

Prime-Vert 2013-2018

Optimisation de l'irrigation par une caractérisation physique précise des sols-II

Rapport final
Synthèse des résultats

Rapport présenté au :
Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et
de l'Alimentation du Québec (MAPAQ)

irda INSTITUT DE RECHERCHE
ET DE DÉVELOPPEMENT
EN AGROENVIRONNEMENT

Québec 

Rédigé par :

Jérémie Vallée, agr.
Daniel Bergeron, agr., M.Sc.
Carl Boivin, agr., M.Sc.

Mars 2016

L'IRDA a été constituée en mars 1998 par quatre membres fondateurs, soit le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), l'Union des producteurs agricoles (UPA), le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) et le ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche, de la Science et de la Technologie (MESRST).



Notre mission

L'IRDA a pour mission de réaliser des activités de recherche, de développement et de transfert en agroenvironnement visant à favoriser l'innovation en agriculture, dans une perspective de développement durable

Pour en savoir plus

www.irda.qc.ca

Ce projet a été réalisé en vertu du volet 3 du programme Prime-Vert 2013-2018 et il a bénéficié d'une aide financière du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ).



Équipe de réalisation du projet

IRDA	Carl Boivin, agr., M.Sc. Jérémy Vallée, agr. Stéphane Nadon, t.a.
DRCN du MAPAQ	Daniel Bergeron, agr., M.Sc. Jérôme Carrier, t.a.
Entreprises participantes	Ferme des Pionniers Ferme Jean Pierre Plante et fils Polyculture Plante 1987 Ferme ACL Ferme Victorin-Drolet Ferme Maurice et Philippe Vaillancourt Ferme Avicole Orléans Fraisière Faucher Ferme aux Petits fruits Ferme David et Richard Blais Ferme Emmanuel Lemelin Ferme André Blouin Ferme François Gosselin

Les lecteurs qui souhaitent commenter ce rapport peuvent s'adresser à :

Carl Boivin
Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)
2700, rue Einstein
Québec, (Québec) G1P 3W8

Téléphone : 418 643-2380, poste 430
Télécopie : 418 644-6855
carl.boivin@irda.qc.ca

Le rapport peut être cité comme suit :

Vallée, J., D. Bergeron et C. Boivin. 2016. Optimisation de l'irrigation par une caractérisation physique précise des sols-II, Rapport final - Synthèse des résultats. IRDA, 47 p.

Table des matières

Table des matières.....	iv
Liste des figures	v
Liste des tableaux.....	vi
Avis au lecteur et limites du rapport.....	1
Mise en contexte	1
Description du projet.....	4
1 Objectif général.....	5
1.1 Objectifs spécifiques.....	5
Synthèse des résultats et analyses	6
2 Caractéristiques des sites à l'étude	6
2.1 Texture, matière organique et résidus.....	6
2.2 Courbe de désorption en eau	8
2.3 Détermination de la capacité au champ.....	9
3 Feuillet informatif.....	9
4 Hauteur d'eau de pluie potentiellement valorisable par la culture (HEPPVC) - deux cas dans la pomme de terre	10
5 Régie d'irrigation – Tensiomètre	13
5.1 Le suivi de l'irrigation	14
4.1.1 Verger de pommiers en établissement	14
4.1.2 Fraisières à jours neutres	19
4.1.3 Pommes de terre.....	20
4.3 Les limites de l'utilisation d'outils sans fil.....	21
6 Régie d'irrigation - Évapotranspiration	23
6.1 Durée des irrigations et quantités d'eau appliquées par goutte à goutte	25
6.2 Estimation du volume de sol à la portée du système d'irrigation.....	26
6.2.1 Exemple pour un sol donné.....	26
6.3 Irrigation pulsée.....	31
6.3.1 Durée et volume d'irrigation.....	35
Conclusion	37
Références.....	38
Annexes :	41
6.4 Évapotranspiration potentielle.....	41
6.5 Pluviométrie.....	44
6.6 <i>Hebdeau</i>	45

Liste des figures

Figure 1. Proportion de la matière organique du sol (%) échantillonnée selon le site et l'année.....	7
Figure 2. Proportion de fragments grossiers (%) présents dans les échantillons non perturbés selon le site et l'année.....	8
Figure 3. Réserve en eau facilement utilisable (RFU, exprimée en mm d'eau disponible) selon le site et l'année.....	9
Figure 4. HEPPVC (mm) au site 1, saison 2014.....	11
Figure 5. HEPPVC (mm) au site 2, saison 2015.....	11
Figure 6. HEPPVC au site 1, saison 2015.....	12
Figure 7. HEPPVC au site 2, saison 2015.....	13
Figure 8. Temps relatif (%) où le potentiel matriciel était inférieur au point de consigne (sol plus sec) et nombre de jours de mesure selon le site et l'année.....	14
Figure 9. Piézomètre installé pour suivre l'évolution de la hauteur de la nappe d'eau.....	15
Figure 10. Suivi tensiométrique du potentiel matriciel à 20 et 40 cm (kPa), de l'irrigation et de la pluviométrie (mm), verger de pommiers (site 13), saison 2013.....	16
Figure 11. Suivi tensiométrique du potentiel matriciel à 20 et 40 cm (kPa), de la teneur en eau volumique (cm^3 eau / 100 cm^3 sol), de l'irrigation et de la pluviométrie (mm), verger de pommiers (site 13), saison 2014.....	17
Figure 12. Suivi tensiométrique du potentiel matriciel à 20 et 40 cm (kPa), de la teneur en eau volumique (cm^3 eau / 100 cm^3 sol) et de la pluviométrie (mm), verger de pommiers (site 13), saison 2015.....	18
Figure 13. Exemple d'assèchement en surface.....	19
Figure 14. Exemple d'assèchement en profondeur.....	20
Figure 15. Exemple d'une durée d'irrigation idéale en aspersion.....	21
Figure 16. Tensiomètre installé dans une section de champ de fraise à jours neutres aux prises avec des mauvaises herbes.....	22
Figure 17. Tensiomètre installé dans une section qui ne représente pas la vigueur des plants du reste du champ.....	22
Figure 18. Évapotranspiration réelle (ET_c , mm) en fonction de l'évapotranspiration potentielle (ET_o , mm).....	24
Figure 19. Cône d'humectation représentant la zone de sol à portée d'un goutteur.....	27
Figure 20. Évolution du potentiel matriciel (kPa) à deux profondeurs (cm) ainsi que les irrigations réalisées au cours de la journée du 16 août 2015.....	32
Figure 21. Évolution du potentiel matriciel (kPa) à deux profondeurs (cm) ainsi que les irrigations réalisées au cours de la journée du 20 août 2015.....	33
Figure 22. Évolution du potentiel matriciel (kPa) à deux profondeurs (cm) ainsi que les irrigations réalisées au cours de la journée du 20 août 2015.....	34
Figure 23. Évolution cumulative de l'évapotranspiration (mm) et des irrigations (mm/ha) ainsi que la pluviométrie (mm) du 2 au 29 août 2015.....	36
Figure 24. Évapotranspiration potentielle mesurée au cours de la saison 2013 aux sites de Saint-Laurent-de-l'Île-d'Orléans (site 10,11).....	41

