



# **Pratiques d'irrigation et lessivage en production de fraises en Californie**

**Mémoire**

**Guillaume Sauvageau**

**Maîtrise en génie agroalimentaire - avec mémoire**  
**Maître ès sciences (M. Sc.)**

Québec, Canada



# **Pratiques d'irrigation et lessivage en production de fraises en Californie**

**Mémoire**

**Guillaume Sauvageau**

**Maîtrise en génie agroalimentaire avec mémoire**

**Maître ès sciences (M.Sc)**

**Québec, Canada**

**© Guillaume Sauvageau, 2020**

# **Pratiques d'irrigation et lessivage en production de fraises en Californie**

**Mémoire**

**Guillaume Sauvageau**

Sous la direction de :

Jean Caron, directeur de recherche

Steeve Pepin, codirecteur de recherche

## Résumé

La Californie est la plus grande région productrice de fraise en Amérique du nord et cette production ne serait pas possible sans irrigation. Toutefois, les ressources en eau sont limitées dans cette région et la qualité des eaux souterraines est menacée par le lessivage des nitrates. Dans ce contexte, il est essentiel d'optimiser la gestion de l'irrigation afin d'économiser l'eau et de limiter le lessivage tout en maintenant le même niveau de productivité. Des travaux antérieurs ont démontré que le rendement était maximal avec une gestion humide par tensiométrie avec un seuil de -10 kPa, mais l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) n'est pas maximisée. Des gains d'efficacité pourraient être obtenus en utilisant un seuil plus sec lorsque les besoins en eau de la plante sont plus faibles.

Le premier volet de cet ouvrage consistait à comparer différentes stratégies d'irrigation de déficit à une gestion humide et à une gestion conventionnelle de l'irrigation. Des augmentations significatives de l'EUE ont été obtenues avec l'irrigation de déficit sans diminution de rendement significative comparativement à la gestion humide. Toutefois, ces régies tendaient à diminuer le rendement de 0 à 3 % et comme le prix du produit est élevé, il serait pertinent dans des travaux futurs de vérifier si cette tendance de baisse du rendement se confirme. De plus, la gestion par tensiométrie a diminué le lessivage comparativement à la gestion conventionnelle puisque cette technologie permet un ajustement plus précis du temps d'irrigation afin de limiter la perte d'eau et de nutriments au-delà de la zone racinaire.

Le deuxième volet visait à mesurer l'impact de différentes régies d'irrigation sur la salinité du sol et à vérifier si la conductivité électrique (CE) de la solution du sol était un indicateur fiable pour suivre la concentration de nitrate dans le sol. Différentes régies d'irrigation basées sur le potentiel matriciel du sol ont été comparées à des régies basées sur l'évapotranspiration et à la régie conventionnelle du producteur. Aucune différence significative n'a été observée sur les deux sites, tous les traitements ont subi une hausse de salinité pendant la saison, mais les pluies hivernales ont été suffisantes pour lessiver cette accumulation de sels. La régie d'irrigation de déficit par tensiométrie ne présente donc pas de risque d'augmentation de salinité dans le sol comparativement à une gestion humide. De plus, la CE du sol s'est avérée inefficace pour estimer la concentration en nitrate du sol puisque la contribution de l'ion nitrate est très faible comparativement à d'autres ions naturellement présents dans le sol.

## Abstract

California is the largest strawberry producing region in North America and this production would not be possible without irrigation. However, water resources are limited in this region and the water quality has become an issue in some growing areas due to nitrate leaching. Therefore, it appears essential to optimize the irrigation management to save water and to limit the leaching of nutrients without decreasing fruit productivity. Previous works have shown that maximum yield is obtained under wet irrigation management conditions (*i.e.* irrigation being initiated when a soil matric potential threshold of -10 kPa was exceeded), but the water use efficiency (WUE) is not maximized. WUE could be improved by using drier thresholds when the water need of the plant is lower.

The first chapter aimed to compare different deficit irrigation strategies to wet management and to conventional grower management. Significant increases in WUE were obtained using deficit irrigation compared to wet management (-10 kPa) without any significant impact on fruit yield. However, deficit irrigation tended to decrease fruit yield by 0 to 3 % and given the high value of the strawberry product, it would be relevant to verify whether this trend of yield loss is confirmed. Moreover, using a predetermined soil water potential threshold to manage irrigation more efficiently could reduce the water leaching compared with conventional grower management as this technology allows a finer adjustment of irrigation period and therefore limits the loss of water and nutrients beyond the root zone.

The second chapter aimed to measure the impact of different irrigation strategies on soil salinity and to determine whether the electrical conductivity (EC) of the soil solution was an appropriate indicator to follow the concentration of nitrates in the soil. Different irrigation managements based on soil water potential were compared with irrigation management based on evapotranspiration (ET) and with conventional grower management. No significant difference was observed among treatments on both sites, as all five irrigation strategies resulted in a salinity build-up over the season, but winter rainfalls were sufficient to leach the salt accumulation from the root zone. Thus, tension-based deficit irrigation management does not represent a risk of increasing the soil salinity. Furthermore, the EC of the soil turned out to be inadequate to assess the nitrate concentration in the soil since this ion did not have a great impact on the soil salinity compared with other ions naturally present in the soils investigated.

# Table des matières

Résumé .....	iii
Abstract .....	iv
Table des matières .....	v
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	viii
Liste des abréviations, sigles, acronymes .....	ix
Remerciements.....	x
Avant-propos .....	xi
Introduction.....	1
Chapitre 1 : Revue de littérature .....	3
Climat de la Californie .....	3
Généralités sur la culture de la fraise .....	3
Origine du fraisier .....	3
Physiologie .....	3
Mode de production .....	4
Gestion de l'irrigation.....	5
Système d'irrigation.....	5
Approche par modèle climatique .....	6
Mesure de l'humidité du sol .....	7
Lessivage.....	8
Salinité .....	8
Bilan en eau .....	9
Cycle de l'azote .....	10
Propriétés hydrauliques du sol .....	11
Courbe de rétention en eau .....	11
Conductivité hydraulique.....	12
Équation de continuité de Richards .....	13
Transport de solutés .....	14
Hypothèse et objectifs .....	15
Hypothèses .....	15
Objectifs .....	15
15	
Chapitre 2 : Deficit irrigation strategies applied to strawberry production in California generates good yields and water savings .....	16
Résumé.....	16
Abstract.....	17
Introduction .....	18
Irrigation approaches .....	18
Deficit irrigation .....	19
Adjusting the critical irrigation threshold .....	20
Material and methods.....	21
Plant performance and water stress measurements .....	21
Soil sampling and analysis.....	21
Irrigation management .....	22
Leaching measurements.....	22
Statistical analysis.....	23
Results and discussion.....	23
Water use .....	23
Effects on crop and soil properties.....	24
Leaching.....	25

Conclusion .....	27
Acknowledgements .....	27
Figures and Tables.....	28
Chapitre 3 : Tension-based irrigation management and leaching monitoring using electrical conductivity in strawberry production .....	38
Résumé.....	38
Abstract.....	38
Introduction .....	39
Materials and Methods .....	40
Site Description .....	40
Experimental Design .....	41
Sampling and Chemical Analysis.....	42
Results and Discussion .....	42
Leaching and Salinity .....	42
Relation between EC and Nitrate Concentration .....	43
Conclusion .....	44
Acknowledgements .....	44
Figures and Tables.....	45
Conclusion générale .....	48
Bibliographie .....	51

# Liste des figures

Figure 1.1. Principales étapes du cycle de l'azote (Rioux, 2010). ....	10
Figure 2.1. Lysimeter plate installation (a, b) and tensiometer distribution above the plates (c, d) (Strawberry plant in image c was taken from Chisholm (1911)). ....	29
Figure 2.2. Daily forecasted critical threshold ( $h_c$ ) calculated from forecasted ET (provided by NOAA), real $h_c$ calculated afterward from monitoring ET data (provided by CIMIS) and the targeted irrigation threshold in the Step (-35/10 kPa) and Wet (-10 kPa) treatments..	30
Figure 2.3. Cumulative water use for both seasons (left) and combined water use as a percentage of crop evapotranspiration (right). In 2014, water use was recorded from November 26, 2013 to June 12, 2014 while in 2015, water use was recorded from January 9 to June 11, 2015. Evapotranspiration of the crop ( $ET_c$ ) is shown here as a comparison and was calculated from ET data provided by CIMIS.....	31
Figure 2.4. Crop yields for both years combined (left), and crop yields for both years as a percentage of the Wet treatment yield (right). (Numbers with the same letter do not differ significantly at $P=0.05$ according to the Waller-Duncan t test with $t = 2.75$ and RMSE = 3126.4 kg/ha.).....	32
Figure 2.5. Water use efficiency (WUE) for both years combined (left), and WUE as a percentage of the Wet treatment WUE (right). (Numbers with the same letter do not differ significantly at $P=0.05$ according to the Waller-Duncan t test with $t = 2.08$ and RMSE = 7648 kg/ha.cm.).....	33
Figure 2.6. Water leached from November 26, 2013 to March 7, 2014. ....	34
Figure 2.7. Soil matric potential at a depth of 30 cm near the lysimeter plates during a leaching event following heavy rainfall in late February 2014 (CIMIS, 2015). ....	35
Figure 2.8. Water leached from January 9 to June 7, 2015. ....	36
Figure 2.9. Soil matric potential at a depth of 38 cm, just above the lysimeter plates, in block 3 from February 5 to April 5, 2015, a period of frequent leaching events in the grower-managed treatment.....	37
Figure 3.1. Changes in the electrical conductivity of the soil solution and monthly rainfall of site 1 and 2 over the growing season. Values are means of observations $\pm$ s.e.....	45

## **Liste des tableaux**

Table 2.1. Irrigation treatments applied throughout the growth cycle in two seasons in a randomized complete block design with 5 replicates.....	28
Table 3.1. Pearson's correlation coefficients (r) for two different sites.....	46
Table 3.2. Contribution of each nutrient to the salinity model <sup>1</sup> .....	47

# Liste des abréviations, sigles, acronymes

- a et b : Coefficients empiriques du modèle de Gardner  
CE (EC) : Conductivité électrique (Electrical conductivity)  
CIMIS : California Irrigation Management Information System  
D : Coefficient de diffusivité  
ET : Évapotranspiration (Evapotranspiration)  
 $ET_0$  : Évapotranspiration de référence (Evapotranspiration of reference)  
 $ET_c$  : Évapotranspiration de la culture (Crop evapotranspiration)  
EUE (WUE) : Efficacité d'utilisation de l'eau (Water use efficiency)  
G : Surface foliaire (Crop coverage)  
H : Charge hydraulique  
h ou  $\psi$  : Tension ou potentiel matriciel du sol (Tension or soil matric potential)  
 $h_c$  : Potentiel matriciel critique (Critical soil matric potential)  
IR : Irrigation  
 $K(h)$  : Conductivité hydraulique non saturée (Unsaturated hydraulic conductivity)  
 $K_c$  : Coefficient de culture (Crop coefficient)  
 $K_s$  ou  $K_{sg}$  : Conductivité hydraulique saturée (Saturated hydraulic conductivity)  
L : Coefficient de tortuosité des pores du sol  
m et n : Coefficients empiriques du modèle de van Genuchten  
 $m_0$  : Masse initiale de soluté  
NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration  
P : Précipitation  
Pr ou L : Profondeur d'enracinement  
q : Flux hydraulique  
 $q_0$  : Taux d'évaporation à la surface du sol (Soil surface evaporation)  
r : Coefficient de corrélation de Pearson (Pearson's correlation coefficient)  
R : Ruissellement  
RC : Remontée capillaire  
RFU : Réserve en eau facilement utilisable  
 $S_0$  : Taux de transpiration de la culture (Crop transpiration)  
SD (IT) : Seuil de déclenchement de l'irrigation (Irrigation threshold)  
 $S_e$  : Teneur en eau relative du sol  
t : Temps  
TDR : Time Domain Reflectrometry  
V : Vitesse moyenne de déplacement du front de soluté  
WU : Prélèvement en eau par les racines (Root water uptake)  
z : Profondeur de sol  
 $\alpha$  : Coefficient empirique du modèle de van Genuchten  
 $\theta$  : Teneur en eau volumique (Volumetric water content)  
 $\theta_c$  : Teneur en eau volumique critique du sol  
 $\theta_{cc}$  : Teneur en eau volumique du sol à capacité au champ  
 $\theta_r$  : Teneur en eau volumique résiduelle du sol  
 $\theta_s$  : Teneur en eau volumique du sol à saturation

# Remerciements

Je tiens d'abord à remercier mon directeur de maîtrise, le professeur Jean Caron, pour sa confiance et pour m'avoir permis de participer à cette aventure de recherche au cœur de l'industrie agricole californienne. Je suis privilégié d'avoir bénéficié de son expertise en gestion de l'eau et d'avoir pu évoluer dans un environnement aussi inspirant. Je souhaite également remercier mon co-directeur, le professeur Steeve Pepin, qui a su m'appuyer tant au niveau technique en laboratoire qu'au niveau de la rédaction scientifique. Ses judicieux conseils m'ont permis d'évoluer et ses encouragements de persévérer jusqu'à la fin.

Je veux également remercier tous les étudiants et professionnels qui ont contribué aux projets de recherche en Californie : Laurence Gendron, Lélia Anderson, Guillaume Létourneau, Valérie Bernier et Julien Cormier. J'aimerais souligner la contribution indispensable des professionnels de recherche de l'équipe à l'Université Laval, Carole Boily et Benjamin Parys ainsi que celle de tous les étudiants de premier cycle qui ont été d'une grande aide dans la prise de données et les analyses en laboratoire. Merci également à Claire Depardieu pour ses conseils et sa disponibilité pour répondre à mes questions sur la rédaction et les analyses statistiques.

À ma famille et mes amis, merci pour votre support! Terminer une maîtrise tout en occupant un emploi n'est pas toujours facile, demande des sacrifices et vous avez fait preuve de compréhension tout au long de ce projet.

Finalement, mes remerciements vont aux partenaires qui ont rendu possible la réalisation de ce projet : le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), le Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies (FQRNT), Hortau, Ferme Onésime Pouliot Inc., Canneberges Bieler Inc., Nature Canneberge Inc., Transport Gaston Nadeau Inc. et deux producteurs de fraises anonymes chez qui les expériences ont eu lieu en Californie.

## **Avant-propos**

Ce mémoire de maîtrise est divisé en 3 chapitres. Le premier chapitre est une revue de littérature générale sur la production de fraises en Californie, la gestion de l'irrigation et le lessivage. Ce chapitre montre l'état des connaissances et le contexte dans lequel la problématique a été identifiée et qui a mené à ces travaux de recherche. Le deuxième chapitre a été rédigé sous forme d'article et porte le titre : « Deficit irrigation strategies applied to strawberry production in California generates good yields and water savings » et sera soumis au journal *Scientia Horticulturae* en 2020. Je suis le premier auteur de cet article et Lélia Anderson, Oleg Daugovish, Steeve Pepin et Jean Caron ont contribué en tant que coauteur. Le troisième chapitre a été rédigé sous forme d'article et a été publié en 2017 dans le journal *Acta Horticulturae* sous le titre : « Tension-based irrigation management and leaching monitoring using electrical conductivity in strawberry production ». Je suis le premier auteur de cet article et Steeve Pepin, Claire Depardieu, Laurence Gendron, Lélia Anderson et Jean Caron sont coauteurs. En collaboration avec les coauteurs mentionnés ci-dessus, j'ai participé à chaque étape de ce projet de recherche en commençant par la planification et le montage des expériences, la cueillette et l'analyse des données et finalement la rédaction d'articles scientifiques.

# Introduction

La fraise est cultivée dans plusieurs pays à travers le monde sur tous les types de sol. En 2017, les États-Unis étaient les deuxièmes producteurs mondiaux derrière la Chine (FAO, 2020). La Californie contribue à elle seule pour 91 % de la production du pays (MAPAQ, 2019). En 2018, la culture de la fraise aux États-Unis occupait une superficie de 20 202 hectares et les recettes de l'industrie s'élevaient à 2,67 milliards de dollars américains (USDA, 2020). Au Québec, la production de fraises occupait en 2017 une superficie de 1938 hectares et valait 67,4 millions de dollars canadiens, soit 53 % des recettes annuelles du Canada pour ce petit fruit (ISQ-MAPAQ, 2018).

D'importants volumes d'eau sont consommés chaque année pour satisfaire les besoins de l'agriculture. En Californie, 42 milliards de mètres cubes d'eau sont utilisés chaque année pour irriguer 3,6 millions d'hectares en culture (California Department of Water Resources, 2020), ce qui en moyenne correspond à un apport d'eau annuel de 1166 mm. La Californie a vécu entre 2011 et 2016 une sécheresse historique, les températures ont été plus élevées que la normale et les précipitations plus faibles (PPIC, 2015). Dans ce contexte de sécheresse, la ressource doit plus que jamais être gérée de façon efficace.

Le fraisier possède un système racinaire superficiel et son rendement est sensible au stress hydrique (Kumar et Dey, 2012). De plus, sous le climat de la Californie, cette culture nécessite entre 310 et 396 mm d'eau par saison (Hanson et Bendixen, 2004). Sachant qu'une irrigation trop abondante conduit à des conditions asphyxiantes, l'irrigation doit être gérée avec précision de manière à distribuer l'eau en des courtes, mais fréquentes irrigations.

