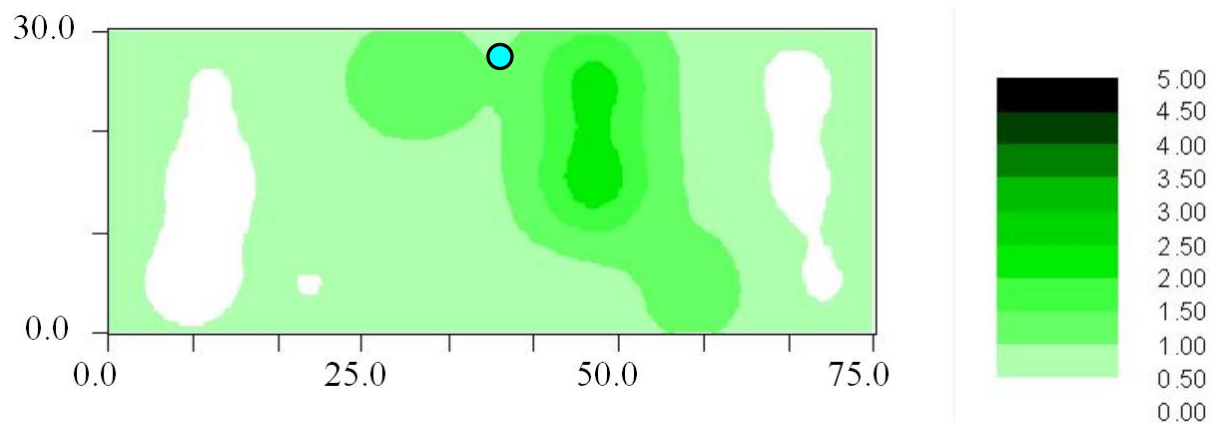


Figure 70. Densité racinaire moyenne T7 (cm racine/cm³ sol).

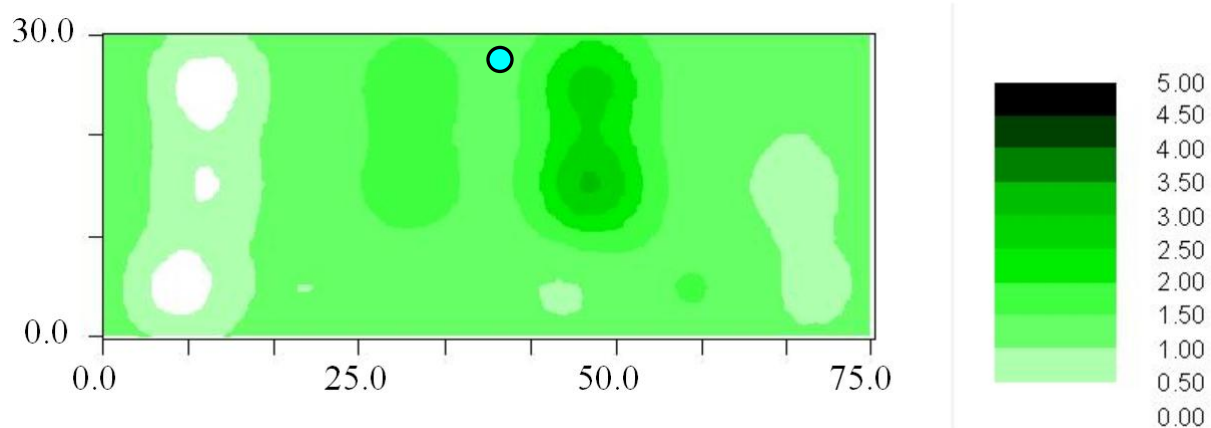


Figure 71. Densité racinaire moyenne T11 (cm racine/cm³ sol).