Figure 25. Évapotranspiration potentielle mesurée au cours de la saison 2014 aux sites de Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier (site 3) et Saint-Laurent-de-l'Île-d'Orléans (site 4, site 11). .. 42

Figure 26. Évapotranspiration potentielle mesurée au cours de la saison 2015 aux sites de Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier (site 3) et Saint-Laurent-de-l'Île-d'Orléans (site 4)..... 43

Liste des tableaux

Tableau 1. Dénombrement des sites selon la texture prédominante et l'année d'échantillonnage..... 6

Tableau 2. Estimation de durées d'irrigation (minutes) nécessaires pour combler la demande d'évapotranspiration à pleine maturité. 25

Tableau 3. Équivalent en hauteur d'eau disponible (mm), volume d'eau irrigable (ml) ainsi que le temps nécessaire pour combler le volume irrigable (minutes) par goutteur selon le potentiel matriciel du sol (kPa) pour le sol utilisé en exemple. 27

Tableau 4. Exemple de tableau présentant la proportion du volume d'eau irrigable pour combler la demande en évapotranspiration (%) selon le potentiel matriciel actuel (kPa) et la prévision d'évapotranspiration (mm) avec un système d'irrigation appliquant 2,2 mm/heure à une efficacité de 95 % pour le sol utilisé en exemple. 29

Tableau 5. Exemple de tableau présentant le temps d'irrigation (minutes) pour maintenir le potentiel matriciel à -3 kPa selon le potentiel matriciel actuel et les prévisions d'évapotranspiration (mm) avec un système d'irrigation appliquant 2,2 mm/heure à une efficacité de 95 % pour le sol utilisé en exemple. 30

Tableau 6. Consigne de fonctionnement pour l'irrigation pulsée..... 31

Tableau 7. Temps relatif (%) selon la régie d'irrigation utilisée et la profondeur du tensiomètre (cm) où le potentiel matriciel se situait hors des limites prescrites, 1^{er} au 29 août 2015..... 34

Tableau 8. Nombre d'épisode d'irrigation et temps d'irrigation total (minutes) selon les régies d'irrigation à l'essai du 2 au 29 août 2015. 35

Avis au lecteur et limites du rapport

Certaines analyses effectuées dans le présent rapport se basent sur des exemples concrets de système d'irrigation et pourraient ne pas représenter les performances techniques normalement observées. Ainsi, il est important de mentionner que certaines démonstrations restent théoriques et qu'il est déconseillé d'utiliser ces démonstrations sans une validation pratique des concepts. Malgré toute l'attention portée au document, il est possible que certaines erreurs ou omissions puissent être encore présentes.

Mise en contexte

L'irrigation est de plus en plus utilisée en horticulture au Québec. La région de la Capitale-Nationale ne fait pas exception à ce phénomène. Les producteurs ont investi des sommes importantes pour des systèmes d'irrigation adaptés aux cultures afin d'utiliser l'eau le plus efficacement possible : goutte à goutte, rampes ou pivots à basse pression, etc.

Qualité, rendement et stabilité des volumes offerts figurent parmi les avantages recherchés pour conserver et développer des parts de marché. Toutefois, l'irrigation peut aussi présenter des effets négatifs tant agronomiques (diminution de la qualité du produit, gaspillage de l'eau, etc.), environnementaux (contamination des eaux par le nitrate et les pesticides) que financiers (diminution de la marge bénéficiaire et de la compétitivité, etc.) si elle ne fait l'objet d'une régie raisonnée. En ce sens, les nombreux projets de recherche et le suivi sur le terrain réalisés, depuis plusieurs années, démontrent qu'une grande évolution s'est orchestrée dans ce domaine depuis le début des années 1990.

L'irrigation par goutte à goutte

Au Québec, le premier système d'irrigation goutte a été implanté en 1979 dans des vergers de pommiers dans la région de Saint-Antoine-Abbé (Shady, 1989). Dans la région de Québec, son utilisation a été notée à la fin des années 1980 et on comptait en 1991 trois utilisateurs pour une superficie d'environ 4 hectares et en 2003 environ 245 hectares chez 35 entreprises (Bergeron, 2003). Aujourd'hui, plusieurs cultures bénéficient de cette technique dans la région : fraise, framboise, bleuet, légumes divers (concombre, piment, tomate, chou, etc.) et même les pommiers sont maintenant irrigués par goutte à goutte.

Au début, les irrigations étaient basées sur des recommandations préétablies et étaient peu fréquentes (ex. 2 à 3 fois par semaine) et de longue durée (ex. 3 à 4 heures) (Bergeron et Noreau, 2006a). Dans une optique d'optimisation de l'eau, cette régie était mal adaptée et reposait sur une méconnaissance du mouvement dans le sol. Des projets en vue de connaître la dynamique de l'eau dans le sol ont alors été entrepris avec l'excellente collaboration de monsieur Jean Caron, Ph. D., agr., professeur à l'Université Laval. Des sondes TDR disposées à l'horizontale dans le profil de sol ont alors permis d'analyser de façon précise le déplacement de l'eau dans le sol suite aux irrigations dans de nombreuses cultures (piment, fraise, bleuet, pomme de terre, etc.).

Les résultats obtenus lors des projets réalisés ont démontré qu'avec la régie en place au début, une grande proportion de l'eau appliquée se retrouvait sous la zone racinaire. En plus de provoquer des pertes d'eau, cela représentait un risque de pollution par le lessivage du nitrate (Bergeron, 2001a; Bergeron, 2001b). Cette constatation a été bien comprise de la part des producteurs qui ont alors modifié leur régie et opté pour des irrigations plus fréquentes et de plus courtes durées (ex. max. 90 minutes / épisode). Aussi, l'utilisation d'outils de régie est devenue plus courante à ce moment (Gosselin et coll., 2006).

L'utilisation d'outils comme les sondes TDR ont donc permis de modifier de façon marquée la durée et la fréquence des irrigations chez les entreprises de la région. Ces outils étaient toutefois peu adaptés à la régie d'irrigation au jour le jour pour les producteurs. Des essais ont donc été entrepris en ce sens avec divers outils et c'est le tensiomètre qui s'est avéré le plus performant et approprié aux besoins des entreprises (Bergeron, 2004). La régie d'irrigation impliquait alors l'utilisation de tensiomètres par paire : un situé dans la zone racinaire pour indiquer le moment optimal du déclenchement de l'irrigation et un autre au bas de la zone racinaire pour préciser la durée maximale de l'irrigation (Bergeron et Boivin, 2005). Il restait alors à préciser à quelle consigne de déclenchement l'irrigation devait débuter et quelle quantité d'eau pouvait être appliquée pour les cultures et les sols concernés.