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour gérer l'irrigation dont les modèles climatiques. En couplant un modèle climatique de prévision de l'évapotranspiration (ET) à un coefficient de culture ( $K_c$ ), les quantités d'eau nécessaires à la culture peuvent être évaluées de façon assez précise; par contre, le moment quand déclencher l'irrigation n'est pas spécifié par la méthode puisqu'elle ne tient pas compte du statut hydrique du sol. Il y a donc un risque de voir des irrigations trop longues ou mal planifiées donner lieu à des événements de lessivage.

L'irrigation peut aussi être gérée à l'aide de sondes placées aux champs telles que le tensiomètre. Le tensiomètre mesure le potentiel matriciel du sol (tension) qui indique le

niveau de disponibilité de l'eau dans le sol. Lorsque le prélèvement d'eau par la plante n'est pas suffisant pour combler la transpiration foliaire, le potentiel hydrique à l'intérieur de la plante peut être plus négatif que la tension dans le sol. Plusieurs travaux antérieurs ont démontré un potentiel de gain de rendement et de réduction de lessivage lorsque la gestion de l'irrigation est basée sur le potentiel matriciel du sol (Bergeron, 2010; Guimerà *et al.*, 1995; Hoppula et Salo, 2007; Létourneau *et al.*, 2015; Torr, 2012). Bien que plusieurs seuils de tension de déclenchement de l'irrigation aient été mis à l'essai afin de déterminer la zone de confort hydrique du fraisier, un seuil de déclenchement se situant à -10 kPa est celui ayant permis de maximiser les rendements.

Une gestion considérée humide, comme celle proposée à -10 kPa, est souvent associée à un risque de lessivage plus élevé (Guimerà *et al.*, 1995; Vázquez *et al.*, 2006). L'eau lessivée transporte des nutriments notamment les nitrates qui sont une source de pollution diffuse pour les eaux de surfaces et souterraines (Gärdenäs *et al.*, 2005; Marinov et Marinov, 2014; Torr, 2012; Vázquez *et al.*, 2006). En Californie, la pollution des eaux souterraines par les nitrates est d'ailleurs considérée comme un problème de santé publique (California State Water Board Resources Control, 2019). Afin d'obtenir une gestion efficace de l'irrigation, deux questions se posent : « Quand déclencher l'irrigation? » et « Quelle est la quantité d'eau à appliquer ? » (Torr, 2012).

Les expériences sur les seuils de déclenchement de l'irrigation à partir de mesures de tension du sol effectuées à une profondeur de 15 cm ont pu répondre à la première question. En ajustant le temps d'irrigation selon la tension mesurée à 30 cm, il est possible de limiter le lessivage, mais la fréquence de mesure n'est pas toujours suffisamment élevée pour arrêter l'irrigation avant que ne débute le lessivage (Létourneau *et al.*, 2015). Pour évaluer la quantité à appliquer, il faut être en mesure de déterminer le bon moment pour arrêter l'irrigation.

L'objectif principal de ce travail est donc de comparer différentes régies d'irrigation afin d'évaluer le potentiel de lessivage de chacune et ainsi obtenir un meilleur contrôle du lessivage basé sur la mesure du potentiel matriciel du sol.

# Chapitre 1 : Revue de littérature

## Climat de la Californie

La production de fraises en Californie est principalement concentrée dans trois régions, soit Oxnard, Watsonville/Salinas et Santa Maria (California Strawberry Commission, 2020). Ces régions au climat méditerranéen sont situées en bordure de l'océan Pacifique et reçoivent très peu de précipitation en été. Les températures moyennes annuelles varient entre 7 °C et 21 °C et des épisodes de gel peuvent survenir en hiver. La normale de précipitation annuelle varie entre 354 et 596 mm pour ces régions et plus de 90 % de ces précipitations sont reçues pendant seulement la moitié de l'année entre les mois de novembre et d'avril (US Climate Data, 2015).

## Généralités sur la culture de la fraise

### *Origine du fraisier*

Le fraisier appartient à la famille *Rosaceae* du genre *Fragaria*. L'espèce la plus cultivée est la *Fragaria x ananassa* qui est apparue autour de 1750 en France suite au croisement accidentel de *Fragaria x virginiana* Duch. et de *Fragaria x chiloensis* Duch. (Hancock, 1999). Cette espèce est aujourd'hui cultivée dans toutes les régions du monde et sur tous les types de sol.

Les États-Unis ont été les premiers producteurs pendant plusieurs années, mais depuis 1992, la production de la Chine a surpassé celle des États-Unis (FAO, 2015). Parmi les variétés les plus cultivées aujourd'hui, plusieurs ont été développées en Californie dont la Seaside qui est la plus répandue, mais aussi Camarosa, Albion, Selva, Chandler, Oso Grande, Pajaro, Honeye et plusieurs autres.

### *Physiologie*

Le fraisier est une plante herbacée vivace. Trois types de fraisier sont cultivés, les cultivars à jours courts, à jours neutres et remontant. Le fraisier remontant est très peu utilisé en production commerciale. Le fraisier à jours courts initie sa floraison lorsque la photopériode est inférieure à 14 heures ou lorsque la température tombe sous 15 °C. Le

fraisier à jour neutre, quant à lui, produit des fleurs sous des températures modérées et ce, peu importe la photopériode (Hancock, 1999).

La plage de température optimale pour la production de fraises se situe entre 15 °C et 30 °C. Certaines variétés mieux adaptées aux régions froides peuvent survivre à des hivers rigoureux atteignant des températures aussi basses que -40 °C comme au Canada (Kaulbars, 2005). En Californie, les plants sont généralement plantés à l'automne et la période de production s'étend de janvier à octobre dépendamment des régions (California Strawberry Commission, 2020). Les plants peuvent donc faire face à des épisodes de gel et la méthode de protection contre le gel la plus utilisée est l'irrigation par aspersion.

Le fraisier possède un système racinaire superficiel : environ 50 à 90 % de la masse racinaire est concentrée dans les 15 premiers centimètres du sol et 10 à 50 % est répartie entre 15 et 30 cm de profondeur (Hancock, 1999). Sous certaines conditions, le fraisier à jours courts peut développer un système racinaire légèrement plus profond que le fraisier à jours neutres (Kaulbars, 2005).

Le pH optimal du sol pour cette plante se situe entre 5,5 et 7,5 afin de maximiser la disponibilité des nutriments. Le fraisier est également affecté par la salinité du sol et de l'eau d'irrigation. Ce sujet est abordé plus en détails à la section « Salinité ».

### ***Mode de production***

La fraise peut être cultivée en serre, en tunnel ou en champ. La production en champ se fait généralement sur des billons surélevés de 15 à 25 cm comportant chacun entre deux et quatre rangées de plants espacés de 30 à 35 cm. Les billons à deux rangées sont espacés de 100 à 130 cm et les billons à quatre rangées, de 150 à 170 cm (Hancock, 1999; Hanson et Bendixen, 2004). La densité de plantation varie de 39 520 à 69 160 plants par hectare selon le cultivar, la région et la largeur du billon (UC IPM, 2014).

Les billons sont souvent recouverts d'un paillis de polyéthylène utilisé pour conserver l'humidité du sol, protéger les fruits et contrôler la température et les mauvaises herbes (Yuan et al., 2004). La couleur du paillis a un effet principalement sur la température du sol et varie en fonction de la région, du climat et de la variété (Hancock, 1999).

## Gestion de l'irrigation

### Système d'irrigation

Comme il pleut très rarement en Californie, il est nécessaire d'irriguer régulièrement pour cultiver la fraise. Les systèmes d'irrigation utilisés sont l'aspersion et l'irrigation localisée, aussi appelée irrigation goutte-à-goutte. Le système le plus commun en production intensive est l'irrigation localisée puisqu'il permet de grandes économies d'eau par rapport au système par aspersion. Les tuyaux sont généralement enterrés à quelques centimètres et situés à mi-chemin entre deux lignes de plants. Toutefois, l'irrigation par aspersion est souvent utilisée pour la protection contre le gel et en début de saison pendant la phase d'implantation, car le système racinaire des jeunes plants de fraises n'est pas assez développé pour puiser l'eau dans le bulbe d'humectation des tuyaux goutte-à-goutte. La fertilisation est généralement appliquée via le système d'irrigation.

L'objectif de l'irrigation est d'acheminer l'eau vers la zone racinaire des plantes et ainsi remplir la réserve en eau facilement utilisable (RFU). La RFU peut être calculée avec l'équation 1.1 (Gallichand, 2012).

$$RFU = Pr(\theta_{cc} - \theta_c)$$

Équation 1.1

Où  $\theta_{cc}$  est la teneur en eau volumique à capacité au champ ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ) qui correspond de façon théorique au potentiel hydrique du sol où le potentiel gravitationnel s'équilibre avec le potentiel matriciel. Dans la littérature, ce potentiel matriciel correspond généralement à -1/3 bar (-33 kPa) (Gallichand, 2012). Par contre, selon Létourneau *et al.* (2015), dans la culture sur billon cette valeur pourrait se situer plutôt entre -2 et -3 kPa.  $\theta_c$  est la teneur en eau volumique critique ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ) qui correspond au potentiel hydrique du sol où la plante entre en stress hydrique et commence à fermer ses stomates pour limiter sa transpiration. Pr est la profondeur d'enracinement réelle de la culture (cm) et RFU correspond à la réserve en eau facilement utilisable (cm) par la plante (Gallichand, 2012).

Une bonne gestion de l'irrigation doit répondre à au moins deux questions, quand irriguer? Et quelle quantité appliquer? Plusieurs méthodes sont utilisées pour gérer l'irrigation de la fraise. La majorité des producteurs irriguent en se basant sur leur expérience, acquise au fil des années. D'autres producteurs se tournent vers des outils aidant à la prise de

décision comme l'approche par modèle climatique ou encore l'utilisation de sondes pour mesurer l'humidité du sol.

### **Approche par modèle climatique**

Les modèles climatiques ont comme objectif d'évaluer le besoin quotidien en eau d'une culture. Ces modèles sont basés sur l'estimation de l'évapotranspiration de référence ( $ET_0$ ) d'un gazon de 15 cm ayant une couverture complète et uniforme dans un champ. Plusieurs modèles ont été développés pour calculer l' $ET_0$ , mais la méthode proposée par la FAO est le modèle de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998). En Californie, un réseau de stations météorologiques a été installé dans toutes les régions afin de fournir les données nécessaires aux calculs d' $ET_0$ . Les données d' $ET_0$  prévisionnelles sont disponibles sur le site internet du *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)* et l'historique des données d' $ET_0$  est disponible sur le site internet du *California Irrigation Management Information System (CIMIS)*. Comme le décrit l'équation 1.2, la valeur d' $ET_0$  (cm) doit ensuite être multipliée par un coefficient de culture adimensionnel ( $K_c$ ) afin d'ajuster l'évapotranspiration aux besoins d'une culture en particulier ( $ET_c$ ) (cm). Le coefficient adimensionnel  $K_c$  calculé en fonction de  $G$ , le pourcentage de couverture foliaire (%) tel que décrit par l'équation 1.3 (Grattan *et al.*, 1998). Un  $K_c$  de 0,7 est généralement rapporté dans la littérature pour un champ de fraise à maturité ayant un pourcentage de couverture foliaire entre 70 et 75 %.

$$ET_c = ET_0 K_c$$

Équation 1.2

$$K_c = -0,000125G^2 + 0,020G - 0,10$$

Équation 1.3

Cette méthode donne un bon guide aux producteurs, mais comporte certaines imprécisions notamment dans le calcul du  $K_c$ . Le  $K_c$  dépend de la culture et de son stade de croissance. Certains cultivars ont un pourcentage de couverture plus élevé que d'autres, ce qui influence grandement le calcul du  $K_c$ . Une étude a rapporté jusqu'à 20 % d'erreur sur l'estimation des quantités d'eau dû à une mauvaise évaluation du coefficient de culture (Vázquez *et al.*, 2006). De plus, elle ne dit rien sur le moment approprié de cet apport en eau, qui pourrait alors se faire à un moment où le sol est trop humide ou trop sec.

## ***Mesure de l'humidité du sol***

Deux paramètres peuvent être mesurés pour déterminer l'humidité du sol, le potentiel matriciel (tension) et la teneur en eau. La tension est mesurée par un tensiomètre et la teneur en eau peut être mesurée par différents capteurs dont la sonde fonctionnant par réflectométrie métallique (Time Domain Reflectrometry (TDR) en anglais).

Les sondes TDR sont composées de deux ou trois électrodes qui sont insérées dans le sol. Une onde électromagnétique est envoyée le long de la sonde et lorsque celle-ci rencontre une discontinuité dans la ligne de transmission, une partie de l'énergie est réfléchie. À partir d'une équation empirique, il est possible de traduire ce signal en une teneur en eau du sol (Ledieu *et al.*, 1986). Ces sondes sont très utilisées en recherche puisqu'elles donnent la quantité d'eau contenue dans le sol. Par contre, pour les utiliser dans un contexte de gestion de l'irrigation, une calibration en fonction du type de sol est nécessaire puisque la teneur en eau est très variable d'un sol à l'autre (Voir la section sur les propriétés hydrauliques du sol).

Le tensiomètre quant à lui mesure le potentiel matriciel du sol c'est-à-dire la force avec laquelle l'eau est retenue dans le sol. Certains sols comme les argiles ou les sols organiques contiennent de grandes quantités d'eau, mais cette eau n'est pas nécessairement disponible. C'est la tension associée à la teneur en eau qui indique si l'eau est disponible pour une culture donnée. Cette mesure est très utile en gestion de l'irrigation puisqu'elle quantifie le niveau de difficulté pour la plante à extraire l'eau du sol et aide donc à anticiper un déficit hydrique potentiel pour la plante. Dans la culture de la fraise, plusieurs études ont démontré que le tensiomètre était un bon outil de gestion d'irrigation et qu'il pourrait permettre d'augmenter les rendements, mais également de réduire le lessivage comparativement à la gestion conventionnelle de l'irrigation basée sur les modèles climatiques et l'expérience du producteur (Bergeron, 2010; Guimerà *et al.*, 1995; Létourneau *et al.*, 2015; Torr, 2012). Une régie sèche avec un seuil de déclenchement de l'irrigation entre -35 kPa et -70 kPa permet des économies d'eau, mais pourrait réduire le rendement par rapport à une gestion humide (Guimerà *et al.*, 1995; Létourneau *et al.*, 2015). Selon Létourneau *et al.* (2015), une régie humide avec un seuil de déclenchement de l'irrigation à -10 kPa maximise le rendement, mais des gains d'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) pourraient être atteints en utilisant un seuil entre -10 et -15 kPa sans affecter le rendement. De plus, il existe une relation dérivée de l'équation

de continuité de Richards entre le potentiel matriciel critique ( $h_c$ ) et l' $\text{ET}_c$  suggérant que le seuil de déclenchement de l'irrigation pourrait être ajusté en fonction de l' $\text{ET}_c$  (Rekika *et al.*, 2014). L'utilisation de cette méthode a permis de réduire la brûlure de la pointe dans la culture de laitue et d'augmenter le rendement et la qualité dans la production de céleri, d'oignon et d'épinard (Périard *et al.*, 2015; Rekika *et al.*, 2014). L'irrigation de déficit utilisant un seuil de déclenchement de l'irrigation ajusté selon les besoins de la culture pourrait être utilisée en production de fraises afin d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau et de réduire le risque de lessivage.

## **Lessivage**

Dans un contexte de production agricole, le sol reçoit une quantité d'eau de façon régulière par irrigation ou par la pluie. Lorsque cette eau percole au travers de la matrice et descend sous la zone racinaire, il y a alors lessivage et l'eau risque de ne jamais être utilisée par la culture. Le lessivage est souhaitable dans certaines circonstances afin d'éviter l'accumulation de sels dans la zone racinaire (Grattan, 2002; Torr, 2012). Toutefois, l'eau peut également transporter des fertilisants, notamment les nitrates qui sont très mobiles. Plusieurs travaux ont rapporté des problèmes de contamination des eaux souterraines par les nitrates dus aux activités agricoles (Gärdenäs *et al.*, 2005; Marinov et Marinov, 2014; Vázquez *et al.*, 2006). En Californie, la contamination des eaux souterraines par les nitrates est devenue un enjeu de santé publique puisque les réserves en eau potable de plusieurs régions agricoles ont des concentrations de nitrates pouvant nuire aux bébés et aux femmes enceintes (California State Water Board Resources Control, 2019).

## **Salinité**

La salinité est un enjeu dans la production de la fraise en Californie et doit être suivie pour être ensuite contrôlée. Les sels peuvent provenir de l'eau d'irrigation, du sous-sol par la remontée capillaire ou encore des fertilisants appliqués. Certains sols contiennent naturellement plus de sels que d'autres (Grattan, 2002). Il est souvent recommandé de volontairement lessiver une fraction de l'eau appliquée de manière à faire migrer les sels accumulés sous la zone racinaire (Grattan, 2002). La salinité de la solution du sol ou de l'eau d'irrigation peut être suivie par deux paramètres, soit la concentration absolue de chacun des ions ou la conductivité électrique (CE). La CE est le paramètre le plus utilisé puisqu'il est facile et rapide à obtenir. La CE de l'eau d'irrigation ne devrait pas dépasser 1

$\text{dS.m}^{-1}$  (AAFRD, 2005; Hanson et Bendixen, 2004), tandis que la CE de la solution du sol ne devrait pas dépasser  $1,4 \text{ dS.m}^{-1}$  afin d'éviter une diminution de rendement (Strand, 1994). Toutefois, la distribution des ions qui compose la salinité doit être considérée puisque les ions n'ont pas tous le même impact sur le fraisier. Certains ions tels que  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  sont plus dommageables pour la production de fraises (Daugovish *et al.*, 2011).