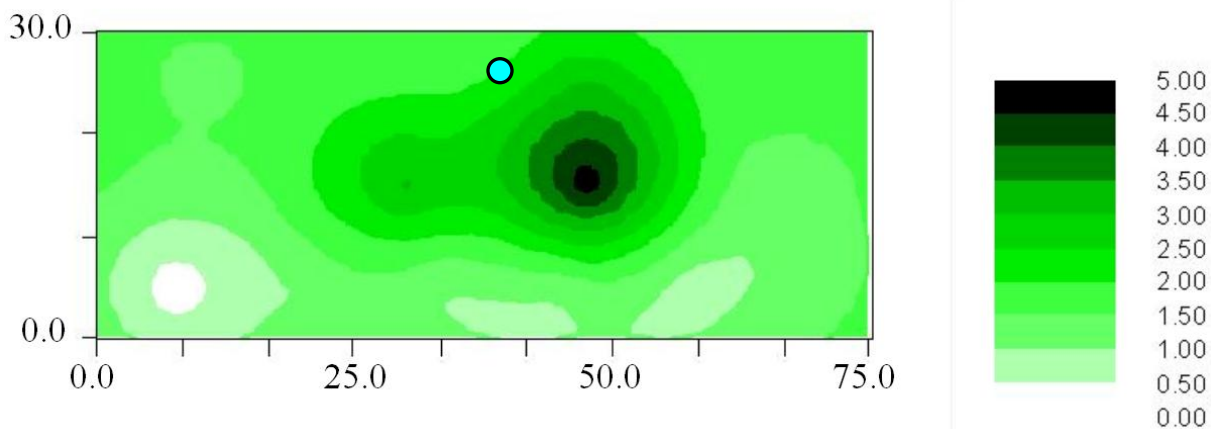


Figure 72. Densité racinaire moyenne T12 (cm racine/cm³ sol).

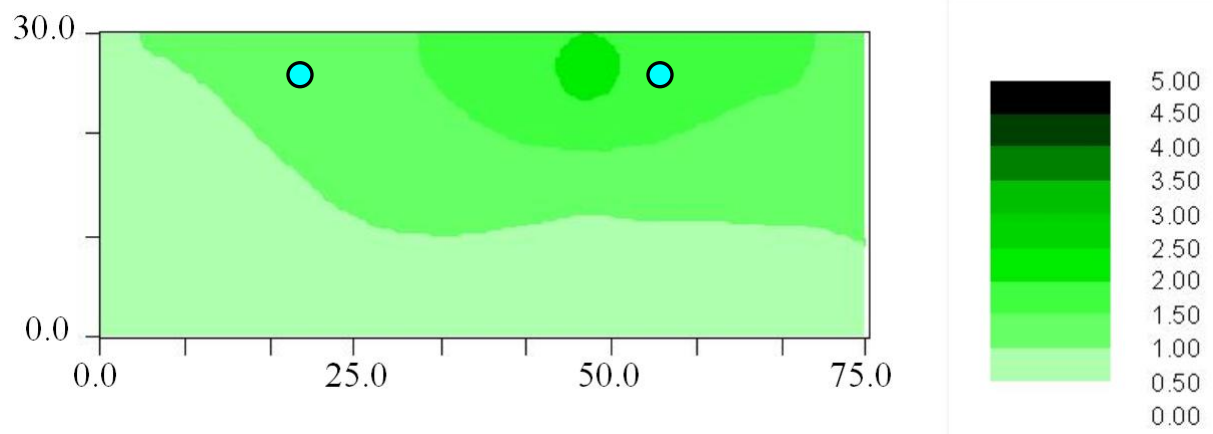


Figure 73. Densité racinaire moyenne TH (cm racine/cm³ sol).

ANNEXE 5. Méthodologie de calcul pour les coûts d'irrigation et de commercialisation

Coûts d'irrigation

Les coûts d'irrigation sont calculés sur la base de la référence d'un système d'irrigation goutte à goutte et sont indexés à l'indice de prix des entrées en agriculture (IPEA, 2007=100)³. Cette référence permet de calculer le coût de tout le système d'irrigation par litre par minute et par goutteur, et ce, pour un système aux goutteurs espacés de 12 pouces. Par la suite, cette donnée de coûts est ajustée selon le nombre de goutteurs et est rapportée en dollars par hectare (ha) par épisode d'irrigation. Pour ce qui est de l'ajustement au nombre de goutteurs, celui-ci est proportionnel à la différence d'espacement des différents traitements. Ce mode de calcul n'est pas idéal car le coût de différents systèmes d'irrigation ne varie pas proportionnellement à la différence des espacements. Toutefois, cela permet de distinguer des traitements dont l'espacement entre les goutteurs diffère. Le calcul tient donc compte à la fois du débit d'eau et de l'espacement entre les goutteurs. Si ce calcul présente des lacunes de précision, l'impact possible de cette relative imprécision sur le coût variable marginal par épisode d'irrigation est minime. En effet, les coûts de cueillette et de contenants sont beaucoup plus considérables.