Plusieurs projets ont été effectués dans le but de déterminer les consignes de déclenchement. Dans la fraise par exemple, la consigne a pu être déterminée en sol graveleux à l'île d'Orléans (Bergeron, 2010). Létourneau et coll. (2015) ont par la suite déterminé, de façon plus précise, la consigne en pareille situation. Quant aux durées d'irrigation, des périodes de 45 ou 60 minutes sont encore trop longues en sol drainant (Bergeron, 2010). L'assèchement du sol en bordure de la butte et le mouvement plutôt à la verticale de l'eau d'irrigation ont également été observés par Bergeron (2010) et Boivin et Deschênes (2011).

Il ressort des différents projets que la détermination d'une consigne repose sur plusieurs facteurs, dont une connaissance précise des propriétés physiques du sol en présence (ex. réserve en eau utile) et que la durée optimale des irrigations pouvait être encore diminuée (sous les 45 minutes) dans bien des cas.

La détermination de la réserve en eau utile du sol est la base de toute approche de régie. Auparavant, des notions élémentaires de capacité au champ (-33 kPa), points de flétrissement temporaire (-100 kPa) et permanent (-1 500 kPa) permettaient d'établir les bases de la régie de l'irrigation en ce qui a trait au moment d'irriguer et à la quantité d'eau à appliquer. À la lumière des résultats obtenus lors de nombreux projets de régie réalisés au cours des dernières années dans la région, la nécessité de préciser davantage certaines caractéristiques physiques des sols était devenue incontournable afin d'obtenir une régie optimale de l'eau. Une courbe de désorption beaucoup plus précise du sol (relation entre la teneur en eau et la tension du sol) devait donc être établie, ajoutant ainsi beaucoup de précision sur la réserve effective en eau et les quantités réelles d'eau pouvant être apportées par irrigation (Bonin, 2009; Bergeron, 2010). Ainsi, les risques de migration de l'eau hors de la zone racinaire et de lessivage des fertilisants et des pesticides vers la nappe phréatique s'en trouvent diminués.

La courbe de désorption du sol est un exemple de raffinement afin de déterminer sa réserve en eau utile à des tensions inférieures à 33 kPa. La proportion de fragments grossiers (particules de diamètre supérieur à 2 mm) et la densité volumique apparente sont également des données de base essentielles à considérer.

L'irrigation par aspersion

L'utilisation de l'irrigation par aspersion a connu elle aussi une progression importante au cours des dernières années dans la région. La pomme de terre représente la plus grande superficie irriguée régionalement et la tendance est similaire à celle du Québec, où l'augmentation des surfaces irrigables en pomme de terre a progressé de 77 % entre 1999 et 2015 (Boivin et Bergeron, 2015).

Les systèmes utilisés sont les asperseurs sur rampes mobiles, canons enrouleurs, rampes avec enrouleurs et pivots à basse pression. Tout comme avec le goutte à goutte, une régie non raisonnée peut conduire à une faible efficacité de l'utilisation de l'eau et représenter un risque pour l'environnement (Bonin, 2009; Boivin et Deschênes, 2011). Ce raisonnement sera basé entre autres sur certaines propriétés physiques du sol comme la courbe de désorption à des tensions comprises entre 0 et 100 kPa, la proportion de fragments grossiers et la densité volumique apparente.

Des essais pour analyser le mouvement de l'eau dans le sol lors des irrigations ont également été effectués de concert avec l'utilisation de tensiomètres (Bergeron et coll., 2006). Les tensiomètres se doivent d'être utilisés par paire de la même façon qu'avec le goutte à goutte. La détermination du nombre optimal de tensiomètres par unité de surface et la relation existant entre les patrons d'humidité du sol et les rendements pour la pomme de terre en sol sableux ont été effectuées par Boivin et coll. (2008).

La consigne (tension) de déclenchement des irrigations en pomme de terre ainsi que les périodes de croissance optimales ont été analysées lors de plusieurs projets (Boivin et Landry, 2008; Landry et coll., 2014; Landry et Boivin, 2014; Vallée et coll. 2014).

Malgré le fait que plusieurs entreprises aient modifié de façon importante leur régie au cours des dernières années, une amélioration est toujours possible, en considérant les tout derniers développements dans le domaine.

Description du projet

Afin de mesurer plus adéquatement les techniques à l'essai et en favoriser plus rapidement l'adoption, un groupe de 13 entreprises a été formé en 2012. Ces entreprises ont été ciblées en tenant compte du type d'irrigation qu'elles utilisent (aspersion et goutte à goutte) et de leur culture (fraise, bleuet, pomme, tomate, poivron, pomme de terre).

Le projet visait donc dans un premier temps à préciser certaines caractéristiques physiques du sol. La texture du sol a donc été effectuée afin de déterminer la classe texturale, en considérant en plus la proportion de fragments grossiers. Les réserves en eau utile à l'aide d'une courbe de désorption ont été établies en laboratoire en considérant de nombreux points de tension à des valeurs additionnelles à celles mesurées habituellement (ex. : 2, 5, 7, 10, 15, 20, 33, 40, 50 et 100 et 1500 kPa).

Dès 2013, le suivi en continu de l'humidité du sol à l'aide de tensiomètres à transmission sans fil (Hortau, Lévis, Canada) a permis d'analyser la régie effectuée par les producteurs et de recommander des modifications à mettre en place afin d'optimiser l'utilisation de l'eau. Des valeurs de capacité au champ *in situ* ont également été établies à l'aide des tensiomètres et à partir de cette valeur et celles de la courbe de désorption, il a été possible de déterminer la capacité réelle de rétention des sols et ainsi d'établir une régie d'irrigation basée sur ces paramètres.

Une formation de base des concepts a été fournie aux participants au cours de l'hiver 2012. Les résultats et les appréciations des utilisateurs ont été présentés à l'hiver 2013 à d'autres entreprises horticoles de la région.

Le projet s'est poursuivi en 2014 et en 2015 en y ajoutant d'autres formations pour les participants et les conseillers qui interviennent auprès des producteurs concernés afin que les résultats puissent profiter au plus grand nombre de producteurs possible.

En 2014 et 2015, une approche de gestion de l'irrigation qui repose sur l'évapotranspiration a été intégrée au projet. Cet ajout a permis de bonifier la démarche entreprise auprès des producteurs. Pour ce faire, trois stations météorologiques complètes permettant de calculer, en temps réel, l'évapotranspiration ont été installées. Les valeurs d'évapotranspiration, mises à jour quotidiennement, ont été transmises aux producteurs et intervenants via une chronique hebdomadaire. De plus, des prévisions d'évapotranspiration ont été fournies aux producteurs afin qu'ils prévoient et ajustent leurs irrigations selon les besoins. Cette chronique hebdomadaire a également été un bon moyen de diffuser de l'information pertinente sur l'irrigation et de transmettre certains résultats du projet.