### **Bilan en eau**

Il est possible de faire un bilan d'eau d'une culture au champ en comptabilisant tous les apports et les pertes d'eau du système. La profondeur du volume de contrôle dans lequel le bilan est fait doit être égale ou supérieure à la profondeur d'enracinement de la zone racinaire. L'équation 1.4 correspond à la formule générale décrivant le bilan hydrique dans un volume de sol (Gallichand, 2012).

$$Pr\Delta\theta = (IR + P + RC) - (ET_c + D + R)$$

Équation 1.4

Où  $Pr$  est la profondeur d'enracinement (cm),  $\Delta\theta$ , la variation de teneur en eau du sol ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ),  $IR$ , l'eau ajouté par irrigation (cm),  $P$ , les précipitations (cm),  $RC$ , la remontée capillaire (cm),  $ET_c$ , l'évapotranspiration de la culture (cm),  $D$ , l'eau drainée (cm) et finalement,  $R$ , l'eau ruisselée (cm).

Des travaux antérieurs ont été réalisés dans différentes cultures dans le but de mesurer chaque variable de l'équation. Certaines variables sont plus difficiles à mesurer que d'autres, comme par exemple le ruissellement et le drainage. Lorsque le système d'irrigation est bien conçu et que le débit n'excède pas la capacité d'infiltration du sol, le ruissellement devrait être nul. Dans le cas du drainage, il peut être mesuré en aménageant des cases lysimétriques (Ben Jemia *et al.*, 1997). La case lysimétrique a pour avantage d'isoler un volume de sol du reste du champ et de permettre ainsi la détermination du flux d'eau. Par contre, il est important de souligner que l'installation de ces cases perturbe la structure du sol et la parcelle peut être moins représentative du reste du champ.

La variation de teneur en eau du sol peut, quant à elle, être mesurée par des sondes TDR ou des tensiomètres. Si la mesure est faite par des tensiomètres, il est nécessaire de convertir les données en teneur en eau à l'aide de la courbe de rétention. Ben Jemia *et al.*

(1997) avaient montré que la fiabilité du bilan hydrique augmentait grandement lorsque les données étaient compilées sur une période d'au moins 20 jours ou après des précipitations cumulées d'au moins 115 mm. En couplant les flux hydriques aux concentrations journalières de nitrates il est possible d'estimer le lessivage des nitrates, mais les données du bilan devraient être compilées sur au moins 12 jours pour obtenir une précision acceptable (Ben Jemia et al., 1997).

### Cycle de l'azote

Lorsque du lessivage survient, l'eau peut entraîner des fertilisants notamment l'azote sous la forme de nitrate qui est très mobile. La pollution des eaux souterraines par les nitrates peut devenir un problème de santé publique comme c'est le cas dans certaines régions de la Californie (California State Water Board Resources Control, 2019). L'azote est le fertilisant le plus utilisé en agriculture et peut être apporté au champ sous différentes formes organiques ou minérales. De nombreuses réactions transforment l'azote au champ le rendant plus ou moins disponible pour les plantes. La figure 1.1 présente les principales étapes du cycle de l'azote (Rioux, 2010).

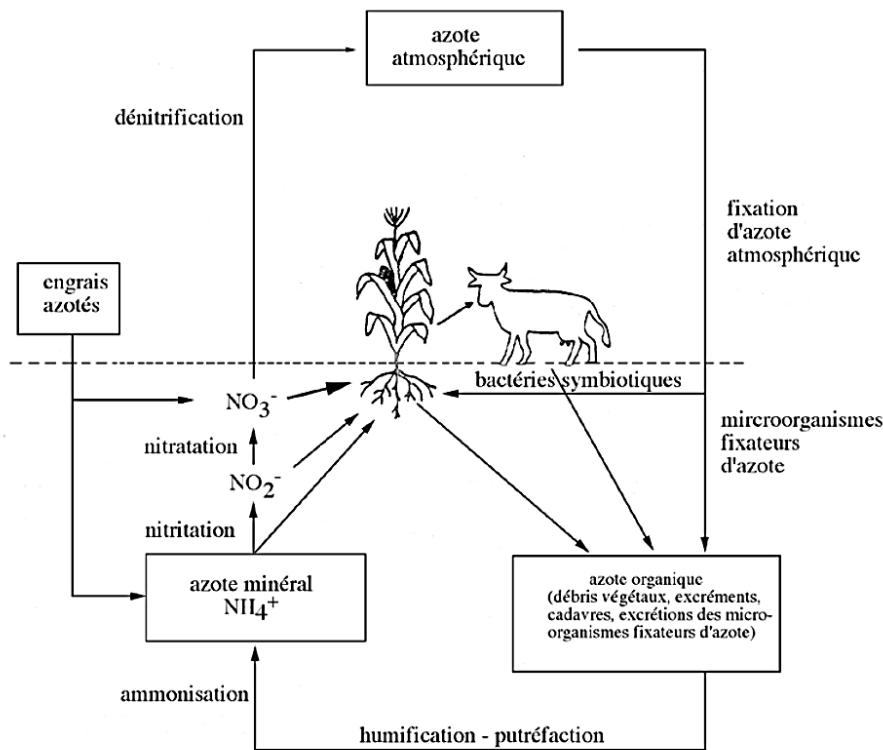


Figure 1.1. Principales étapes du cycle de l'azote (Rioux, 2010).

Bien que certaines plantes puissent assimiler l'azote organique, la majorité d'entre elles préfèrent de loin l'azote sous forme minérale comme les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) et dans une moindre mesure, l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) (Rioux, 2010). Lors de l'échantillonnage de l'eau, du sol ou des plantes, la dénitrification peut causer des pertes importantes de nitrate. Il est donc important de prendre les précautions nécessaires après l'échantillonnage afin de limiter la perte par dénitrification. L'échantillonnage de la solution du sol permet de suivre la concentration en nitrate dans le sol, mais requiert des analyses en laboratoire qui peuvent être longues et coûteuses. La CE est utilisée pour le suivi de la salinité dans le sol, mais aucune étude n'a montré de relation entre la concentration en nitrate et la CE de la solution du sol pour la production de fraises en Californie. Si une telle relation existait et permettait de suivre la concentration de nitrate au champ, le lessivage des nitrates pourrait être mieux contrôlé et serait plus facile à suivre avec une instrumentation simple.

## Propriétés hydrauliques du sol

### **Courbe de rétention en eau**

Il existe une relation entre le potentiel matriciel et la teneur en eau volumique du sol. La forme de la courbe est propre à chaque sol. Plusieurs modèles sont disponibles dans la littérature pour décrire cette relation, dont l'équation de van Genuchten (1980) (Équation 1.5) et l'équation de Gardner (1970) (Équation 1.6).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha^* h|^n)^{-m}}$$

où  $m = 1 - 1/n$

Équation 1.5

Dans l'équation 1.5,  $\theta$  est la teneur en eau volumique du sol ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ),  $\theta_r$  est la teneur en eau volumique résiduelle du sol ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ),  $\theta_s$  est la teneur en eau volumique du sol à saturation ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ),  $h$  est le potentiel hydrique du sol (cm) et  $\alpha$  ( $\text{cm}^{-1}$ ),  $m$  (sans unité) et  $n$  (sans unité) sont des coefficients empiriques du modèle. Le modèle peut être simplifié avec la relation entre les coefficients  $m$  et  $n$ .

$$h = a\theta^{-b}$$

Équation 1.6

Dans l'équation 1.6, a (cm) et b (sans unité) sont des coefficients empiriques du modèle, h est le potentiel hydrique du sol (cm) et  $\theta$  est la teneur en eau volumique du sol ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ). Différentes méthodes peuvent être utilisées afin de générer les données qui serviront à calculer les courbes de rétention en eau, notamment la méthode par cellule Tempe (Dane et Hopmans, 2002a; Soil Moisture, 1995) qui nécessite des installations spécialisées et coûteuses ou encore la marmite à pression (Dane et Hopmans, 2002b) qui est bien adaptée pour obtenir des valeurs de potentiel matriciel très faibles (i.e. fortement négatives). La table à tension est également très utilisée pour établir des courbes de rétention en eau et est relativement simple à opérer (Romano *et al.*, 2002). Finalement, il y a la méthode par évaporation qui nécessite peu d'équipement et donne de bons résultats rapidement (Jiří Šimůnek *et al.*, 1998).

### **Conductivité hydraulique**

La conductivité hydraulique à saturation est un indicateur de la vitesse à laquelle l'eau se déplace dans le sol en conditions saturées en fonction du gradient hydraulique appliqué. Elle est calculée par la loi de Darcy (Équation 1.7) :

$$q = -K_s \frac{\partial H}{\partial x} \quad \text{Équation 1.7}$$

Où q est le flux hydraulique ( $\text{cm.s}^{-1}$ ),  $K_s$  est la conductivité hydraulique saturée ( $\text{cm.s}^{-1}$ ) et  $(\frac{\partial H}{\partial x})$  est le gradient hydraulique qui correspond au quotient de la charge hydraulique ( $\partial H$ ) (cm) par la longueur de sol ( $\partial x$ ) (cm) (Warrick, 2003). Pour que l'équation puisse s'appliquer, il doit y avoir conservation de masse, c'est-à-dire aucun changement de teneur en eau dans le volume de sol à l'étude.  $K_s$  est l'un des premiers paramètres hydrauliques à évaluer puisqu'il est nécessaire pour calculer d'autres propriétés hydrauliques. Une des méthodes en laboratoire utilisées pour estimer ce paramètre est la méthode par charge hydraulique constante (Reynolds *et al.*, 2002).

La conductivité hydraulique en conditions non saturées est fonction du potentiel matriciel du sol et peut être calculée à l'aide de l'équation de van Genuchten (1980) (Équation 1.8) ou de l'équation de Gardner (1958) (Équation 1.9).

$$K(h) = K_s S_e^l (1 - (1 - S_e^{1/m})^m)^2$$

où  $S_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$  et  $m = 1 - 1/n$

Équation 1.8

$$K(h) = K_{SG} e^{\alpha^* h}$$

Équation 1.9

Dans les équation 1.8 et Équation 1.9,  $K_s$  et  $K_{SG}$  représentent la conductivité hydraulique saturée ( $\text{cm.s}^{-1}$ ),  $K(h)$  est la conductivité hydraulique non saturée ( $\text{cm.s}^{-1}$ ),  $m$  et  $n$  sont des paramètres empiriques adimensionnels estimés par le modèle de van Genuchten,  $S_e$  est la teneur en eau relative du sol (sans unité),  $l$  est le coefficient adimensionnel de tortuosité des pores du sol souvent estimé à 0,5,  $\alpha^*$  ( $\text{cm}^{-1}$ ),  $a$  (sans unité) et  $b$  (sans unité) sont des paramètres empiriques estimés par le modèle de Gardner et  $h$  est le potentiel matriciel (cm).

### **Équation de continuité de Richards**

Comme l'équation de Darcy (Équation 1.7), l'équation de Richards (Richards, 1931) est une méthode de calcul des flux d'eau dans le sol. Par contre, l'équation de Richards considère les changements de teneur en eau dans le volume de contrôle et permet de calculer des mouvements d'eau en trois dimensions avec des conductivités hydrauliques différentes dans chaque dimension. L'équation 1.10 est une adaptation de l'équation de Richards pour un contexte d'écoulement sous un émetteur en micro-irrigation (Ajdary *et al.*, 2007). L'équation est présentée en coordonnées polaires, donc en deux dimensions puisque les auteurs, Ajdary *et al.* (2007), posent l'hypothèse que le bulbe d'humectation forme un cercle sous l'émetteur et que l'écoulement dans le sens de l'axe  $x$  est égal à l'écoulement dans le sens de l'axe  $y$ .

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left( K_r \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial t} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - \frac{\partial K}{\partial t} - WU(h, r, z)$$

Équation 1.10

Dans l'équation précédente,  $\theta$  est la teneur en eau volumique du sol ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ),  $h$  est le potentiel hydrique du sol (cm),  $t$  est le temps (s),  $r$  est la composante radiale du système de coordonnées (cm),  $z$  est la composante verticale (cm) et  $K$  est la conductivité hydraulique non saturée ( $\text{cm.s}^{-1}$ ). Le terme  $WU$ , qui signifie le prélèvement en eau par les racines (root water uptake en anglais), a été ajouté au modèle par les auteurs (Ajdary *et al.*, 2007) afin de tenir compte de l'assimilation de l'eau par les racines (cm).

L'équation de Richards est une équation différentielle partielle non linéaire du second ordre qui est souvent difficile à résoudre de façon analytique (Warrick, 2003). Le logiciel HYDRUS a été basé sur les équations de physique du sol, dont l'équation de Richards et s'avère un bon outil pour la résolution numérique de cette équation (Jirí Šimůnek *et al.*, 2008).

### **Transport de solutés**

Les équations de Richards et de Darcy décrivent bien le mouvement de l'eau dans le sol. Toutefois, cette eau peut transporter des solutés présents dans le sol et ceux-ci ne se déplacent pas toujours à la même vitesse que l'eau dû à des phénomènes de diffusion, d'advection et de dispersion hydrodynamique (Warrick, 2003).

Il peut y avoir un décalage, dépendamment du type de soluté présent dans le sol et différentes fonctions de transfert existent pour prédire le mouvement de ces solutés. Le modèle stochastique-advectif de Jury pose l'hypothèse que la dispersion est égale à la diffusion, ce qui est vrai dans une certaine gamme de valeur de flux, tandis que le modèle advectif-dispersif de Fick traite les deux mécanismes ensemble sans pour autant les considérer égaux. L'équation d'advection-dispersion (Équation 1.11) est bien adaptée pour les cas de lessivage au champ à petite échelle ou pour des colonnes de sol en laboratoire en réponse à une entrée de solutés sous forme de pulse (Warrick, 2003).

$$C(z, t) = \frac{m_0 z}{2q\sqrt{\pi Dt^3}} e^{\left(\frac{-(z-Vt)^2}{4Dt}\right)}$$

Équation 1.11

Dans l'équation précédente, C est la concentration du soluté ( $\text{g.cm}^{-3}$ ),  $m_0$  est la masse initiale de soluté appliquée ( $\text{g.cm}^{-2}$ ), z est la profondeur d'échantillonnage (cm), t est le temps (s), q est le flux hydraulique ( $\text{cm.s}^{-1}$ ), D est le coefficient de diffusivité ( $\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$ ) et V est la vitesse moyenne de déplacement du front de soluté ( $\text{cm.s}^{-1}$ ).

## **Hypothèse et objectifs**

Considérant le problème d'approvisionnement en eau, les producteurs de fraises californiens sont forcés de réduire les quantités d'eau utilisées et donc d'augmenter l'efficacité d'utilisation de l'eau afin de maintenir le même niveau de productivité. De plus, le problème de contamination des eaux souterraines par le lessivage des nitrates en milieu agricole pousse les autorités californiennes à trouver des solutions pour limiter le lessivage. L'irrigation gérée par tensiométrie est une méthode de gestion d'irrigation qui pourrait permettre de répondre à ces enjeux. De plus, l'irrigation de déficit gérée par tensiométrie pourrait amener des gains supplémentaires, toutefois à ce jour peu d'information est disponible concernant l'impact d'un déficit hydrique contrôlé sur le rendement, le risque de salinisation et le lessivage. De plus, aucune étude n'a vérifié la relation entre la CE de la solution du sol et la concentration en nitrate du sol. Si une telle relation existait, le suivi des nitrates au champ serait grandement simplifié puisque la CE est un paramètre déjà utilisé en production de fraises pour le suivi de la salinité. Ces enjeux mènent à l'hypothèse et aux objectifs de recherche ci-dessous.

### **Hypothèses**

1. Une gestion humide (-10 kPa) de l'irrigation par tensiométrie réduit le lessivage par rapport à une gestion par modèle climatique prédisant l'évapotranspiration de la culture, sans augmenter le risque de salinisation et sans affecter négativement les rendements dans la culture de la fraise.
2. L'irrigation de déficit gérée par tensiométrie réduit le lessivage par rapport à une gestion humide (-10 kPa), sans augmenter le risque de salinisation et sans affecter négativement les rendements dans la culture de la fraise.

### **Objectifs**

1. Quantifier et comparer l'eau de lessivage associée à différentes régies d'irrigation basées sur la tensiométrie et sur l'évapotranspiration (modèle climatique).
2. Comparer le risque de salinisation que représente l'irrigation de déficit par rapport à une gestion humide (-10 kPa) et par rapport à une gestion basée sur l'évapotranspiration.
3. Vérifier si la mesure de conductivité électrique de la solution du sol est appropriée pour suivre la concentration de nitrate dans le sol.