Coût de cueillette

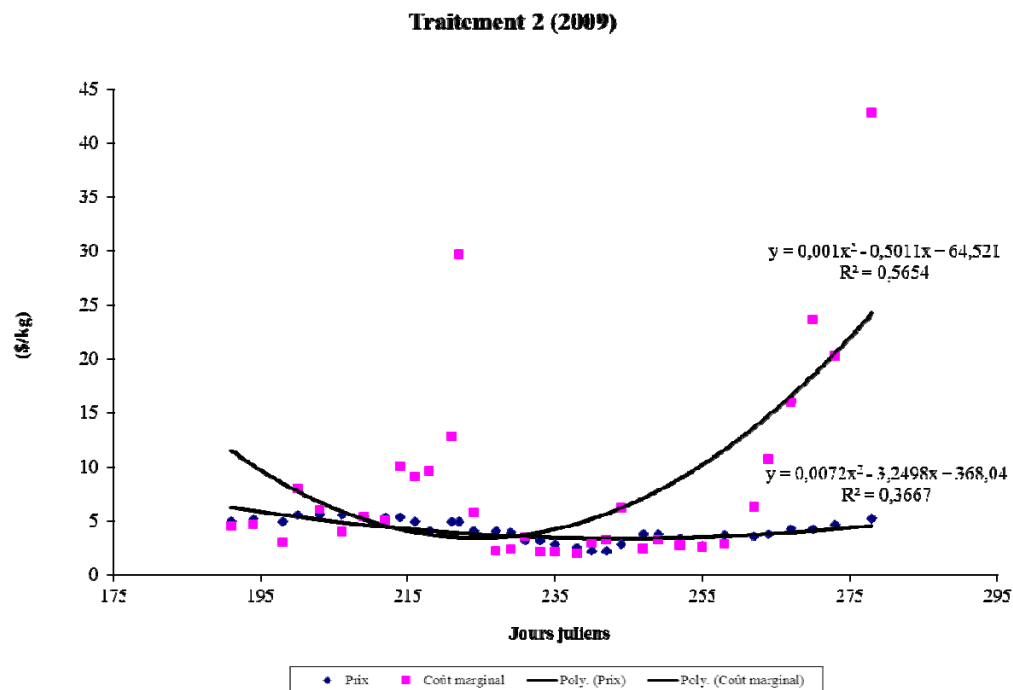
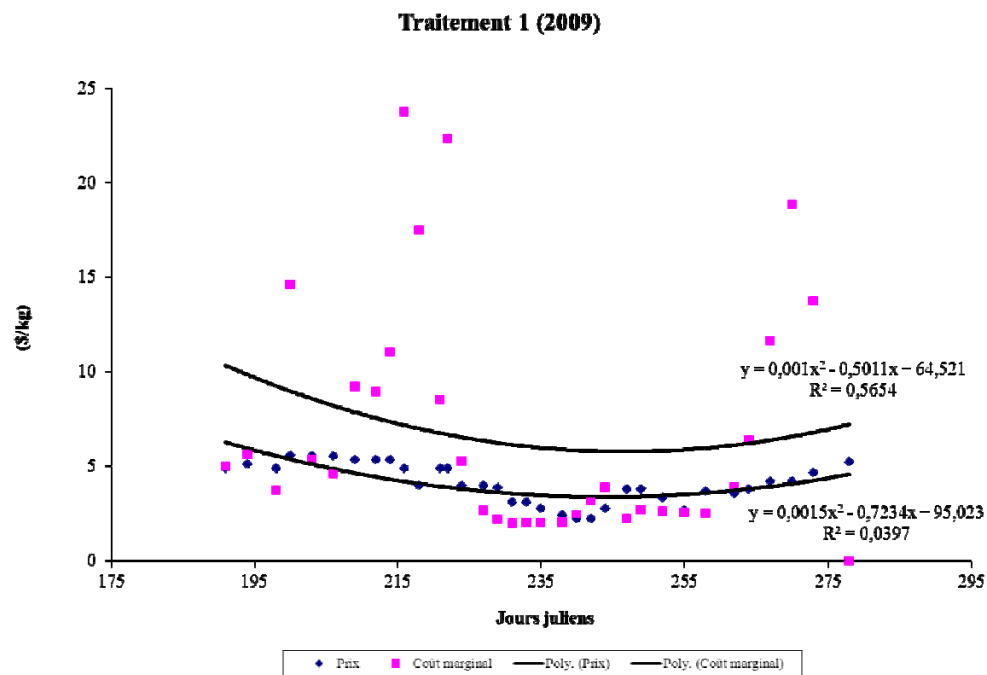
Les coûts de cueillette sont calculés sur la base du coût par kg vendu de la référence utilisée⁸ et indexés à l'IPEA (2007=100). De plus, ceux-ci sont ajustés en fonction du nombre de fruits par kg pour tenir compte du fait que le coût de cueillette est moindre, lorsqu'il y a moins de fruits par kg (fruits plus gros).