Aussi, les résultats obtenus ont démontré que même avec la meilleure des consignes d'irrigation, la bonne façon d'utiliser les systèmes demeure un facteur primordial à considérer. Les pressions d'opération et l'espacement entre les asperseurs par exemple sont des paramètres importants à respecter pour obtenir une bonne uniformité de l'irrigation et un impact positif sur les rendements et l'environnement (Bergeron et Noreau, 2006b). Ainsi, nous avons réalisé un projet spécifique en parallèle sur l'analyse de la performance des systèmes d'irrigation goutte à goutte et par aspersion (Nadon et coll., 2016).

1 Objectif général

Le projet avait pour objectif principal d'améliorer la gestion de l'irrigation par goutte à goutte et par aspersion chez les entreprises horticoles de la région de la Capitale-Nationale.

1.1 Objectifs spécifiques

- Une connaissance approfondie de la part des utilisateurs des propriétés physiques des sols;
- Une plus grande utilisation d'outils de régie comme les tensiomètres;
- Une meilleure connaissance de la dynamique de l'eau dans le sol lors des irrigations;
- Une évaluation précise de la régie mise en place par les producteurs ;
- La mise en place d'une régie optimale de l'irrigation.
- Mise en place d'un feuillet informatif hebdomadaire visant à informer les producteurs sur différents sujets reliés à l'irrigation et sur l'état hydrique de parcelles phares afin de guider les utilisateurs sur les tendances régionales.

Synthèse des résultats et analyses

2 Caractéristiques des sites à l'étude

Pour chacune des entreprises participantes, situées dans la MRC de l'Île d'Orléans et de Portneuf, des champs représentatifs des sols présents sur ces dernières ont été caractérisés. Pour ce faire, des échantillons de sol non perturbés ont été prélevés au moyen de cylindres de cuivre, et ce, jusqu'à des profondeurs atteignant 30 cm.

2.1 Texture, matière organique et résidus

De 2013 à 2015, la caractérisation des sites expérimentaux a été effectuée sur l'horizon 0 à 30 cm. Certains paramètres physiques des sols ont été mesurés tels la texture, la matière organique, ainsi que le contenu en fragments grossiers (particules avec un diamètre > 2 mm). La texture du sol été déterminée grâce aux analyses granulométriques effectuées en laboratoire et elle est présentée au Tableau 1. Les textures rencontrées durant le projet allaient du sable au loam argileux. Le loam argileux est la texture qui a été la plus rencontrée avec huit sites d'essai.

Tableau 1. Dénombrement des sites selon la texture prédominante et l'année d'échantillonnage.

Texture prédominante	Année			
	2013	2014	2015	Total
Sable	2	2	1	5
Sable loameux	2	2	3	7
Loam sableux	2	2	0	4
Loam	2	1	0	3
Loam sablo-argileux	1	1	1	3
Loam argileux	4	3	4	11

La matière organique et les fragments grossiers sont également présentés aux Figure 1 et Figure 2. La proportion des échantillons contenant des fragments grossiers est un élément important à considérer lors de la caractérisation du sol. Il est d'abord important de noter que par convention, la granulométrie qui sert à classer un sol selon sa texture (ex. loam argileux) est toujours effectuée avec du sol qui été préalablement tamisé pour enlever les particules ayant un diamètre de 2 mm et plus. La texture qui est ensuite déterminée à l'aide de l'abaque des classes texturales ne tient donc pas compte de la proportion de fragments grossiers du sol original (CRAAQ, 2010). Une bonne pratique est donc de demander au laboratoire qui effectue la granulométrie de fournir également la proportion de fragments grossiers de 2 mm et plus qui a été rejetée au départ. Cette valeur peut s'avérer un premier indicateur pour évaluer la dynamique de l'eau dans le sol. Un contenu important en fragments grossiers affectera négativement la capacité de rétention en eau du sol, car les fragments grossiers, composés principalement d'agrégats rocheux, ne retiennent pas l'eau et ne permettent pas de créer une porosité assez fine pour l'emprisonner. À texture équivalente, le comportement d'un sol contenant de grandes proportions de fragments grossiers s'apparentera davantage à un sol plus grossier. De plus, le drainage des sols sera plus rapide tandis que le déplacement latéral de l'eau sera moins important. Ainsi, un loam argileux

contenant des proportions importantes de fragments grossiers pourrait se comporter davantage comme un sable (Bergeron, 2010). L'évaluation de la fertilité du sol devra également tenir de ce paramètre (CRAAQ, 2010).

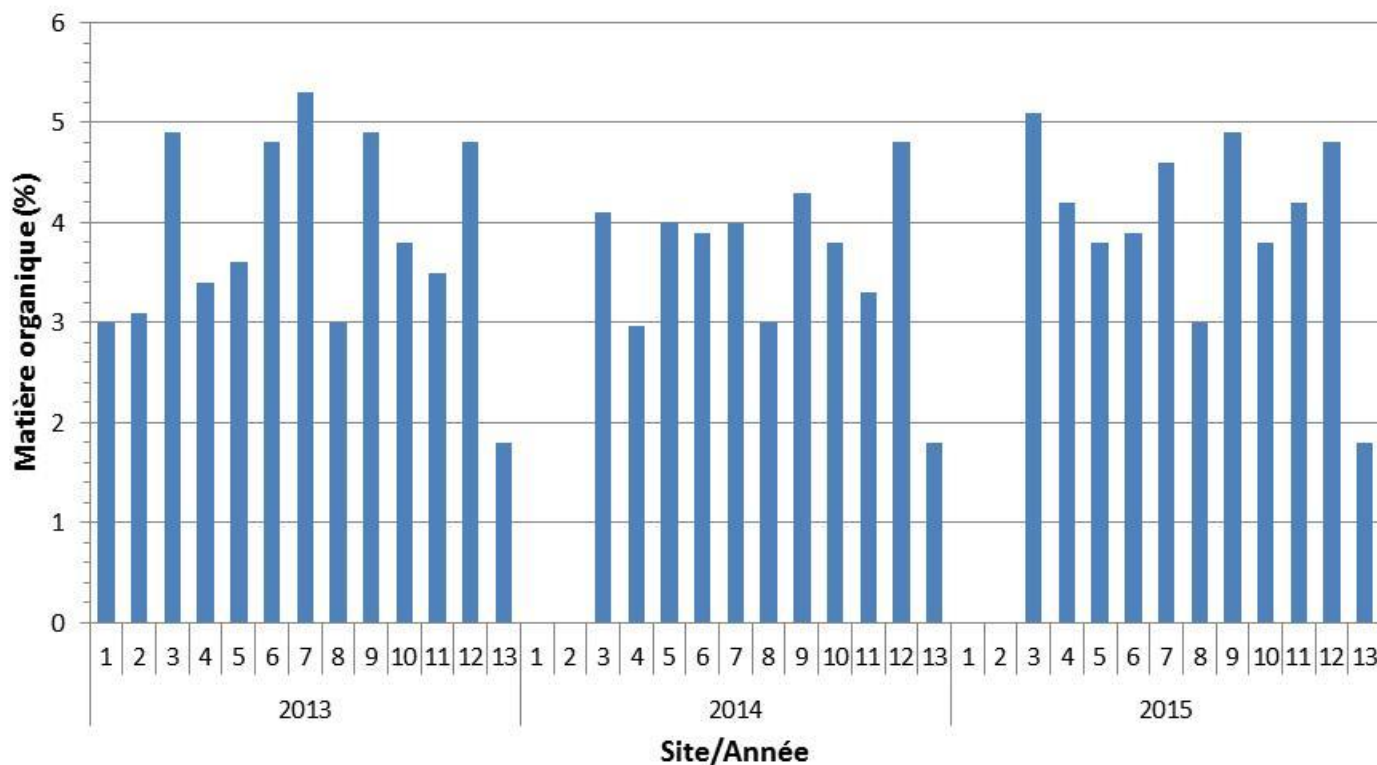


Figure 1. Teneur en matière organique du sol (%) échantillonnée selon le site et l'année.