# **Chapitre 2 : Deficit irrigation strategies applied to strawberry production in California generates good yields and water savings**

## **Résumé**

Dans plusieurs régions du monde, l'eau est une ressource précieuse qui devient de plus en plus rare. Cette rareté affecte évidemment de nombreux producteurs de fraises qui subissent des coupures d'eau et peu d'information est disponible concernant l'impact de ces coupures sur les rendements et sur les performances économiques. Cette étude a été réalisée en Californie sur un loam sableux durant deux saisons de croissance. Différentes stratégies d'irrigation de déficit ont été comparées à l'irrigation basée sur l'évapotranspiration des cultures ( $ET_c$ ) et une évaluation visuelle. Le meilleur rendement pour les deux années a été obtenu avec le traitement humide dont le seuil de déclenchement de l'irrigation était à -10 kPa. Le traitement sec dont le seuil de déclenchement de l'irrigation était à -35 kPa a permis une réduction de l'utilisation de l'eau de 25 %, mais il a aussi diminué non significativement le rendement des deux saisons de 3 %. Les traitements Step (-35/-10 kPa) et Variable ont utilisé un seuil de déclenchement de l'irrigation variable pendant la saison et ils ont donné respectivement une légère augmentation non significative de rendement (1 %) et une diminution également non significative de rendement (3 %), mais ils ont réduit l'utilisation de l'eau de 16 % et 14 % respectivement par rapport au traitement humide. De plus, ces deux traitements ont augmenté significativement l'efficacité d'utilisation de l'eau de 12 % et 16 % respectivement par rapport au traitement humide. L'irrigation de déficit (Dry (-35 kPa), Step (-35/-10 kPa) et Variable) n'a pas réduit le lessivage par rapport à la gestion humide (-10 kPa). Toutefois, l'accès aux données de tension en temps réel permet un ajustement plus fin du temps d'irrigation en maintenant la tension entre le seuil ciblé et la capacité au champ. Cette technologie peut donc contribuer à réduire le risque de lessivage de l'eau et des nutriments au-delà de la zone racinaire comparativement à la gestion basée sur l'évapotranspiration et une évaluation visuelle de la culture. Les fraisiers semblent très sensibles à tout stress hydrique et, compte tenu de la valeur élevée de la culture, des recherches supplémentaires devraient porter une attention particulière aux économies générées par un stress hydrique mineur sur la productivité de cette culture.

## **Abstract**

Water is a precious resource that is becoming increasingly scarce worldwide as the population grows and water resources are depleted in some locations. This scarcity obviously affects strawberry production, as water use restrictions are being imposed on many strawberry growers in an effort to save water. However, little information is available about the impact of reduce watering on crop yield and economic performance. A two-year study was thus conducted in California on a strawberry crop on a sandy loam to compare different deficit irrigation strategies with irrigation based on crop evapotranspiration ( $ET_c$ ) measurements and visual assessments. For both years, the most appropriate set point for initiating irrigation was found to be around -10 kPa, with this treatment producing the highest yield relative to irrigation based on  $ET_c$ . The Dry treatment, with water applications initiated at about -35 kPa, resulted in water savings of about 25 % but was associated with a non-significant decrease in yield (3 %) in both years. The Step (-35/-10 kPa) and the Variable treatments used variable thresholds to initiate irrigation resulted respectively in a slight non-significant yield increase (1 %) and yield decrease (3 %), but reduced water applications by 16 and 14 % and significantly increased water use efficiency by 12 and 16 % respectively. While deficit irrigation strategies (Dry (-35 kPa), Step (-35/-10 kPa) and Variable treatments) did not reduce leaching compared to wet irrigation management, real-time tension monitoring did make it possible to adjust irrigation more precisely, maintaining water potentials between the targeted threshold and bed capacity and thus lowering the risk of water and nutrients leaching beyond the root zone compared to irrigation management based on ET measurements and visual assessments of the crop. Compared to wet irrigation management, deficit irrigation strategies seemed to reduce leaching during or following heavy rainfall, as the soil would be drier at the onset of rain and would thus be able to retain more water before leaching occurred. However, even if deficit irrigation appears promising, strawberry plants seem to be highly sensitive to any level of hydric stress. Given the high value of this crop, further investigation would be needed to assess the impact of minor hydric stress on crop productivity before implementing deficit irrigation strategies on a broader scale.

## **Introduction**

In North America (United states and Canada), 89 % of strawberries are grown in California, with lower proportions in Florida (8 %), Québec (1%) and Ontario (0.5%) (MAPAQ, 2019). Crops are generally drip irrigated throughout the growth cycle, which reduces water use relative to overhead irrigation. Despite the high efficiency of drip irrigation systems, water is becoming increasingly scarce in California, and restrictions are being imposed on strawberry growers. Irrigation in strawberry production is under increasing control elsewhere as well. Nitrate leaching is also becoming an important issue in California, since nitrates represent a risk to groundwater quality and health (California State Water Board Resources Control, 2019). Hence, water use restrictions may be imposed on strawberry growers to save water and reduce leaching. Limited information is available however on the impact of reduced watering on crop yield and nitrate leaching.

### ***Irrigation approaches***

Irrigation can be managed in several ways, based on a timer, personal judgment, weather, or plant- or soil-based measurements. In practice, weather- and soil-based measurements are the most widely used. Weather data have been combined with crop evapotranspiration models to estimate the amount of water theoretically taken up by a crop over a given period (Grattan *et al.*, 1998) to provide irrigation guidelines. Weather data from meteorological stations are thus combined with field-estimated crop coefficients to determine irrigation requirements, which growers can use to manage their irrigation schedule weekly or biweekly. While the advantage of such weather-based irrigation scheduling is that it requires limited data and equipment, it does have some limitations. First, crop requirements are estimated with no field- or soil-based data sets. Second, the accuracy of this approach varies from field to field due to differences in personal judgment, soil type, strawberry variety or other factors, which may lead to over or under watering as there is no way to estimate whether the soil is too dry or too wet. Inappropriately-timed irrigation may then cause oxygen or water stress in plants (Torr, 2012). Third, this method only provides an estimate of water requirements in the field as a whole, while the capacity of the soil to supply water varies from one location to another, and spatial variability is difficult to identify without any soil or plant measurements (Périard *et al.*, 2012).

Weather-based irrigation management can thus be improved by integrating information on field uniformity obtained with additional tools. Drones or satellite aerial imagery can be

used in combination with georeferenced yield monitors or sensor networks. Real-time soil sensors can also be used for this purpose. In addition to providing information on soil moisture variability, real-time soil data can be used to predict water stresses before they occur in plants, and the use of real-time soil-based sensors often leads to significant yield increases (Périard *et al.*, 2012). Moreover, some physiological disorders can be avoided when real-time data are used to anticipate stresses (Périard *et al.*, 2015, 2012). Hence, water consumption, water use efficiency and crop performance can be improved by using either a solely soil-based method or a combination of crop evapotranspiration estimates and sensing technologies. But real-time sensing technologies require a significant investment in equipment, including fees for service, installation and maintenance. Moreover, sensors may shift in the soil and water content sensors and tensiometers may need recalibrating.

### ***Deficit irrigation***

Although strawberry irrigation management has been studied extensively, comparing several approaches by different authors (El-Farhan and Pritts, 1997), very few studies have examined the efficiency of deficit irrigation strategies in strawberry crops. The recent drought in California, which has given rise to mandatory reductions in agricultural water use and groundwater contamination, dictates the need to improve irrigation efficiency.

In weather-based irrigation management, the 100% Crop ET requirement is generally calculated from wind speed, relative humidity, irradiance, temperature, and a field-estimated crop coefficient taken from tables or plant coverage estimates (Grattan *et al.*, 1998). In one soil-sensor-based irrigation management approach, the flux of water from the soil to the plant is theoretically linked to a critical soil matric potential (tension) at which the flux of water moving from the soil to the root may limit plant growth and impose a stress on the crop (Rekika *et al.*, 2014). The functional link between these two parameters has been described elsewhere (Rekika *et al.*, 2014; van Lier *et al.*, 2006). Rekika *et al.* (2014) showed in the equation 2.1 that  $h_1$  asymptotic, which is the critical matric potential ( $L$ ) at a given depth, can be related to  $S_0$ , the crop transpiration ( $L^3 L^{-3} T^{-1}$ ), and  $L$ , the rooting depth ( $L$ ), as well as to the capacity of the soil to supply water under unsaturated conditions (the shape of the unsaturated hydraulic conductivity curve, described by  $\alpha$ , the fitted exponent of the unsaturated conductivity Gardner function ( $L^{-1}$ ), and  $K_{SG}$ , the field

saturated hydraulic conductivity ( $LT^{-1}$ )). The last parameter  $q_0$  is the steady-state soil surface evaporation ( $LT^{-1}$ ).

$$h_{1,\text{asymptotic}} = \frac{1}{\alpha^*} \ln \left( -\frac{1}{\alpha^* K_{sG}} \begin{pmatrix} q_0 \alpha^* e^{-\alpha^* L} - q_0 \alpha^* \\ + S_0 e^{-\alpha^* L} \alpha^* L \\ + S_0 e^{-\alpha^* L} - S_0 \end{pmatrix} \right) + L$$

Equation 2.1

Then, a critical matric potential for irrigation ( $h_c$ ) is derived from  $h_1$  (Rekika *et al.*, 2014), which corresponds to the matric potential at the point of insertion of a tensiometer used to manage irrigation and is the soil matric potential at which plant water uptake requirements are met through the whole rooting depth ( $L$ ). The benefit of an irrigation management approach that includes measurements taken at the first compartment of the soil-plant-atmosphere continuum is its capacity to anticipate stresses before they occur. Hence, maintaining the soil matric potential above  $h_c$  within the rooting zone aims to ensure that water is supplied fast enough to meet the root uptake requirements. Périard *et al.* (2015, 2012) have shown that using this strategy to avoid hydric stress in the field leads to yield gains and reduces tip burn in lettuce.

### ***Adjusting the critical irrigation threshold***

The critical matric potential may vary, however, as soil hydraulic parameters, like  $K_{sG}$  and  $\alpha$ , shown as constants in the equation 2.1, evolve in time and space and are difficult to fully characterize (Caron *et al.*, 2016). Moreover, according to the equation 2.1,  $h_c$  is expected to vary during the season, because rooting depth ( $L$ ) and crop ET ( $S_0$ ) also vary. However, as real-time monitoring systems software and controllers are now able to adjust for root growth and ET fluctuations, these adjustments can be integrated into irrigation management for increased accuracy. Alternatively, a simpler approach would consist in maintaining a lower (-35 kPa) irrigation threshold (i.e., keeping the soil drier) when the plants are small and roots shallow and moving to a higher (-10 kPa) irrigation threshold as the plants become bigger.

The first objective of this study was therefore to determine if adjusting the irrigation threshold ( $h_c$ ) with real-time tension-based irrigation systems could increase water use efficiency (WUE) without affecting the crop yield. The second objective was to assess the

accuracy of using a simpler method to adjust the critical thresholds used to initiate irrigation. The third objective was to evaluate the impact of different deficit irrigation strategies on water leaching.

## **Material and methods**

The experiment was conducted over two growing seasons on a fine sandy loam in Ventura County, in southern California. The five irrigation treatments detailed in Table 2.1 were applied throughout the growth cycle, in a completely randomized block design with 5 replicates. All replicates consisted of a 100-m-long bed covered with black plastic mulch and irrigated with 3 drip lines buried at 5-cm depth. Two subplots, each consisting of a total of 16 strawberry plants, were delineated in the bed at a distance of 33 and 66 m from the beginning of the drip line.

### ***Plant performance and water stress measurements***

Measurements of plant water status and performance were taken weekly, from January to June of both years. Strawberries were harvested once or twice a week for production, except in the subplots, which were harvested weekly to assess fruit size (caliber) and quality (Brix index). Plant size (canopy area) was measured in subplots with a ruler (Grattan *et al.*, 1998).

### ***Soil sampling and analysis***

Three soil samples per treatment were taken in three replicates at the beginning of the experiment and analyzed for texture, saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ) and soil water retention curves. Electrical conductivity (EC) and pH were measured (Symphony SB70C and SB70P; VWR International, Radnor, PA, USA) in soil samples using the saturated soil extract (SSE) method (1:1 suspension) (Dahnke and Whitney, 1988) at three different times during the experiment (beginning, middle and end). Soil salinity was also measured in soil water samples taken weekly with a suction lysimeter (Soil Moisture Equipment Corp., Santa Barbara, CA, USA) from three replicates in each treatment to make sure salts did not accumulate in deficit irrigation treatments. Data were not reported though as no effect was observed. The amount of water applied per hectare was measured using flowmeters (TM-200; Great Plains Industries Inc., Wichita, KS, USA) on the main lines of

each irrigation treatment and readings were recorded weekly. These last measurements were not replicated however.

### ***Irrigation management***

From January to June of both years, real-time soil water potential was measured at 15- and 30-cm depths (3 reps) using wireless tensiometers (TX3; Hortau Inc., San Luis Obispo, CA, USA) that collected data every 15 minutes. Irrigation was either initiated manually by the irrigator (2014) or fully automated (2015). Irrigation was initiated in each treatment when the average tension at 15 cm reached the thresholds set for the different treatments. To avoid leaching, the duration of the irrigation periods was adjusted so that the tension at 30 cm did not exceed -5 kPa. The experimental field was irrigated with both water from the city water network (2014) and well water (2015).

### ***Leaching measurements***

Lysimeter plates were used to monitor and sample water that leached beyond the root zone. In 2014, one plate was installed in each of the 5 treatments. In 2015, the number of plates was increased to a total of 11. The plates were placed in blocks 1, 3 and 5 in Wet (-10 kPa), Dry (-35 kPa) and Grower treatments and in block 3 only in Variable and Step (-35 kPa/-10 kPa) treatments due to equipment constraints. Each plate measured 30 cm in diameter, with a 5-mm-high rim. Each plate was installed at a depth of 45 cm below an average size plant and was connected to a sampling bucket with a flexible hose that measured 1.2 cm in internal diameter (Figure 2.1). The bucket was buried on the edge of the bed. A fiberglass wick was inserted in the hose to ensure a proper hydraulic connection between the plate and the bucket. The fiberglass wick was unravelled and spread over the plate so that the fiberglass covered the leaching area. The height difference between the plate and the sampling bucket induced a negative matric potential at the top of the plate-soil interface and the height of the sampling bucket was positioned to reflect the field capacity of the site (-3 kPa), as described by Létourneau *et al.* (2015).

The lysimeter plates were installed carefully to reduce soil disturbance and ensure that representative leaching measurements were obtained. The first step was to dig a hole to place the sampling bucket on the edge of the bed without affecting the leaching area to be instrumented. The second step was to dig a horizontal cavity under a representative strawberry plant at a depth of 45 cm without disturbing the soil profile in the leaching area.

The third step was to slide the plate horizontally into the cavity and then pack the soil underneath the plate to ensure good hydraulic connectivity between the top of the plate and the soil.

Porous-cup tensiometers (TX3; Hortau Inc., San Luis Obispo, CA, USA) were installed at 15-, 30- and 38-cm depths and were distributed around the plant, above the contour of the plate (Figure 2.1). The tensiometer at the 15-cm depth was installed at a 45° angle halfway between the studied plant and the next plant along the row. The tensiometers installed at the 30- and 38-cm depths were placed under the dripline on each side of the studied plant.

The experimental plots were visited once a week. Any water that had leached into the sampling buckets during the previous week was measured and sampled in the morning, and the buckets were then emptied. If more water leached during the same day, the freshly leached water was also measured and sampled. EC and pH analyses were done on both samples (old and fresh) as described previously (see section on soil sampling and analysis).

### ***Statistical analysis***

Statistical analyses were done on yield and water use efficiency data using GLM procedure with Waller-Duncan K-ratio t test in SAS software (SAS institute, Cary, NC, USA). Data were considered different at a level of significance of 0.05 ( $P < 0.05$ ). The replicate 5 of the Variable treatment and the replicate 1 of the Wet treatment (-10 kPa) were removed from analyses due to plant disease in these parts of the field.

## **Results and discussion**

### ***Water use***

Previous work indicated that -10 kPa was the most appropriate irrigation threshold for day-neutral strawberries grown on raised beds (Létourneau *et al.*, 2015). However, the findings of the current study show, in Figure 2.2, that in 2014 the -10 kPa threshold tended to keep the soil slightly too wet, as the real  $h_c$  remained mostly between -15 and -20 kPa throughout the season. The -10 kPa threshold did appear appropriate for 2015, however, as the real  $h_c$  line was close to -10 kPa most of the time. The real  $h_c$  data also indicate that drier thresholds could have been used early in the season, when the plants were smaller.

Indeed, the real  $h_c$  was closer to -20 kPa early in both seasons and then increased as the plants increased in size.

These findings indicate that irrigation could have been delayed until the soil was drier, potentially saving water. Figure 2.3 illustrates the different amounts of water used in both years. As expected, the Dry treatment (-35 kPa) used 25% less water than the Wet treatment (-10 kPa), which used the greatest amount. The partial deficit irrigation treatments, Variable and Step (-35/-10 kPa), were intermediate, generating water savings of 14 % and 16 %, respectively, relative to the Wet treatment. In 2014, water use in the grower-controlled treatment was closer to that in the driest treatment (-35 kPa), possibly because of a general effort to use less water for agriculture, as a result of the widespread drought in California that year. In 2015, however, the Grower treatment more closely resembled the Wet treatment (-10 kPa). The average amount of water applied in the grower-controlled treatment over both years was similar to that applied in the deficit irrigation treatments (Variable and Step (-35/-10 kPa)). Relative to calculated  $ET_c$ , all treatments used more water in both years combined, for two possible reasons. First, the beds were compacted and runoff sometimes occurred before sensors could detect the wetting front. Second, differences in variety and growing conditions may have led to differences in real water uptake in comparison to crop coefficient estimates derived from independent studies performed elsewhere and under different varietal and growing conditions. Previous studies indicated that between 1 and 2 acre-foot/acre (30 to 60 cm of water height) were necessary to meet crop requirements during the period after the establishment through the end of the season.