Coûts des contenants, du prérefroidissement et du transport

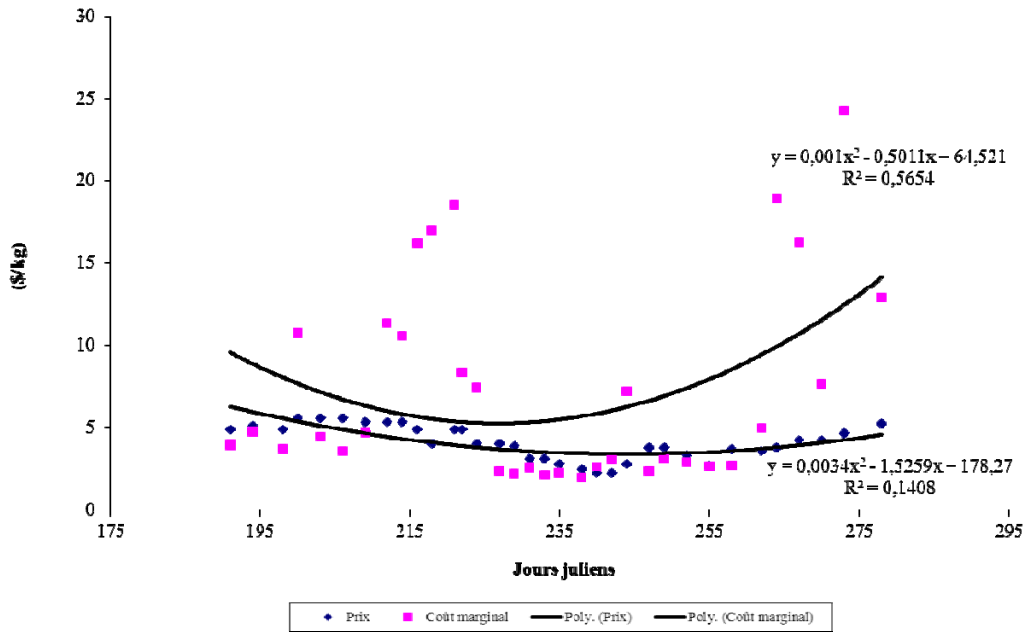
Ces coûts sont calculés sur la base du coût par kg vendu de la référence utilisée⁴ et indexés à l'IPEA (2007=100). Aucun ajustement n'est fait en fonction de la grosseur des fruits.

³ Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). *Irrigation, Coût du matériel et des systèmes* – AGDEX 753. CRAAQ. Février 2007. 7 pages.