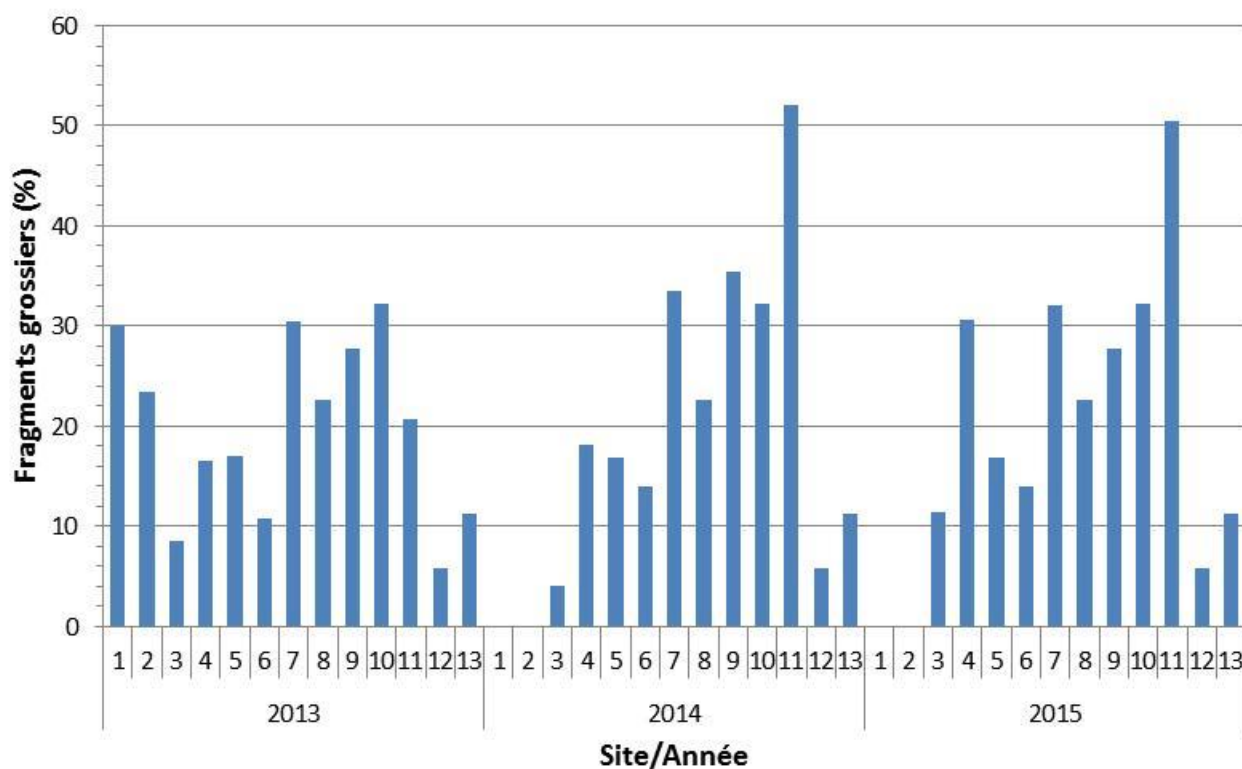


Figure 2. Proportion de fragments grossiers (%) présents dans les échantillons non perturbés selon le site et l'année.

2.2 Courbe de désorption en eau

Grâce aux échantillons de sols non perturbés, des courbes de désorption en eau des sols ont été réalisées suivant la méthode décrite par Topp et coll. (1993) à deux profondeurs différentes (0-15 cm et 15-30 cm) et sont présentées à la Figure 3. La réserve facilement utilisable pour 30 cm de sol a ainsi varié entre 7 et 36 mm. Il existe donc un grand éventail de capacité de rétention en eau des sols. La courbe de désorption en eau du sol exprime la relation entre la teneur en eau volumique d'un sol et le potentiel matriciel. Cette courbe est différente pour chaque sol et varie non seulement selon la texture, mais aussi selon la quantité et le type de matière organique et la grosseur et l'organisation spatiale des pores d'un sol. Il serait donc hasardeux d'établir une régie à partir de valeurs contenues dans la littérature, celles-ci étant des moyennes établies en fonction de la classe texturale seulement. L'information obtenue de ces courbes permet de mieux comprendre la dynamique de l'eau dans un sol et aide à élaborer une régie adéquate de l'irrigation notamment par le calcul de la réserve utile en eau du sol et de l'estimation de la capacité au champ.