### ***Effects on crop and soil properties***

Although the amount of water applied throughout the season varied between treatments, the different thresholds used to manage irrigation had no discernible impact on soil salinity or general plant appearance (Chapter 3), nor did they have a significant effect on yield (Figure 2.4). Nonetheless, all tension-managed treatments tended to have better yields (3 to 7 %) than the conventional grower-managed treatment. This same trend has been reported elsewhere, and may be attributable to more uniform irrigation obtained with tensiometer-based management (Gendron *et al.*, 2017). The Dry and Variable treatments resulted in a 3 % yield decrease compared to the Wet treatment (-10 kPa) and a 4 % decrease compared to the Step treatment (-35/-10 kPa), although these differences were

not significant ( $P > 0.05$ ). A more comprehensive study (Gendron *et al.*, 2018) found, however, that yields decreased significantly with decreasing irrigation thresholds from -10 kPa, with yield losses as low as 2 % having a notable economic impact. Nonetheless, further experimentation aimed at confirming the yield decreases reported by Gendron *et al.* (2018) and their impact on the net margin of the crop should be conducted before advocating deficit irrigation strategies.

Although the yield increase observed in the Step treatment as compared to the Wet treatment was limited and non-significant (less than 1 %), Figure 2.5 shows that this deficit irrigation treatment significantly improved WUE. WUE provides information on the ability of the plant to convert water into marketable fruit and is obtained by dividing the crop yield by the amount of water used to irrigate. Although yield differences were not significant for the partial deficit irrigation treatments, the Step treatment generated a significant 16 % improvement in WUE while the Variable treatment improved WUE by 12% compared to the Wet treatment (significant at  $P < 0.05$ ), for both years combined. The Dry treatment resulted in a significant improvement in WUE (22 %) compared to the Wet treatment. Conventional grower-managed irrigation improved WUE by 10 % compared to the Wet treatment. Using more water than needed or applying water in excess of crop requirements may cause water runoff from the beds, as mentioned above, or leaching.

Hence, in answer to the first objective of this study, it is clear that tension-based partial deficit irrigation generated significant water savings relative to the Wet treatment, with no significant drop in yield. However, the data presented here suggest that strawberries are highly sensitive to hydric stress, and that the use of a deficit irrigation strategy could potentially result in a significant loss in productivity, given the high price of this crop. As for the second objective, it appears that simply adjusting  $h_c$  as a function of the growth stage of the strawberry plants is as effective as a more complex adjustment based on hydraulic properties specific to this particular soil type. This conclusion should be tested further, however, as the response of this crop to hydric stress may be dependent on soil texture.

### ***Leaching***

In 2014, very few leaching events were observed, and most occurred after one period of heavy rainfall (100 mm over 5 days). Following this rainfall, the Wet treatment leached 1.30 cm of water, equivalent to 4.2 % of the total amount of water (irrigation + rain) received in the field, while the other treatments leached between 0 and 0.14 cm,

equivalent to between 0 and 0.6 % of the water received (Figure 2.6). Leached water is expressed as an equivalent height of water (cm).

Because the Wet treatment maintained a higher soil water potential, the sorption capacity of the soil to hold water before reaching field capacity may have been lower in that treatment than in the deficit irrigation treatments, depending on the soil water potential status before a rainfall or an irrigation. In this case, the soil water potential before the rain was higher (less negative) in the Wet treatment than in the others, and this could explain in part why such leaching occurred (Figure 2.7). Very little leaching was observed during the rest of the season in any of the treatments.

In 2015, no heavy rainfall events occurred on the site, so leaching was not significant in this second year. No leaching was measured in the Wet and Dry treatments, but a few events of leaching were observed in the partial deficit irrigation treatments. Over the season, the Variable treatment leached 0.29 cm (0.7 % of total water), mainly in May, and the Step treatment leached 0.32 cm (0.9 % of total water) in April (Figure 2.8). These leaching events were caused by a problem in the automation system. The irrigation system was kept pressurized and a valve leaked some water toward the driplines causing leaching in the field. The grower-controlled treatment was not automated and so was not affected by that problem. Since the leaching measurements were not replicated for all treatments, no statistical analyses were performed on these results.

Grower-managed irrigation during the 2015 season tended to maintain wetter conditions than in 2014, and many small leaching events were observed, mainly from early February to early April, amounting to a total of 1.24 cm (2.6 % of total water received). Whether watering for fertigation or to meet crop water needs, irrigation periods were sometimes too long or too frequent, leading to some leaching. The tension at the depth of the lysimeter plates (38 cm) was often below field capacity (-3 kPa), which indicates a higher risk of leaching (Figure 2.9). In treatments managed according to the soil water potential, the tensiometers made it possible to adjust irrigation periods more precisely and so prevent water and also nutrients such as nitrates from leaching beyond the root zone.

Hence, with respect to the third objective of this study, the assessment of water leaching over two growing seasons showed that the effect of the irrigation treatments was mainly related to the adjustment of the duration of the irrigation period. Although the soil water potential threshold used to initiate irrigation had a significant effect on WUE, it did not have

a major impact on leaching in this type of soil. Partial deficit irrigation could be helpful in preventing leaching when rainfall occurs since this strategy allows the soil to dry prior to the rain, which increases the sorption capacity of the soil and maintains a water potential that is low enough to stop water and fertilizer, specifically nitrates, from moving below the root zone. However, drying a fine sandy loam may also lead to soil compaction and, consequently, water runoff, as was observed mainly in the Dry treatment near the end of the seasons. All tensiometer-based treatments were managed using real-time soil water potential monitoring, which made it possible to adjust irrigation precisely enough to maintain the soil water potential in the root zone between the targeted threshold and the field capacity of the bed and so avoid leaching beyond the root zone.

## **Conclusion**

Strawberries appear to be sensitive to any level of water stress, as even a mild stress, with 14 % less water than the Wet treatment, tended to reduce yields by 0 to 3 %, although this difference was not statistically significant. However, deficit irrigation strategies did increase significantly the water use efficiency of the crop by 12 to 16 %. Maintaining a slight irrigation deficit could prevent leaching when rainfall occurs, but real-time soil water potential monitoring appears to be a useful management tool that would enable growers to adjust irrigation to prevent the leaching of water and nutrients such as nitrates. Since nitrate contamination in groundwater is becoming a public health issue in California, further work should focus on controlling nitrate losses using deficit irrigation strategies.

## **Acknowledgements**

The authors wish to thank France Chabot for the typesetting. The financial contribution of the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC), Hortau and Ferme Onésime Pouliot is also acknowledged.

## Figures and Tables

Table 2.1. Irrigation treatments applied throughout the growth cycle in two seasons in a randomized complete block design with 5 replicates

Season	Establishment	Shallow roots and low ET <sub>c</sub> demand	Deep roots and high ET <sub>c</sub> demand
2014	15 October 2013 -> 1 January 2014	2 January 2014 -> 20 March 2014	21 March 2014 -> 12 June 2014
2015	5 October 2014 -> 8 January 2015	9 January 2015 -> 24 March 2015	25 March 2015 -> 11 June 2015
Treatments	Establishment	Shallow roots and low ET <sub>c</sub> demand	Deep roots and high ET <sub>c</sub> demand
Grower (Control)	> -10 kPa	Conventional grower management	
Wet (-10 kPa)	> -10 kPa	-10 kPa	
Step (-10/-35 kPa)	> -10 kPa	-35 kPa	-10 kPa
Variable	> -10 kPa	Daily forecasted h <sub>c</sub>	
Dry (-35 kPa)	> -10 kPa	-35 kPa	

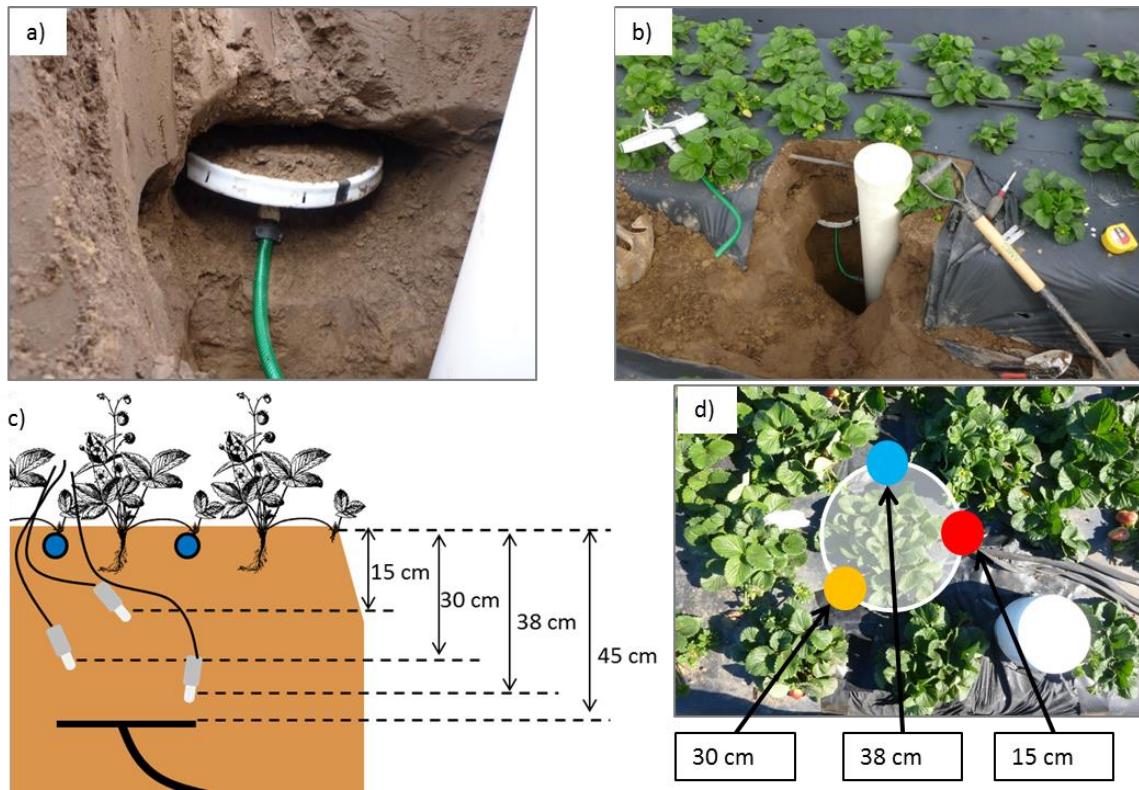


Figure 2.1. Lysimeter plate installation (a, b) and tensiometer distribution above the plates (c, d) (Strawberry plant in image c was taken from Chisholm (1911)).

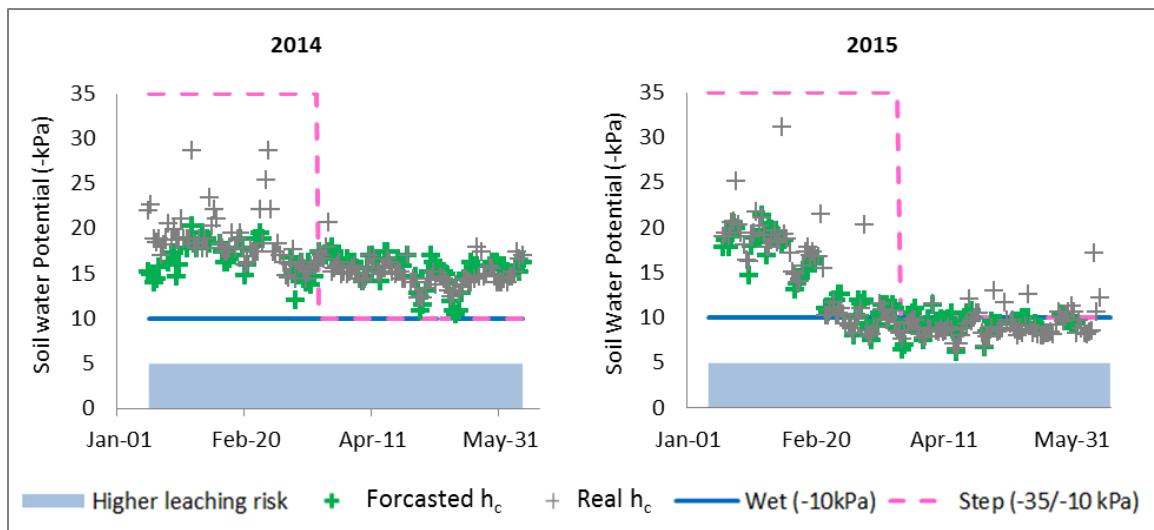


Figure 2.2. Daily forecasted critical threshold ( $h_c$ ) calculated from forecasted ET (provided by NOAA), real  $h_c$  calculated afterward from monitoring ET data (provided by CIMIS) and the targeted irrigation threshold in the Step (-35/10 kPa) and Wet (-10 kPa) treatments.

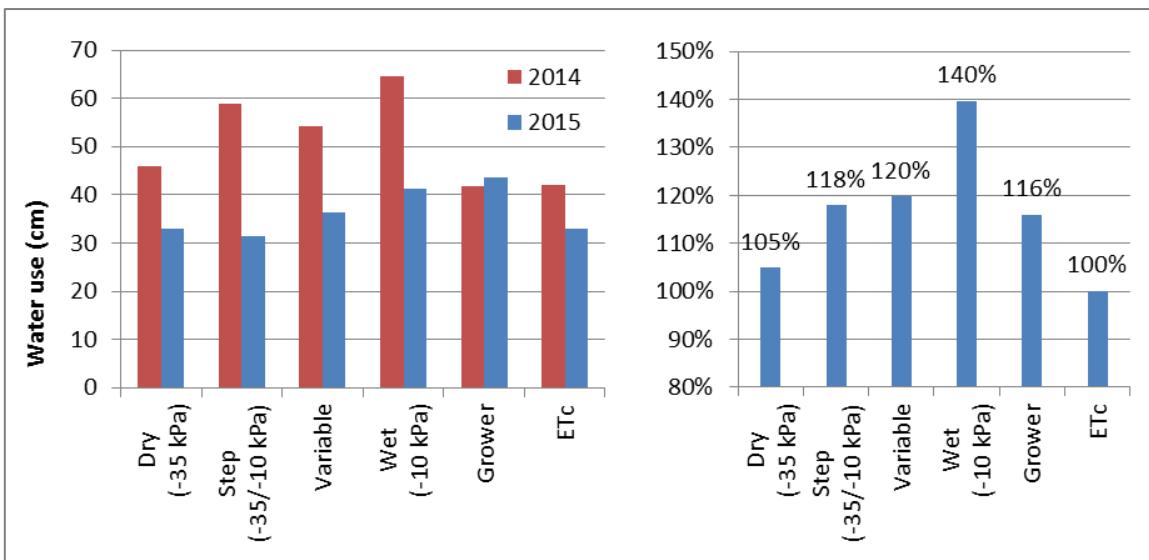


Figure 2.3. Cumulative water use for both seasons (left) and combined water use as a percentage of crop evapotranspiration (right). In 2014, water use was recorded from November 26, 2013 to June 12, 2014 while in 2015, water use was recorded from January 9 to June 11, 2015. Evapotranspiration of the crop ( $ET_c$ ) is shown here as a comparison and was calculated from ET data provided by CIMIS.

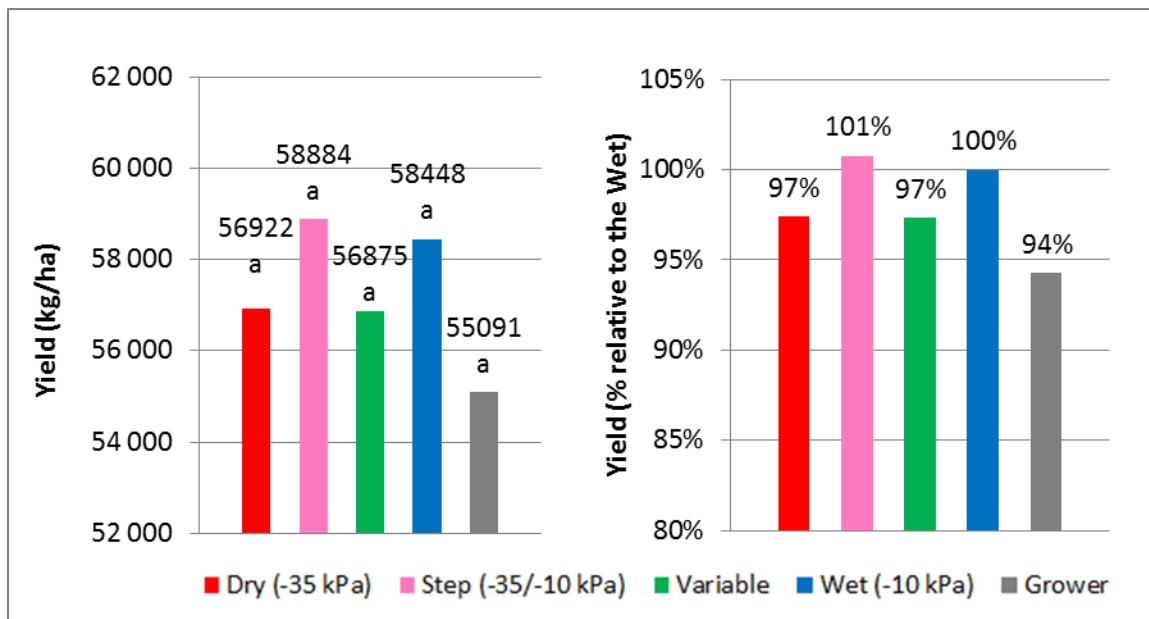


Figure 2.4. Crop yields for both years combined (left), and crop yields for both years as a percentage of the Wet treatment yield (right). (Numbers with the same letter do not differ significantly at  $P=0.05$  according to the Waller-Duncan t test with  $t = 2.75$  and RMSE = 3126.4 kg/ha.)