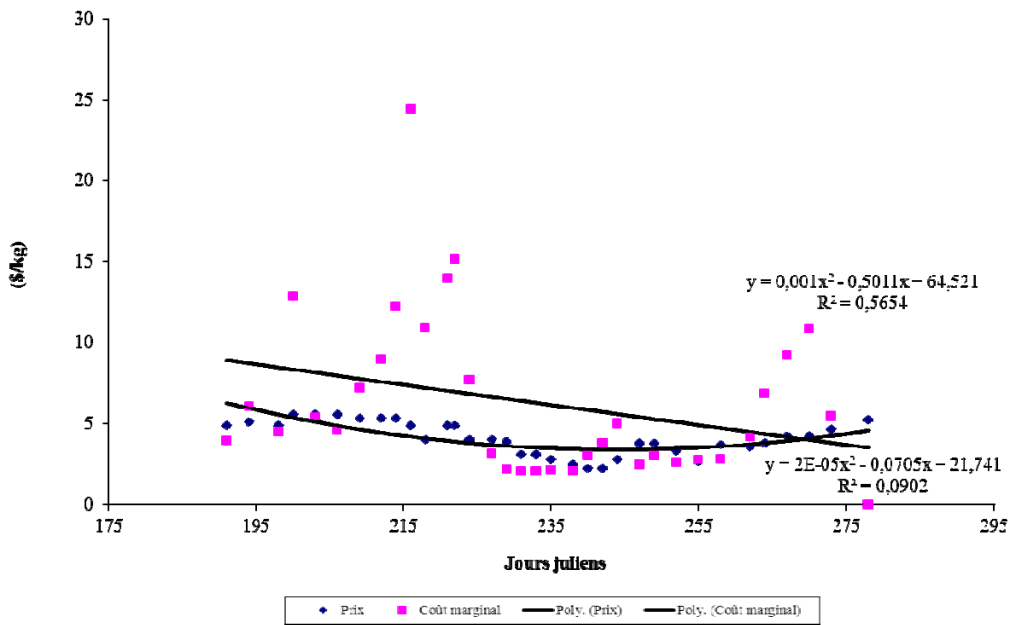
ANNEXE 6. Courbes de coût marginal et de prix



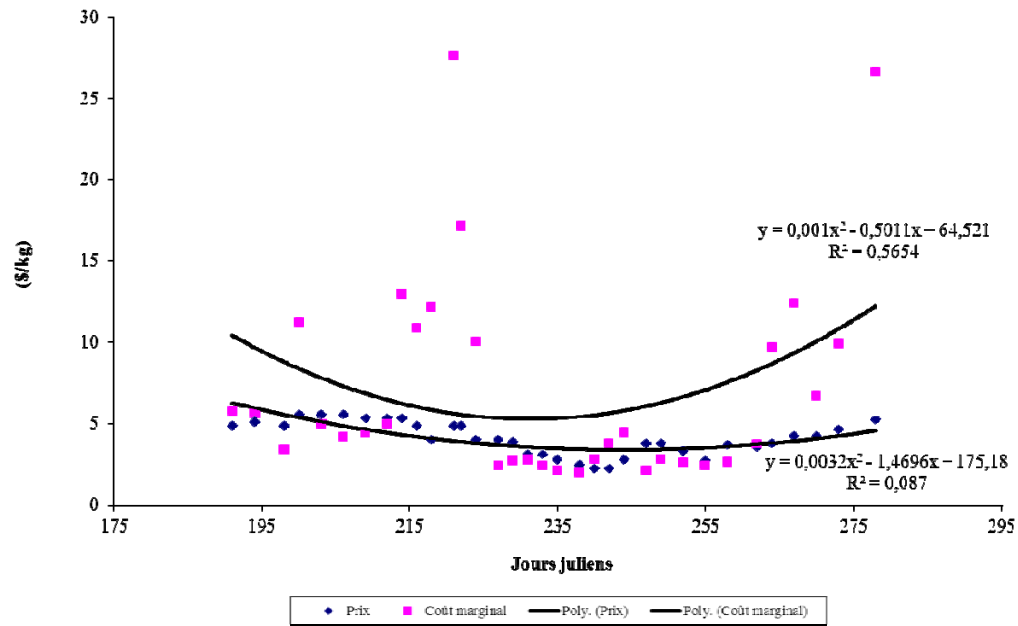
Traitement 3 (2009)