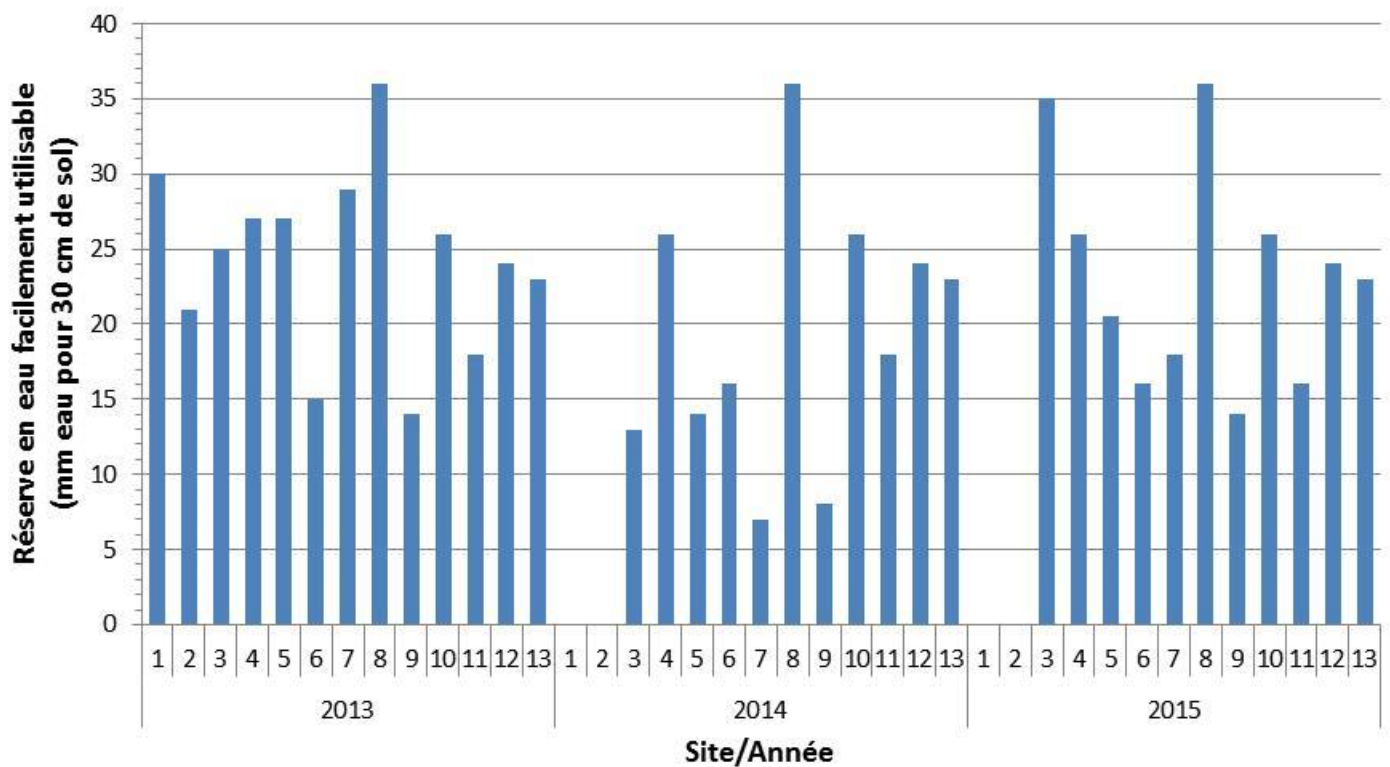


Figure 3. Réserve en eau facilement utilisable (RFU, exprimée en mm d'eau disponible) selon le site et l'année.

2.3 Détermination de la capacité au champ

La capacité au champ correspond au potentiel matriciel ou à la teneur en eau volumique d'un sol, 24 à 48 heures après un événement saturant complètement les pores du sol avec de l'eau. Entre la capacité au champ et le point de saturation, la force d'adhésion entre l'eau et les particules de sols est plus faible que la force gravitationnelle. Conséquemment, l'eau ne peut être retenue par le sol et un drainage en profondeur de l'eau s'exerce. En irrigation, la capacité au champ est le point d'arrêt de l'irrigation. Au-delà de ce point, le surplus d'eau est drainé et entraîne des risques de lessivages des éléments nutritifs. De plus, il est possible que le surplus d'eau présent dans le sol crée dans conditions anoxiques, néfastes pour la productivité des cultures. Le point de capacité au champ est donc un élément crucial dans l'établissement de bonne consigne d'irrigation et de bonne gestion de l'eau. Une valeur de capacité au champ spécifique à chacun des sites a été établie *in situ* à l'aide de l'analyse des mesures effectuées par les tensiomètres. Pour l'ensemble des sites à l'étude, la capacité au champ *in situ* s'est située entre -2,5 et -5 kPa. Ces valeurs ont ensuite servi à établir la RFU présentée précédemment.

3 Feuille informatif

La mise en place d'un feuille informatif visant à informer les producteurs sur différents sujets liés à l'irrigation et sur l'état hydrique de parcelles phares afin de guider les utilisateurs sur les tendances régionales a été réalisée en 2014 et 2015. Le feuille informatif intitulé *Hebdeau* a été publié de manière hebdomadaire et à certaines périodes de l'année de manière bihebdomadaire. Au total, 12 numéros en 2014 et 13 numéros en 2015 ont été partagés aux collaborateurs du projet dont un exemple est présenté à la section 6.6.

Des informations générales sur les températures minimale et maximale, la pluviométrie, l' ET_p et ET_r étaient consignées dans les feuillets. Chaque semaine, un historique de sept jours était fait pour les trois sites où les stations météorologiques avaient été installées. Ces sites constituaient des « parcelles phares » où un suivi du stade phénologique était également réalisé. Cela permettait de proposer des coefficients culturaux à utiliser pour la production de fraises à jours neutres et de pommes de terre. Le suivi de la tensiométrie et du bilan hydrique ont aussi fait l'objet de parutions. Des récapitulatifs mensuels et saisonniers ont été réalisés. De plus, l'*Hebdeau* était un canal intéressant à utiliser pour transmettre des informations générales en lien à l'irrigation. Conjointement aux parutions de l'*Hebdeau*, une page Facebook a été créée pour transmettre, de manière quotidienne, les valeurs d' ET_p , de pluviométrie et de température.

4 Hauteur d'eau de pluie potentiellement valorisable par la culture (HEPPVC) - deux cas dans la pomme de terre

Une régie raisonnée de l'irrigation doit considérer les volumes d'eau des précipitations. Cependant, la quantité d'eau de pluie disponible pour la culture ne correspond pas nécessairement à celle tombée du ciel. La texture et la structure du sol ainsi que son statut hydrique lors des apports en eau peuvent diminuer grandement la hauteur d'eau de pluie potentiellement valorisable par la culture (HEPPVC). Concrètement, il est possible d'utiliser le bilan hydrique et la réserve facilement utilisable en eau pour estimer l'HEPPVC. La HEPPVC a donc été mesurée sur deux sites en pomme de terre en 2014 et 2015.

La HEPPVC pour le site 1 en 2014 est présentée à la Figure 4. Pour ce site, l'évapotranspiration potentielle (ET_p) a atteint près de 283 mm entre le 20 juin et le 1^{er} septembre 2014. L'évapotranspiration réelle (ET_r) de la culture de pomme de terre durant la même période a également atteint 283 mm. La similitude de ces deux valeurs s'explique en analysant les coefficients culturaux utilisés au cours de l'été (moyenne au cours de l'été à 1). La pluviométrie totale mesurée à la ferme a avoisiné les 345 mm, soit près de 60 mm de plus que les besoins estimés de la culture (ET_r). La hauteur d'eau de pluie potentiellement valorisable par la culture est un concept qui vise à évaluer la quantité de pluie qui a pu être conservée dans le sol et potentiellement utilisée par la culture. La HEPPVC a ainsi été calculée en fonction du bilan hydrique fournie par la station météorologique installée à la ferme. Elle a atteint respectivement près de 166 mm et 205 mm avec et sans irrigation, soit 48,4 % et 59,9 % de la pluviométrie totale. Autrement dit, bien que les irrigations aient permis de maintenir le sol plus humide, cela a joué en défaveur de la HEPPVC. De plus, grâce à la valeur de la HEPPVC, il est possible de savoir si les précipitations totales ont été suffisantes pour combler les besoins des cultures. Ainsi, le bilan indique que même avec des précipitations supérieures à l'évapotranspiration réelle, celles-ci n'auraient pas été en mesure de satisfaire les besoins de la culture. L'écart entre l' ET_r et la HEPPVC sans irrigation s'élève à plus de 88 mm. Théoriquement, l'apport en eau d'irrigation nécessaire pour combler les besoins en eau de la culture devrait atteindre ni plus ni moins que 88 mm. Or, la situation est quelque peu différente, car un déficit hydrique de 28 mm a persisté malgré les irrigations qui ont totalisé 127 mm. Cela veut donc dire qu'une certaine partie des irrigations n'ont pas eu lieu au bon moment et qu'elles ont fourni une quantité d'eau trop importante. À cet effet, le dernier épisode d'irrigation a totalisé 38 mm, soit plus de 1,5 fois la capacité de rétention en eau du sol pour 30 cm de sol. Il faut toutefois noter qu'à ce niveau, les hauteurs d'eau considérées sont des quantités brutes d'application. Bien évidemment, une certaine proportion de l'eau ne s'est jamais vraiment infiltrée dans le sol.