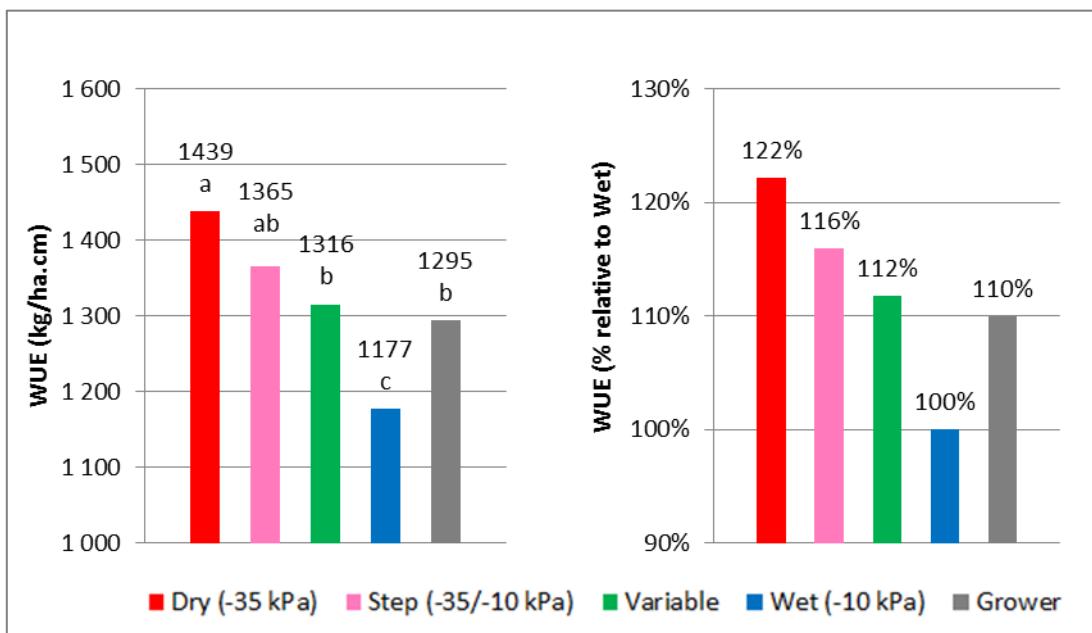


Figure 2.5. Water use efficiency (WUE) for both years combined (left), and WUE as a percentage of the Wet treatment WUE (right). (Numbers with the same letter do not differ significantly at  $P=0.05$  according to the Waller-Duncan t test with  $t = 2.08$  and RMSE = 7648 kg/ha.cm.)

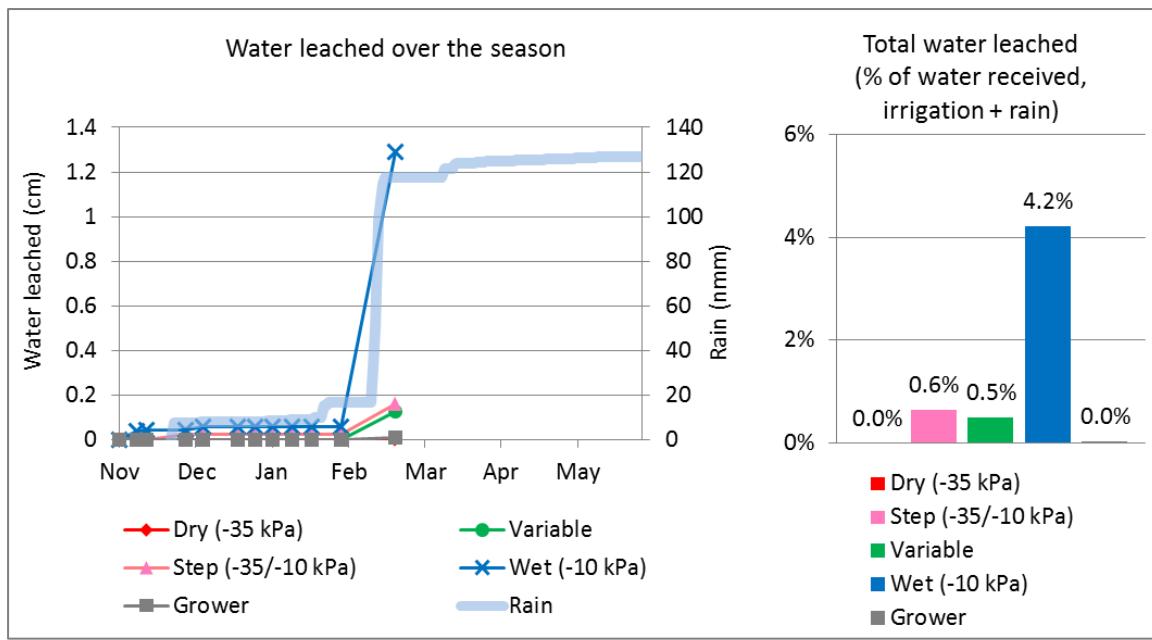


Figure 2.6. Water leached from November 26, 2013 to March 7, 2014.

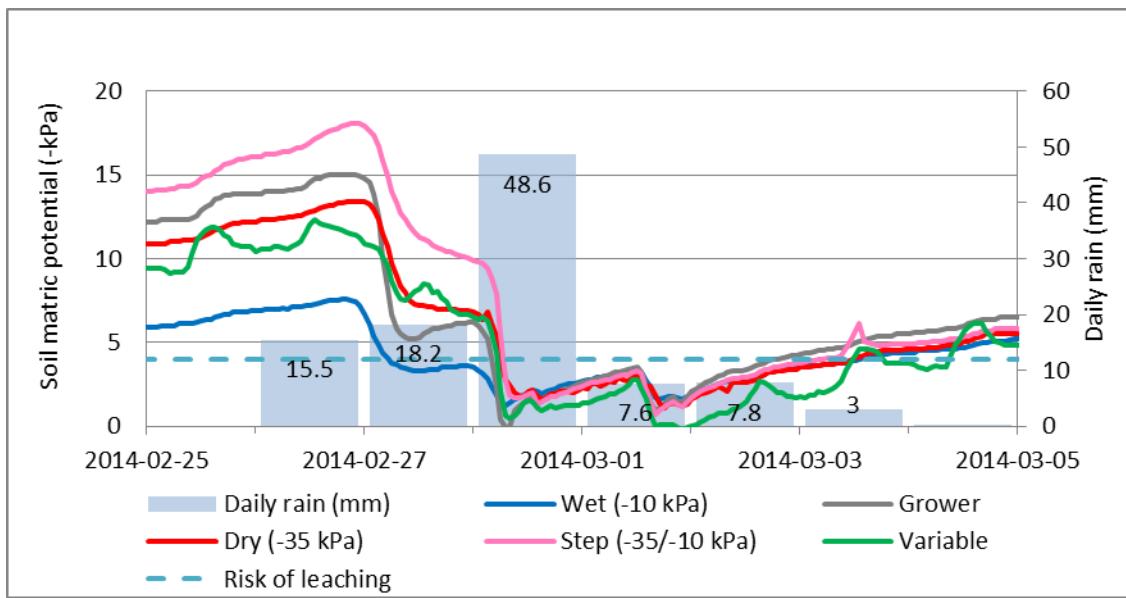


Figure 2.7. Soil matric potential at a depth of 30 cm near the lysimeter plates during a leaching event following heavy rainfall in late February 2014 (CIMIS, 2015).

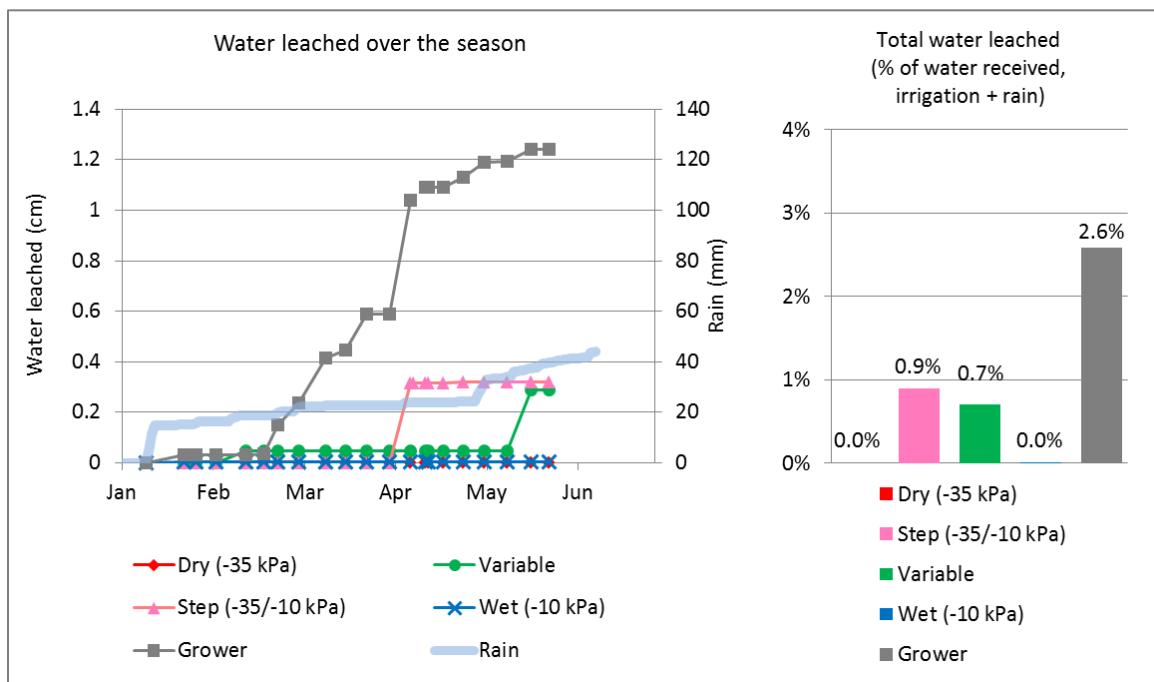


Figure 2.8. Water leached from January 9 to June 7, 2015.

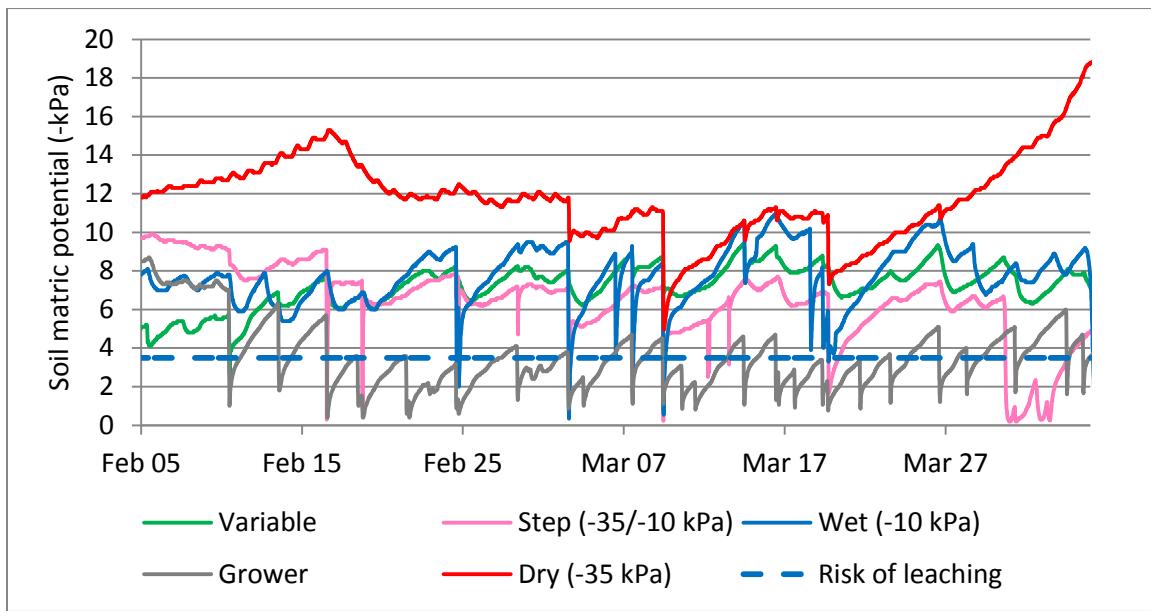


Figure 2.9. Soil matric potential at a depth of 38 cm, just above the lysimeter plates, in block 3 from February 5 to April 5, 2015, a period of frequent leaching events in the grower-managed treatment.

# **Chapitre 3 : Tension-based irrigation management and leaching monitoring using electrical conductivity in strawberry production**

## **Résumé**

Le fraisier est sensible au stress hydrique et tolère peu la salinité. La culture de fraises nécessite donc des irrigations fréquentes pour assurer un rendement élevé sans toutefois provoquer le lessivage des fertilisants. L'objectif de ce travail était de comparer le lessivage et la salinité associés à différentes régies d'irrigation et à vérifier si un suivi des nitrates pouvait être assuré par une mesure de conductivité électrique (CE). Deux régies d'irrigation étaient basées sur l'évapotranspiration (ET) (50 % de ET et 100 % de ET) et quatre régies étaient basées sur les seuils de tension suivant : (i) *wet* (-10 kPa), (ii) *variable*, (iii), *late* (-35/-10 kPa) et (iv) *dry* (-35 kPa). Aucune différence significative de CE n'a été observée entre les traitements même si d'importantes fluctuations ont été mesurées pendant la saison. De plus, la concentration en nitrate dans la solution du sol a peu d'impact sur les modèles de salinité. La CE n'est donc pas un indicateur fiable pour suivre l'évolution de la concentration en nitrate dans le sol pour ces deux sites.

## **Abstract**

Strawberry plants have a shallow root system and are sensitive to water stress and salinity. Thus, strawberry crop needs frequent irrigations to ensure high fruit yield. Furthermore, each irrigation must be managed with precision to limit fertilizer leaching (e.g. nitrates) toward groundwater. The aim of this work was to compare over two growing seasons and two sites (sandy loam and clay loam) the leaching and salinity buildup associated with different irrigation managements. This work also examined whether electrical conductivity (EC) measurements could be used to assess the concentration of nitrates in the soil and have a better control on nitrate leaching. For both sites, two irrigation managements were based on evapotranspiration (ET) (50 % ET and 100 % ET) and four were based on the following soil matric potential ( $\psi$ ) thresholds: (i) Wet (-10 kPa), (ii) Variable, (iii) Late (-35/-10 kPa) and (iv) Dry (-35 kPa). The variable matric potential threshold treatment was adjusted based on forecasted ET, while the Late threshold treatment was imposed at -35 kPa at the beginning of the season and -10 kPa thereafter.

until the end of the season. Although large variations in EC were measured over the two seasons, no significant difference was observed among treatments for both sites. The nitrate concentration did not have a great impact on salinity models. Therefore, EC is not considered a reliable indicator to monitor changes in nitrate concentrations within the soil profile for these two sites.

## Introduction

Water is an increasingly coveted resource. Several areas in the world experience drought or water restrictions periodically. For California, the year 2016 will be the fifth consecutive year of the worst drought of its history (California Drought, 2016). Since 80 % of the potable water is used in agriculture, the agricultural industry is often the first to face pressure to reduce water use. For growers, improving water use efficiency is critical and they must manage each drop with care. Three basic methods of irrigation management are used. The first method is based on the visual assessment of soil moisture and thus on the experience acquired by the grower over the previous years. The second method is based on the evapotranspiration (ET) of the crop. In this case, climatic models calculate the needs of the crop according to different climatic parameters multiplied by a crop coefficient ( $K_c$ ) (Allen et al., 1998). The California Irrigation Management Information System (CIMIS) has a network of weather stations throughout the state that provides good estimates of ET, but does not take into account the moisture in the soil. The third approach consists in using soil moisture sensors such as tensiometers. In California, the combination of the first two methods is generally assumed as the conventional management.

Strawberry plants have a shallow root system and require frequent irrigation. Previous works have shown that tension-based irrigation management may increase crop yields, but also reduce the volume of water applied by increasing water use efficiency (WUE) (Guimerà et al., 1995; Létourneau et al., 2015; Torr, 2012). Létourneau et al. (2015) demonstrated that crop yields were maximal when initiating irrigation at soil matric potential ( $\psi$ ) between -8 kPa and -12 kPa depending on the site. In general, irrigation threshold (IT) in the range between -12 and -25 kPa was found to slightly reduce fruit yield but had a pronounced effect on water use (Létourneau et al., 2015), so optimization could be done in this range of soil matric potential to find the best compromise between yield and WUE.