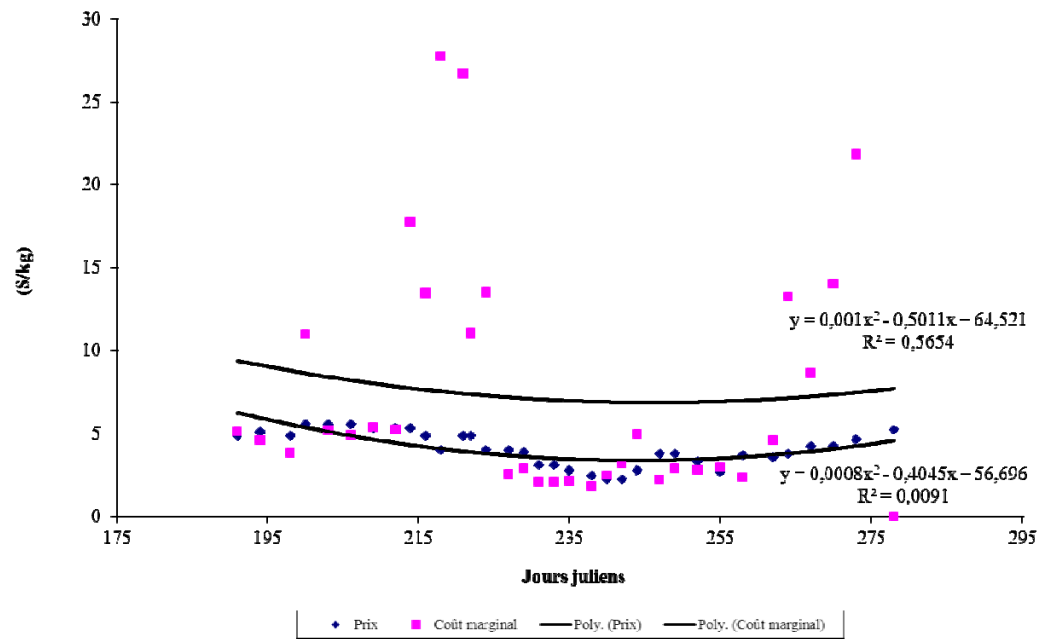
Traitement 4 (2009)



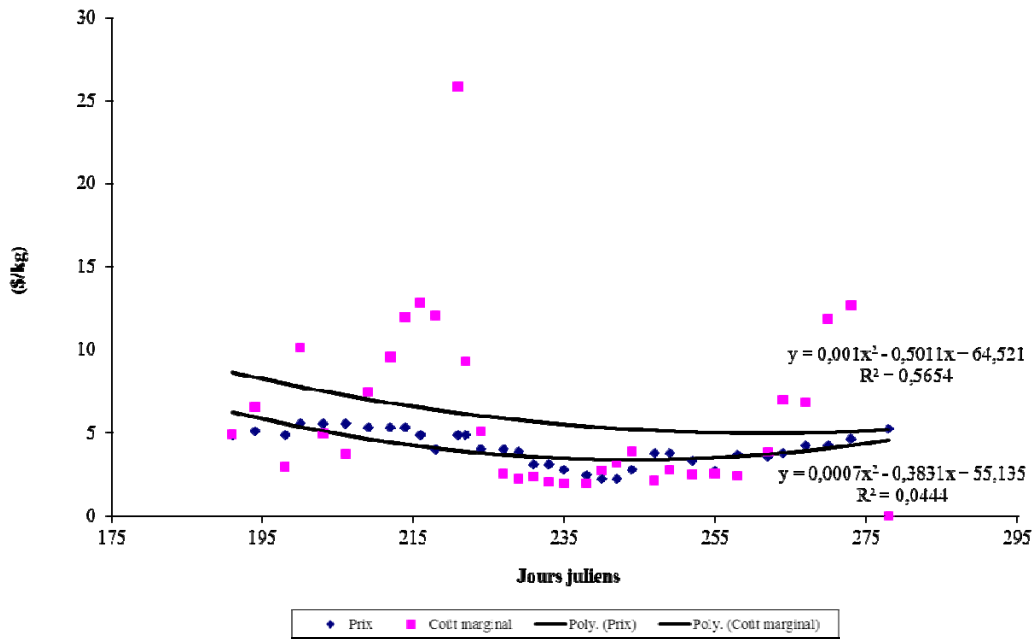
Traitement 5 (2009)