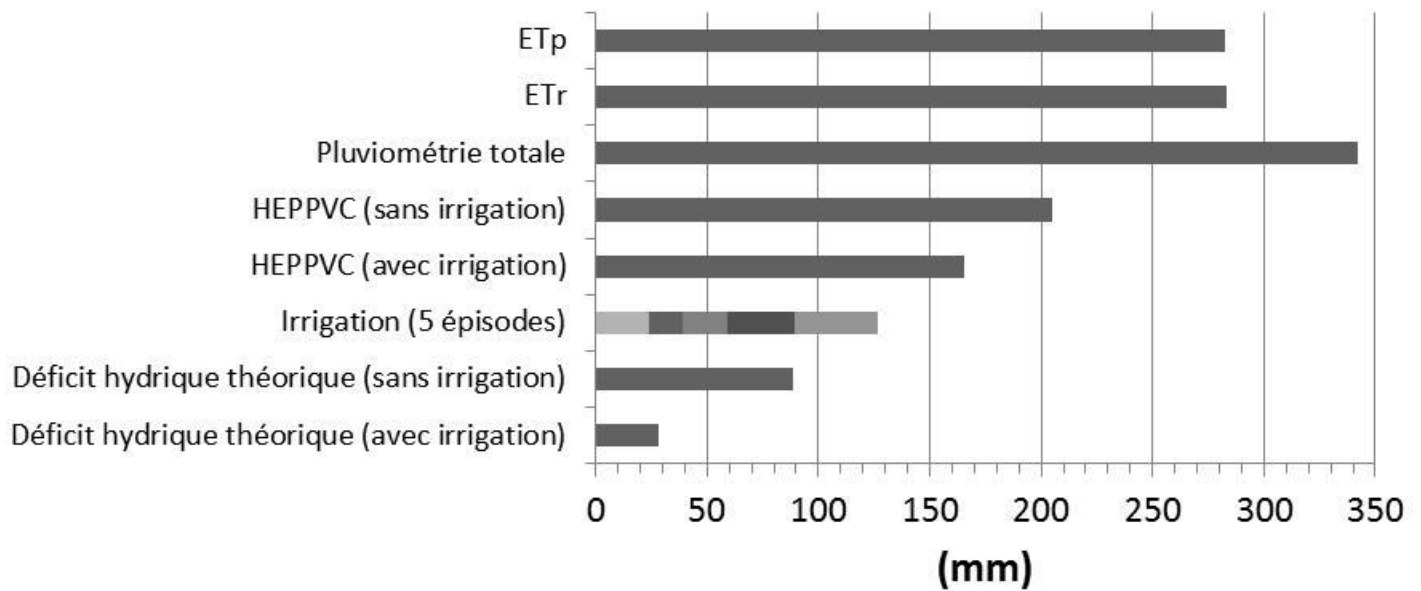


Figure 4. HEPPVC (mm) au site 1, saison 2014.

La HEPPVC au site 2, en 2014 est présenté à la Figure 5. L'ET_p et l'ET_r ont été pratiquement équivalentes et similaires à celles mesurées au site 1 avec des valeurs de près de 285 mm. Il n'est pas surprenant que l'ET_p et l'ET_r aient été similaires, car les mêmes coefficients culturaux (kc) ont été utilisés pour les deux sites. La pluviométrie totale de 256 mm est inférieure à l'ET_r calculée, ce qui suggère automatiquement un déficit hydrique. La HEPPVC s'est élevée respectivement à 140 et 160 mm, en considérant ou non l'apport en eau de l'irrigation ou respectivement 54 et 63 % de la pluviométrie totale.

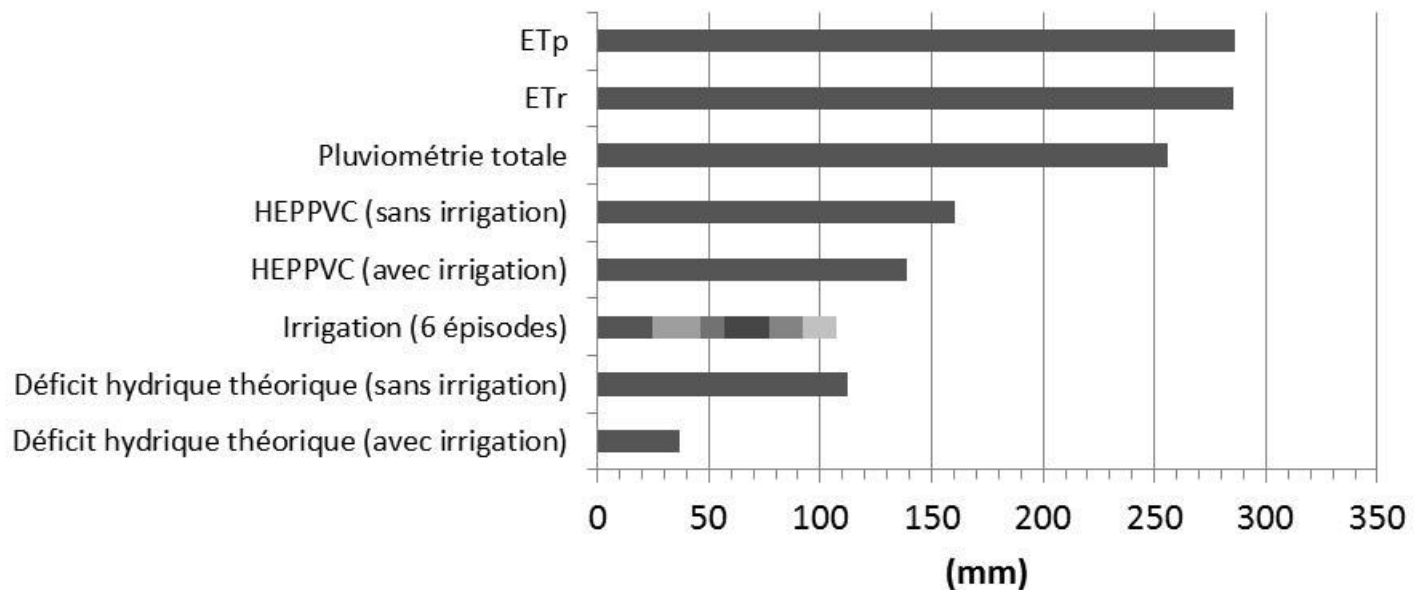


Figure 5. HEPPVC (mm) au site 2, saison 2015.