Furthermore, the use of chemical fertilizers in agriculture combined with overwatering can lead to water and nutrient leaching (e.g. nitrates). There are economical losses for growers associated with this leaching, but also a risk of groundwater contamination (Torr, 2012). Nitrate is known for its high mobility in the ground and the risk of groundwater contamination is well documented. Adequate water management is the key to avoid nitrate leaching (Gärdenäs *et al.*, 2005). Deficit irrigation is also a promising technique to reduce leaching, but when the soil is maintained too dry, salinity may increase and cause osmotic stress. Consequently, soil salinity must be kept at an acceptable level (Hanson and Bendixen, 2004). Electrical conductivity (EC) measures the salinity in the soil and each ion contributes, at different levels, to the total salinity. Empirical models of salinity can predict EC when the salt composition in the soil is known (Visconti *et al.*, 2010). If nitrates have an important impact on the EC model for strawberry production, soil EC data could be a good indicator to monitor the evolution of nitrates in order to have a better control on leaching.

This study aimed to investigate different scenarios of deficit irrigation management based on soil matric potential and evaluate their impact on leaching. Another objective was to assess the ability to monitor nitrate concentration and leaching by measuring EC in the soil solution collected using suction lysimeter.

## Materials and Methods

### ***Site Description***

Two experimental sites were established in California in a Mediterranean climate. On both sites, fertilizers were applied to the whole experimental area by the grower using drip tapes, so that all treatments received the same amount of nutrients. Pesticides were applied when needed at the same concentration and the same frequency as for the grower's fields.

Site 1 was established on an experimental farm in Watsonville, CA between November 2013 and October 2014 on a clay loam soil. Two rows of day neutral strawberry plants (*Fragaria × ananassa* Duch.) were planted in mid-October on each raised bed with a density of 53 820 plants/ha. Strawberries were harvested between March and October. Beds were 58 m long, 0.8 m wide and were covered by grey plastic mulch. Irrigation sprinklers were used for the establishment period ( $\pm$  5-6 weeks) and for frost protection.

Two low flow drip tapes 1.6 cm in diameter with emitter spacing of 20 cm were installed on top of the bed and used to water the plants until the end of the season.

Site 2 was established on a commercial farm in Oxnard, CA between October 2014 and June 2015 on a sandy loam soil. Short-day strawberry plants were planted in early October 2014 and were harvested from late December to mid-June. Beds were 1.22 m wide and 119 m long. Strawberries were planted in four rows per bed with a plantation density of 62 882 plants/ha and black plastic mulch covered the beds. Sprinklers were used at the beginning of the season for the establishment period ( $\pm$  5-6 weeks) and for frost protection until January. For the rest of the season, water was applied using three low flow drip tapes 1.6 cm in diameter with emitter spacing of 20 cm and buried at 5 cm depth in each bed.

### ***Experimental Design***

At site 1, five treatments were investigated between 21 March and 9 October 2014 in a completely randomized block design ( $n = 4$ ). Two treatments were based on  $\psi$ : (i) Wet (-10 kPa), (ii) Late (-35/-10 kPa) and two were based on ET: (iii) 50ET (50 % of ET demand) and (iv) 100ET (100 % of ET demand). Late treatment threshold was -35 kPa from 21 March to 23 May and then -10 kPa until the end of the experiment. ET demand was calculated using the software CropManage (Cahn *et al.*, 2015). Irrigations were usually applied on Mondays, Wednesdays and Fridays. Grower's team applied the fifth treatment (Control) using conventional management and referred occasionally to the tensiometers. Control plots were irrigated 2 or 3 times a week.

At site 2, the experiment was performed from 9 January to 11 June 2015 with five treatments randomly distributed in five blocks. Four treatments were based on the following  $\psi$  thresholds: (i) Wet (-10 kPa), (ii) Variable, (iii) Late (-35/-10 kPa), and (iv) Dry (-35 kPa). Variable matric potential threshold was adjusted daily based on forecasted ET (Rekika *et al.*, 2014). Late threshold was -35 kPa until March 25<sup>th</sup> and was then raised at -10 kPa for the rest of the growing season. The fifth irrigation treatment was the Control and was managed by the grower using a combination of ET demand and tensiometer readings.

Soil tensiometers (TX3; Hortau Inc., San Luis Obispo, CA, USA) were installed at two depths (15 and 30 cm) in blocks 1 and 3 at site 1 and in blocks 1, 3 and 5 at site 2.

Irrigations were triggered when the average  $\psi$  at 15 cm reached the target threshold value and the duration was adjusted so that  $\psi$  at 30 cm reached -5 kPa.

### ***Sampling and Chemical Analysis***

At site 1, suction lysimeters were installed in blocks 1, 2 and 3 along a transect parallel to the beds. At site 2, a suction lysimeter was placed next to each tensiometer. All suction lysimeters were installed at 15 cm depth and sampled weekly. EC analyses were immediately performed on soil water samples using a conductivity meter (Symphony SB70C and SB70P; VWR International, Radnor, PA, USA) and the remaining samples were frozen for further chemical analysis. Samples were taken to the laboratory to determine the concentration of  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  and soluble P using inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry (ICP-AES) and ion chromatography (IC) (Carter & Gregorich, 2007).

## **Results and Discussion**

### ***Leaching and Salinity***

Figure 3.1. shows the evolution of EC in the soil through the season. On site 1, even if great variations were observed over the season, no significant EC difference among treatments was seen. EC decreased between December 2013 and April 2014. During this period, 343 mm of rain fell in the area which caused leaching and flushed salts that were accumulated within the root zone. Then, no rainfall occurred and salinity increased again over the rest of the season. At the end of the season, salinity reached about the same level than it was in the early season. Although a small salinity buildup occurred over the season, salts were then flushed by winter rainfalls.

On site 2, rainfalls occurred earlier in the fall and salts were flushed during this period. EC measurements began in January and very few small rainfall events occurred afterwards. Salinity values at the beginning of the season were similar to that of irrigation water. No significant difference in EC was observed among irrigation treatments, but they all tended to increase over the season. While the Late treatment had higher EC values than most treatments on site 1, it resulted in relatively low EC values on site 2.

On both sites, the EC of the irrigation water remained below or slightly above the threshold of 1 dS/m recommended by Hanson and Bendixen (2004) to avoid yield losses. The EC in

the soil solution ranged between 0.28 and 3.57 mS/cm (1 mS/cm = 1 dS/m) on site 1 and between 1.06 and 3.15 mS/cm on site 2 which is higher than the maximum threshold of 1.4 dS/m that could induce yield decreases according to Strand (1994). However, EC values higher than the threshold do not necessarily affect strawberry plants if concentrations of  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$  remain low (Daugovish *et al.*, 2011). Those concentrations were present in the irrigation water and in the soil but ranged in an acceptable level on both sites and negative effects could be mitigated by high concentrations of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  (Khayyat *et al.*, 2011).

### ***Relation between EC and Nitrate Concentration***

Pearson's correlation coefficients ( $r$ ) were calculated for each mineral element and significant effects are shown in Table 3.1. Both sites' EC values were highly correlated with  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$ . Nitrate had a significant effect on EC, but the correlation coefficient was only 0.3 on site 1 and therefore variations in EC would not necessarily account for changes in nitrate concentration because other mineral elements had a greater impact on EC. On site 2, the negative value of  $r$  shows that EC decreases as nitrate concentration increases, suggesting that there is an interaction with another element that lowers EC. Overall, nitrate concentration could also not be estimated with certainty by measuring EC on site 2.

Stepwise analyses were then performed using stepwise procedure on SAS software (SAS institute, Cary, NC, USA) for both sites to decompose the effect of each mineral element on EC of water collected using suction lysimeters. Only the nutrients with significant effect in the final model are reported in Table 3.2. Most of the salinity in the soil was explained by only a few ions, so even if other nutrients had significant correlations, they were not considered in the model because they did not bring any significant additional effect on soil salinity.

On site 1, ions that had a significant contribution in the model of salinity were calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), sodium ( $\text{Na}^+$ ) and chloride ( $\text{Cl}^-$ ). Gypsum was applied as calcium amendments at the beginning of the season to improve the soil structure and the infiltration of which would explain the high concentrations of calcium. The low value of the intercept and high  $R^2$  (0.94) indicate that the model adequately takes into account the main nutrients that contribute to soil salinity. Despite the good fit of the salinity model, EC would not be a good indicator to determine nitrate leaching for site 1.

On site 2 sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) and calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) ions had a significant impact on the salinity model. This was somewhat expected as gypsum salt ( $\text{CaSO}_4$ ) is naturally present in high concentration in the soil. The  $R^2$  of the model (0.80) is lower than that of site 1 whereas the intercept is higher. This could mean that other ions not measured here had a great impact on the salinity of the soil. Thus, EC measurements could not estimate with precision the nitrate concentration into the soil.

## **Conclusion**

Experiments on precision irrigation that used soil matric potential thresholds were carried out on two sites over two growing seasons. For both sites, there was no significant difference among treatments in term of salinity buildup. On site 1, EC measurements taken throughout the season showed that winter rainfalls could leach the salt ions accumulated over the previous season. On both sites, an increase in soil salinity was observed during the growing season for all treatments. Therefore, it implies that soil tension-based irrigation management in the -10 to -25 kPa range can be implemented with limited risk of increasing salinity buildup or increasing nitrate leaching.

Mineral element concentrations and EC measurements showed that for strawberry crop, nitrate concentration did not have a great impact on the EC of the soil solution. As a consequence, EC should not be used as an indicator to monitor the evolution and control the leaching of nitrates in the soil. To assess the concentration of  $\text{NO}_3^-$  in the soil, nitrates should be measured independently.

## **Acknowledgements**

We would like to thank the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and our project partners: Hortau Inc. and Ferme Onésime Pouliot Inc.

## Figures and Tables

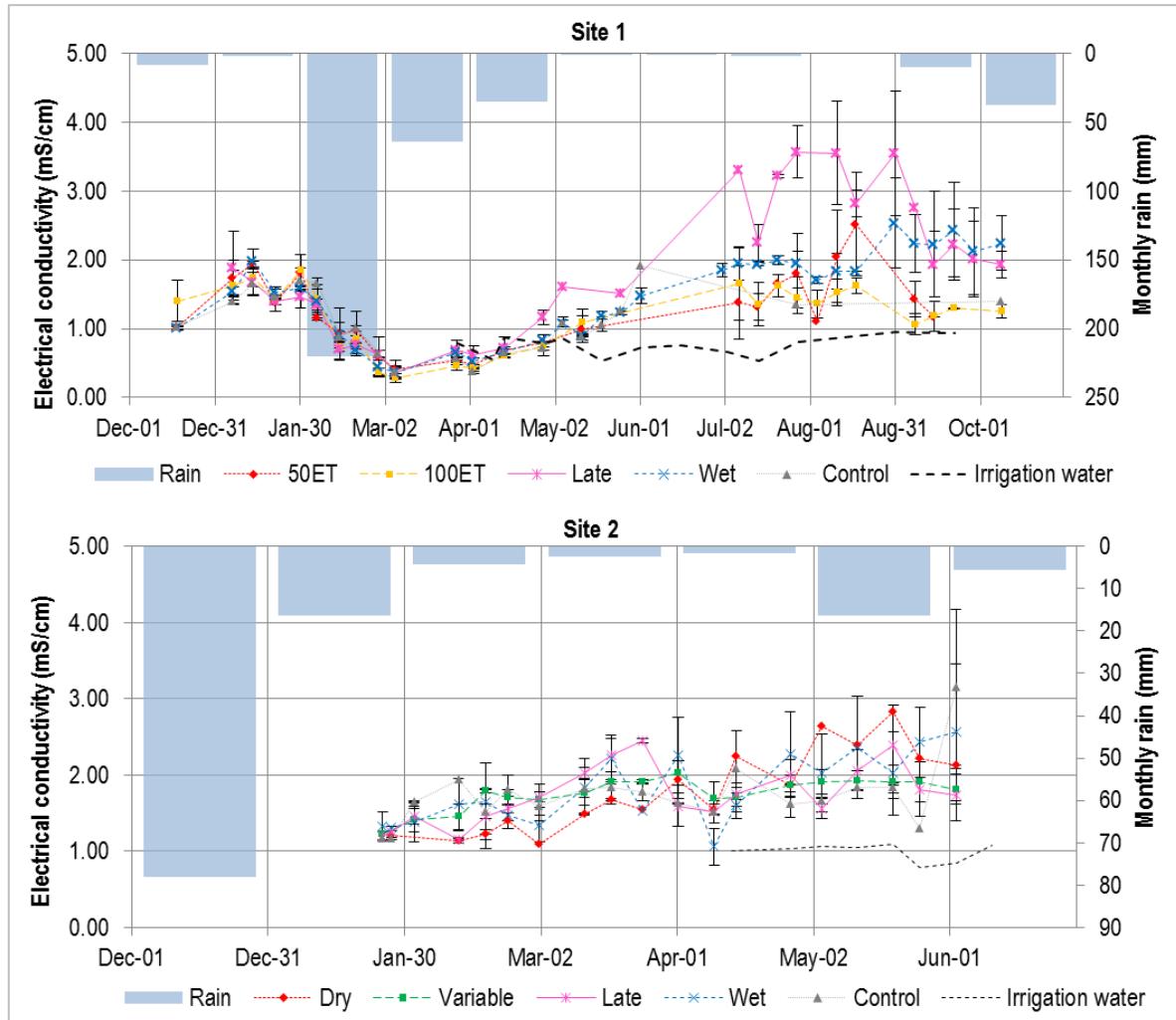


Figure 3.1. Changes in the electrical conductivity of the soil solution and monthly rainfall of site 1 and 2 over the growing season. Values are means of observations  $\pm$  s.e.

Table 3.1. Pearson's correlation coefficients (r) for two different sites

	Site 1		Site 2	
	r	P value <sup>1</sup>	r	P value <sup>2</sup>
EC	1		1	
Cl <sup>-</sup>	0.81181	<.0001	0.6695	<.0001
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.79776	<.0001	0.89109	<.0001
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.30286	<.0001	-0.18273	0.01
Ca <sup>2+</sup>	0.93417	<.0001	0.70977	<.0001
Mg <sup>2+</sup>	0.94138	<.0001	0.54842	<.0001
Na <sup>+</sup>	0.90593	<.0001	0.61516	<.0001

<sup>1</sup> Number of samples for site 1 was 247.

<sup>2</sup> Number of samples for site 2 was 198.

Table 3.2. Contribution of each nutrient to the salinity model<sup>1</sup>

<b>Site</b>	<b>Variable</b>	<b>Estimated Coefficient</b>	<b>Pr &gt; F</b>
1	Intercept	0.01426	<.0001
	Ca <sup>2+</sup>	0.00589	<.0001
	Na <sup>+</sup>	0.00708	<.0001
	Cl <sup>-</sup>	-0.00096883	<.0001
2	Intercept	0.74925	<.0001
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.00306	<.0001
	Mg <sup>2+</sup>	0.00064946	0.0609
	Ca <sup>2+</sup>	-0.00447	0.0075

<sup>1</sup>R<sup>2</sup> for site 1 and site 2 models were 0.9429 and 0.8023 respectively.

## Conclusion générale

Différentes stratégies d'irrigation basées sur la tensiométrie et sur un modèle climatique utilisant l'évapotranspiration ont été comparées en Californie sur deux saisons de production de fraises cultivées en champ dans le but de quantifier l'impact sur le rendement, le lessivage et le risque d'augmentation de la salinité du sol de chaque régie.

La première étude a montré que même si la régie d'irrigation humide (-10 kPa) a utilisé plus d'eau que la régie conventionnelle du producteur basée sur l'évapotranspiration et l'observation visuelle de la culture, cette régie a permis de réduire le lessivage et tendait à augmenter le rendement de 6 % (non significatif) par rapport à la gestion conventionnelle du producteur. De plus, les régies d'irrigation de déficit gérées par tensiométrie ont permis des réductions de 14 % à 25 % du volume d'eau utilisé et des gains significatifs d'efficacité d'utilisation de l'eau de 12 à 22 % par rapport à la régie humide. Toutefois, ces stratégies n'ont pas permis de réduction supplémentaire du lessivage par rapport à la gestion humide. Au niveau du rendement, aucune différence significative n'a été observée entre les traitements, mais de façon générale l'irrigation de déficit tendait à diminuer le rendement de 0 à 3 % comparativement à la gestion humide.

La deuxième étude a comparé le risque de salinisation que représente chaque régie d'irrigation. Sur les deux sites où ont eu lieu les expériences, tous les traitements ont montré une augmentation de salinité pendant la saison sans différence significative entre eux. Sur le site 1, les mesures de conductivité électrique ont montré que les pluies hivernales ont été suffisantes pour lessiver l'accumulation de sels provenant de la saison précédente. Cette étude a aussi permis de vérifier que la conductivité électrique de la solution du sol n'était pas appropriée pour suivre la concentration en nitrate dans le sol. En effet, l'ion nitrate contribue très peu dans la conductivité électrique par rapport à d'autres ions naturellement présents dans le sol. La concentration en nitrate devrait donc être suivie par d'autres méthodes de mesure plus directes afin de gérer le risque de contamination des eaux souterraines par les nitrates en production de fraises par irrigation en goutte-à-goutte.