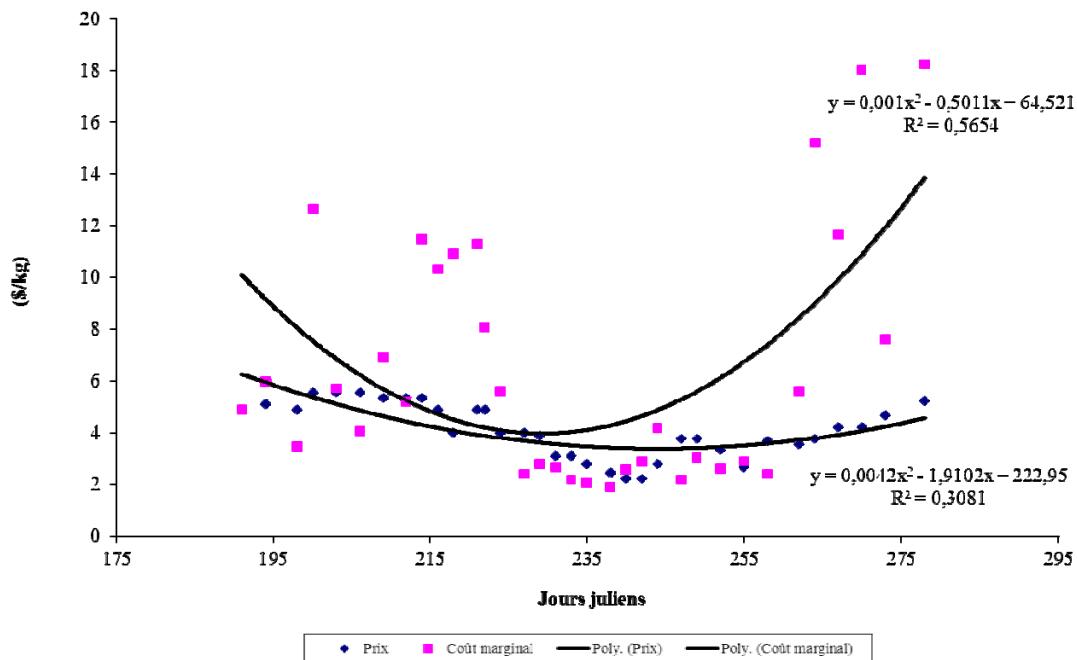
Traitement 6 (2009)



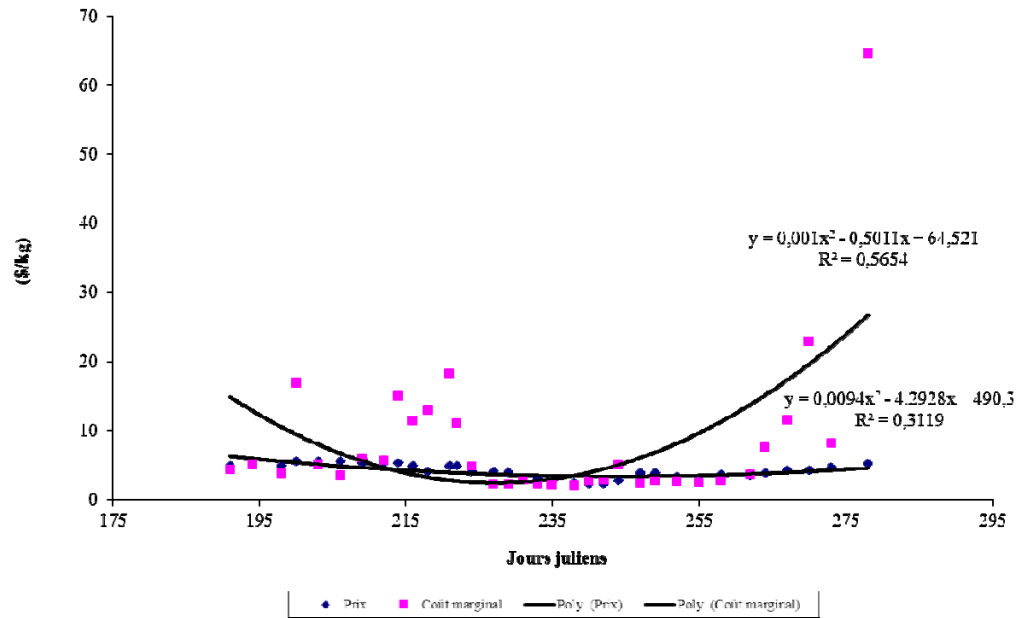
Traitement 7 (2009)



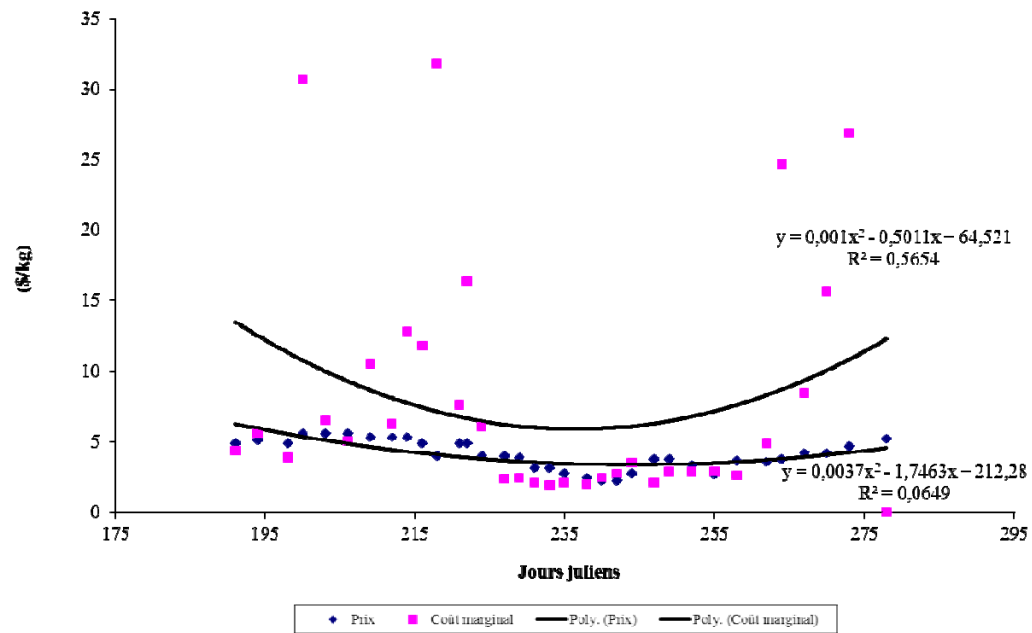
Traitement 8 (2009)



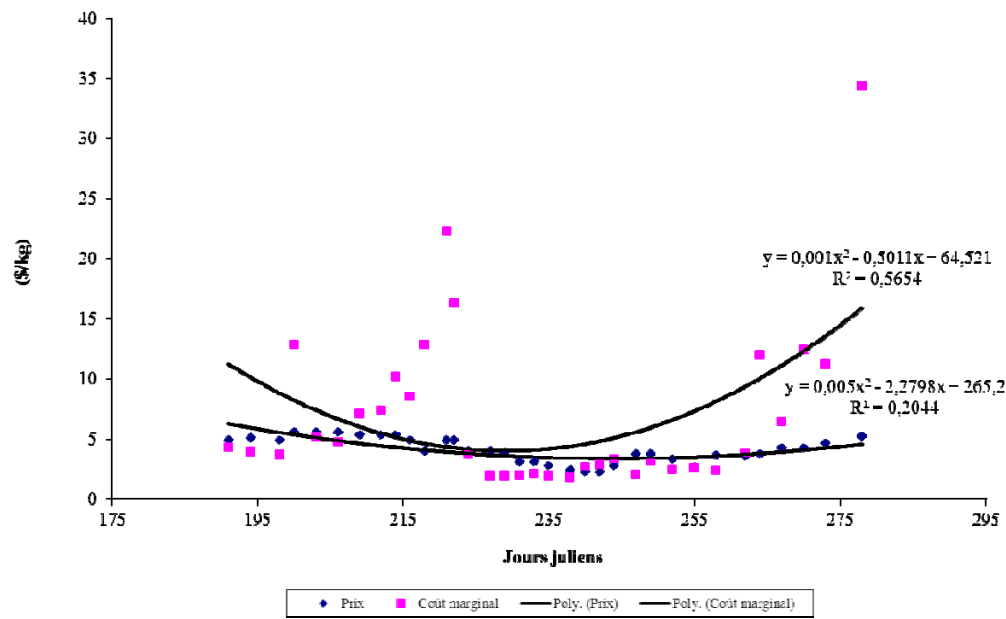
Traitement 9 (2009)



Traitement 10 (2009)



Traitement 11 (2009)



Traitement 12 (2009)