Les résultats des deux études ont donc permis de valider la première hypothèse de recherche. Par contre, la deuxième hypothèse n'a pas pu être confirmée. En effet, très peu de lessivage a été observé dans la régie humide et l'irrigation de déficit n'a pas permis

de gain supplémentaire par rapport à une régie humide. L'accès aux données de potentiel matriciel du sol en temps réel permet un ajustement plus fin du temps d'irrigation de façon à maintenir la tension entre le seuil visé et la capacité au champ afin de limiter le lessivage de l'eau et des nutriments au-delà de la zone racinaire. Le seuil de déclenchement a donc peu d'impact sur le lessivage lorsque les irrigations sont bien gérées par tensiométrie. Toutefois, des événements de pluie abondante peuvent survenir en Californie pendant la période hivernale, comme il fut observé à l'hiver 2014. Dans ces conditions, la régie humide pourrait augmenter le risque de lessivage puisque le potentiel matriciel du sol est maintenu entre -10 et environ -5 kPa, ce qui laisse peu de marge pour absorber ces précipitations. L'irrigation de déficit permettrait donc dans ce cas d'assécher légèrement le sol et pourrait ainsi mieux absorber les événements de pluie abondante pouvant survenir durant cette période et par conséquent, limiter le lessivage.

Par contre, cet asséchement devrait être limité afin d'éviter la compaction des sols sableux (et le ruissellement subséquent) et la formation de craques en sols argileux. En effet, d'autres problèmes ont été observés en asséchant les sols au-delà d'un certain seuil. Le loam sableux avait tendance à s'affaisser et à se compacter, ce qui avait comme conséquence de diminuer l'infiltration de l'eau et de provoquer du ruissellement sur les billons. Les sols à haute teneur en argile, quant à eux, avaient plutôt tendance en s'asséchant à créer des fentes de retrait. Ces fentes de retrait créent des chemins préférentiels et peuvent donc augmenter le lessivage. Ces phénomènes ont été observés sur les sites à l'étude, mais n'ont pas pu être quantifiés. Il serait donc intéressant dans des travaux futurs d'étudier l'impact des régies d'irrigation de déficit sur les propriétés hydrauliques des sols puisque même si l'utilisation d'un seuil plus sec est théoriquement possible en début de saison, il semble y avoir un seuil à ne pas excéder pour éviter de modifier les propriétés hydrauliques du sol. Selon les observations de terrain effectuées lors de ces études, les problèmes semblaient apparaître en asséchant les sols au-delà de -20 à -25 kPa. Dans ce contexte, l'irrigation de déficit pourrait donc être utilisée avec un seuil de déclenchement ajusté entre -10 kPa et -25 kPa.

Finalement, même si les différences de rendement n'ont pas été significatives, ces régies devraient être utilisées avec précaution puisque le fraisier apparaît très sensible au stress hydrique. En effet, d'autres études ont observé une baisse significative du rendement avec l'utilisation de seuil de déclenchement de l'irrigation plus bas que -10 kPa et ont démontré qu' étant donné le prix élevé du produit, une baisse de seulement 2 % du rendement

pouvait avoir un impact financier important. D'autres expériences avec plus de puissance statistique devraient être conduites afin de préciser l'impact d'un déficit hydrique sur le rendement de la fraise.

# Bibliographie

- Ajdary, K., Singh, D. K., Singh, A. K., & Khanna, M. (2007). Modelling of nitrogen leaching from experimental onion field under drip fertigation. *Agricultural Water Management*, 89(1–2), p. 15–28. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.12.014>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. In *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*. [https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/pdf/Allen\\_FAO1998.pdf](https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/pdf/Allen_FAO1998.pdf)
- Ben Jemia, S., Gallichand, J., & Caron, J. (1997). Field water and solute fluxes: Optimizing sampling frequency and calculation procedures. *Transactions of the ASAE*, 40(6), p. 1623–1630. <https://doi.org/10.13031/2013.21427>
- Bergeron, D. (2010). Régie de l'irrigation goutte à goutte dans la production de fraises à jour neutres au Québec (Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Québec), 57 p. <http://hdl.handle.net/20.500.11794/22138>
- Cahn, M., Hartz, T., Smith, R., Noel, B., Johnson, L., & Melton, F. (2015). CropManage: An online decision support tool for irrigation and nutrient management. *Western Nutrient Management Conference Proceedings*, 11, p. 9–15.
- California Department of Water Resources. (2020). *Water Basics - Agriculture*. <https://water.ca.gov/Water-Basics/Agriculture>
- California Drought. (2016). Strong Statewide Conservation Effort in March; Water-Saving Habits Aid in 24.3 Percent Reduction. <http://drought.ca.gov/topstory/top-story-58.html>
- California State Water Board Resources Control. (2019). *Nitrate Project*. [https://www.waterboards.ca.gov/water\\_issues/programs/nitrate\\_project/](https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/nitrate_project/)
- California Strawberry Commission. (2020). *Acreage Survey*. <https://www.calstrawberry.com/en-us/Market-Data/Acreage-Survey>
- Caron, J., Bonin, S., Pepin, S., Kummer, L., Vanderleest, C., & Bland, W. L. (2016). Determination of irrigation set points for cranberries from soil- and plant-based measurements. *Canadian Journal of Soil Science*, 96(1), p. 37–50. <https://doi.org/10.1139/cjss-2015-0037>
- Carter, M. R., & Gregorich, E. G. (2007). Nitrate and Exchangeable Ammonium Nitrogen. In *Soil sampling and methods of analysis* (2<sup>nd</sup> ed.). CRC Press. 1264 p. <https://www.taylorfrancis.com/books/9781420005271>
- Chisholm, H. (1911). Strawberry. In *Encyclopædia Britannica*, Vol. 25 (11<sup>th</sup> ed., p. 1031). Encyclopaedia Britannica Company, Cambridge. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Britannica\\_Wild\\_Strawberry.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Britannica_Wild_Strawberry.png)
- Dahnke, W. C., & Whitney, D. A. (1988). Measurement of soil salinity. *Recommended Chemical Soil Test Procedures for the North Central Region. North Dakota Agric. Exp. Stn. Bull.* p. 32–34.

- Dane, J.H., Hopmans, J.W., (2002a). 3.3.2.3 Pressure Cell, in: *Methods of Soil Analysis Part 4 - Physical Methods*, Soil Science Society of America Book Series. Warren A. Dick, Madison, Wisconsin, USA, p. 684–688.
- Dane, J.H., Hopmans, J.W., (2002b). 3.3.2.4 Pressure Plate Extractor, in: *Methods of Soil Analysis Part 4 - Physical Methods*, Soil Science Society of America Book Series. Warren A. Dick, Madison, Wisconsin, USA, p. 688–690.
- Daugovish, O., Faber, B., & Mochizuki, M. (2011). Drip irrigation for establishment of strawberry transplants in Southern California. *Acta Horticulturae*, 889, p. 507–512.
- El-Farhan, A., & Pritts, M. (1997). Water requirements and water stress in strawberry. *Advances in Strawberry Research*, 16, p. 5–12.  
<http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201302953435>
- FAO. (2015). FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations - Statistics Division. <http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/E>
- FAO. (2020). FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations - Statistics Division. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- Gallichand, J. (2012). *Notes de cours GAE-3002 : Irrigation*. Département des sols et de génie agroalimentaire, Université Laval.
- Gärdenäs, A. I., Hopmans, J. W., Hanson, B. R., & Šimůnek, J. (2005). Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation. *Agricultural Water Management*, 74(3), p. 219–242.  
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.11.011>
- Gardner, W. R. (1958). Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, 85(4), p. 228–232. <https://doi.org/10.1097/00010694-195804000-00006>
- Gardner, W. R. (1970). Flow Through Porous Media. *Soil Science Society of America Journal*, 34(6), iv–iv. <https://doi.org/10.2136/sssaj1970.03615995003400060003x>
- Gendron, L., Létourneau, G., Depardieu, C., Anderson, L., Sauvageau, G., Levallois, R., & Caron, J. (2017). Irrigation management based on soil matric potential improves water use efficiency of field-grown strawberries in California. *Acta Horticulturae*, 1156, p. 191–196. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1156.29>
- Gendron, Laurence, Létourneau, G., Anderson, L., Sauvageau, G., Depardieu, C., Paddock, E., van den Hout, A., Levallois, R., Daugovish, O., Sandoval Solis, S., & Caron, J. (2018). Real-time irrigation: Cost-effectiveness and benefits for water use and productivity of strawberries. *Scientia Horticulturae*, 240(March), p. 468–477. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.06.013>
- Grattan, S. R. (2002). Irrigation Water Salinity and Crop Production. In *ANR Publications*. ISBN: 978-1-60107-244-3. <http://anrcatalog.ucdavis.edu>

- Grattan, S. R., Bowers, W., Dong, A., Snyder, R. L., Carroll, J. J., & George, W. (1998). New crop coefficients estimate water use of vegetables, row crops. *California Agriculture*, 52(1), p. 16–21. <https://doi.org/10.3733/ca.v052n01p16>
- Guimerà, J., Marfà, O., Candela, L., & Serrano, L. (1995). Nitrate leaching and strawberry production under drip irrigation management. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 56(2), p. 121–135. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(95\)00620-6](https://doi.org/10.1016/0167-8809(95)00620-6)
- Hancock, J. F. (1999). *Strawberries*. Crop Production Science in Horticulture, No. 11. CABI Publishing, Wallingford, UK, 237 p.
- Hanson, B., & Bendixen, W. (2004). Drip irrigation evaluated in Santa Maria Valley strawberries. *California Agriculture*, 58(1), p. 48–53. <https://doi.org/10.3733/ca.v058n01p48>
- Hoppula, K. I., & Salo, T. J. (2007). Tensiometer-based irrigation scheduling in perennial strawberry cultivation. *Irrigation Science*, 25(4), p. 401–409. <https://doi.org/10.1007/s00271-006-0055-7>
- ISQ-MAPAQ. (2018). Profil sectoriel de l'industrie horticole au Québec. In MAPAQ. <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/agriculture/profil-horticole2014.pdf>
- Kaulbars, C. (2005). *Commercial strawberry production on the prairies*. Alberta Agriculture, Food and Rural Development (AAFRD), Saskatchewan Agriculture, Food and Rural Revitalization (SAFRR) and Manitoba Agriculture, Food and Rural Initiatives (MAFRI), 86 p.
- Khayyat, M., Khanizadeh, S., Tafazoli, E., Rajaee, S., Kholdebarin, B., & Emam, Y. (2011). Effects of different calcium forms on gas exchange activities, water usage and macronutrient uptake by strawberry plants under sodium chloride stress. *Journal of Plant Nutrition*, 34(3), p. 427–435. <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.536882>
- Kumar, S., & Dey, P. (2012). Influence of soil hydrothermal environment, irrigation regime, and different mulches on the growth and fruit quality of strawberry (*Fragaria × ananassa* L.) plants in a sub-temperate climate. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 87(4), p. 374–380. <https://doi.org/10.1080/14620316.2012.11512879>
- Ledieu, J., De Ridder, P., De Clerck, P., & Dautrebande, S. (1986). A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry. *Journal of Hydrology*, 88(3–4), p. 319–328. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90097-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90097-1)
- Létourneau, G., Caron, J., Anderson, L., & Cormier, J. (2015). Matric potential-based irrigation management of field-grown strawberry: Effects on yield and water use efficiency. *Agricultural Water Management*, 161, p. 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.07.005>
- MAPAQ. (2019). *Portrait-diagnostic sectoriel de l'industrie des fraises et des framboises au Québec*. [https://fraisesetframboisesduquebec.com/wp-content/uploads/2019/04/Portraitdiagnostic-sectoriel-fraises\\_framboises.pdf](https://fraisesetframboisesduquebec.com/wp-content/uploads/2019/04/Portraitdiagnostic-sectoriel-fraises_framboises.pdf)

- Marinov, I., & Marinov, A. M. (2014). A coupled mathematical model to predict the influence of nitrogen fertilization on crop, soil and groundwater quality. *Water Resources Management*, 28(15), p. 5231–5246. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0664-5>
- Périard, Y., Caron, J., Jutras, S., Lafond, J. A., & Houlliot, A. (2012). Irrigation management of Romaine lettuce in Histosols at two spatial scales: water, energy, leaching and yield impacts. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 168, p. 171–188. <https://doi.org/10.2495/SI120151>
- Périard, Y., Caron, J., Lafond, J. A., & Jutras, S. (2015). Root Water Uptake by Romaine Lettuce in a Muck Soil: Linking Tip Burn to Hydric Deficit. *Vadose Zone Journal*, 14(6), p. 1–13. <https://doi.org/10.2136/vzj2014.10.0139>
- PPIC. (2015). *What If California's Drought Continues?* Public Policy Institute of California. [http://www.ppic.org/main/publication\\_quick.asp?i=1160](http://www.ppic.org/main/publication_quick.asp?i=1160)
- Rekika, D., Caron, J., Rancourt, G. T., Lafond, J. A., Gumiere, S. J., Jenni, S., & Gosselin, A. (2014). Optimal irrigation for onion and celery production and spinach seed germination in Histosols. *Agronomy Journal*, 106(2), p. 981–994. <https://doi.org/10.2134/agronj2013.0235>
- Reynolds, W. D., Elrick, D. E., & Young, E. G. (2002). 3.4.2.2 Constant Head Soil Core (tank) Method. In: *Methods of Soil Analysis. Part 4-Physical Methods*. Soil Science Society of America Book Series. Madison, WI, USA, p. 804-809.
- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1(5), p. 318–333. <https://doi.org/10.1063/1.1745010>
- Rioux, J.-A. (2010). *Notes de cours BIO-1904 : Organisation et physiologie des plantes*. Département de phytologie, Université Laval, p. 65–67.
- Romano, N., Hopmans, J. W., & Dane, J. H. (2002). 3.3.2.6 Suction table. In: *Methods of Soil Analysis. Part 4-Physical Methods*. Soil Science Society of America Book Series. Madison, WI, USA, p. 692–698.
- Šimůnek, Jiří, van Genuchten, M. T., & Šejna, M. (2008). Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes. *Vadose Zone Journal*, 7(2), p. 587–600. <https://doi.org/10.2136/vzj2007.0077>
- Šimůnek, Jiří, van Genuchten, M. T., & Wendroth, O. (1998). Parameter estimation analysis of the evaporation method for determining soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*, 62(4), p. 894–905. <https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200040007x>
- Soil Moisture. (1995). *Tempe Cell Pressure - Operating Instructions* (Issue June). [http://www.soilmoisture.com/RESOURCE\\_INSTRUCTIONS-all\\_products/Resource\\_Instructions\\_0898-1400\\_1400\\_Tempe Pressure Cells.pdf](http://www.soilmoisture.com/RESOURCE_INSTRUCTIONS-all_products/Resource_Instructions_0898-1400_1400_Tempe Pressure Cells.pdf)
- Strand, L. L. (1994). *Integrated pest management for strawberries*. University of California Statewide Integrated Pest Management Project, Division of Agriculture and Natural Resource Publication 3351, 142 p.

- Torr, R. (2012). Developing precision irrigation. *International Innovation*, p. 84–87. <http://hortau.com/wp-content/uploads/2014/09/jean-caron-article.pdf>
- UC IPM. (2014). *UC Management Guidelines for Handling Strawberry Transplants on Strawberry*. University of California Agriculture & Natural Resources. <http://www.ipm.ucdavis.edu/PMG/r734900511.html>
- US Climate Data. (2015). *Climate California - temperature, rainfall and average*. US Climate Data. <http://www.usclimatedata.com/climate/california/united-states/3174>
- USDA. (2020). *USDA - National Agricultural Statistics Service - Statistics by Subject Results*. [https://www.nass.usda.gov/Statistics\\_by\\_Subject/result.php?61FBCD69-1E77-382E-BBF2-444D6C72A325&sector=CROPS&group=FRUIT%26TREE\\_NUTS&comm=STRAWBERRIES](https://www.nass.usda.gov/Statistics_by_Subject/result.php?61FBCD69-1E77-382E-BBF2-444D6C72A325&sector=CROPS&group=FRUIT%26TREE_NUTS&comm=STRAWBERRIES)
- van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), p. 892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- van Lier, Q. de J., Metselaar, K., & van Dam, J. C. (2006). Root water extraction and limiting soil hydraulic conditions estimated by numerical simulation. *Vadose Zone Journal*, 5(4), p. 1264–1277. <https://doi.org/10.2136/vzj2006.0056>
- Vázquez, N., Pardo, A., Suso, M. L., & Quemada, M. (2006). Drainage and nitrate leaching under processing tomato growth with drip irrigation and plastic mulching. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 112(4), p. 313–323. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.07.009>
- Visconti, F., J.M., & Rubio, J. L. (2010). An empirical equation to calculate soil solution electrical conductivity at 25°C from major ion concentrations. *European Journal of Soil Science*, 61(6), p. 980–993. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01284.x>
- Warrick, A. W. (2003). *Soil Water Dynamics*. Oxford University Press, 416 p.
- Yuan, B. Z., Sun, J., & Nishiyama, S. (2004). Effect of drip irrigation on strawberry growth and yield inside a plastic greenhouse. *Biosystems Engineering*, 87(2), p. 237–245. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.10.014>