De plus, il est possible de constater que les irrigations effectuées au site 2 n'ont affecté que légèrement la HEPPVC avec un écart de seulement 20 mm. Le déficit hydrique estimé sans irrigation s'est élevé à 112 mm. Pour combler ce déficit, une hauteur de 107 mm a été appliquée par 6 épisodes d'irrigation. Néanmoins, un déficit hydrique de 37 mm a été estimé entre le 20 juin et le 1^{er} septembre 2014. Il est possible de conclure que, certains épisodes d'irrigation sont survenus lorsque la réserve en eau était possiblement épuisée, et ce, à quelques reprises.

En 2015, la HEPPVC a été mesurée aux mois de juillet et août et est présentée Figure 6 et Figure 7. Un déficit hydrique théorique est présent à chacun des sites en juillet et août 2015, car l' ET_r est supérieure à la pluie valorisable potentielle. Toutefois, un déficit hydrique théorique aurait tout de même été présent pour le site 2 au mois d'août même si la pluie totale avait été considérée, mais ce dernier aurait été moins important. La HEPPVC aurait représenté une proportion variable de la pluie totale soit : entre 44 et 59 % pour le site 1 et entre 68 et 77 % pour le site 2. De nombreux facteurs expliquent la différence marquée entre les proportions de la HEPPVC et la pluie totale :

- L'intensité des précipitations;
- La réserve en eau du sol;
- La régie de l'irrigation du producteur;
- Le stade de développement de la culture.

Dans ce cas précis, le seul facteur réellement différent a été la régie d'irrigation. Dans le cas du site 1, les irrigations plus fréquentes ont joué un rôle important dans la HEPPVC.

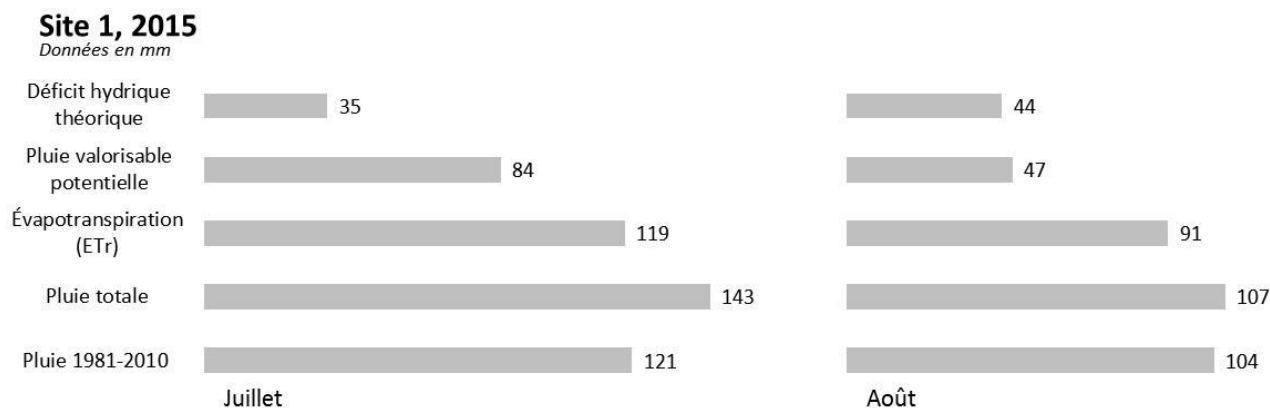


Figure 6. HEPPVC au site 1, saison 2015.

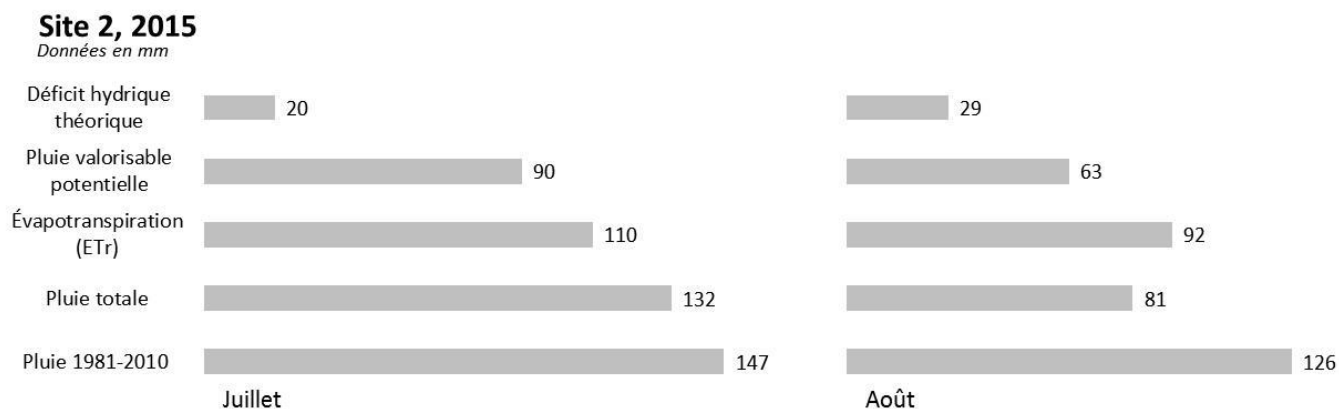


Figure 7. HEPPVC au site 2, saison 2015.

Les valeurs de HEPPVC peuvent être fort utiles en cours de régie, mais aussi dans le cas des calculs des besoins des réserves en eau. En effet, il ne faut surtout pas considérer la totalité de la pluie tombée au cours d'une saison dans les calculs des besoins en eau, mais seulement une partie de celle-ci.

5 Régie d'irrigation – Tensiomètre

Le suivi tensiométrique a été au cœur de ce projet. Le suivi en continu du statut hydrique du sol a permis de suivre et d'analyser les différentes régies des producteurs. Ce suivi individuel permettait, entre autres, de proposer des avenues d'optimisation de l'usage de l'eau et d'en mesurer leur adoption. De plus, ces observations ont également permis de mettre en relief la singularité des régies d'irrigation des producteurs d'une saison à l'autre (Figure 8). Dans le cadre de ce projet, un point de consigne a été établi en fonction de la caractérisation des sols. Une mesure de potentiel matriciel inférieure au point de consigne (sol plus sec) renseigne sur la stratégie et la régie d'irrigation des producteurs. Sans être une mesure absolue de présence de stress hydrique, le temps relatif où les mesures de potentiel matriciel sont inférieures au point de consigne est une indication de probabilité de stress hydrique pour les cultures. Plus le temps relatif est important plus grandes sont les chances que la culture ait subi un stress hydrique au courant de la saison.

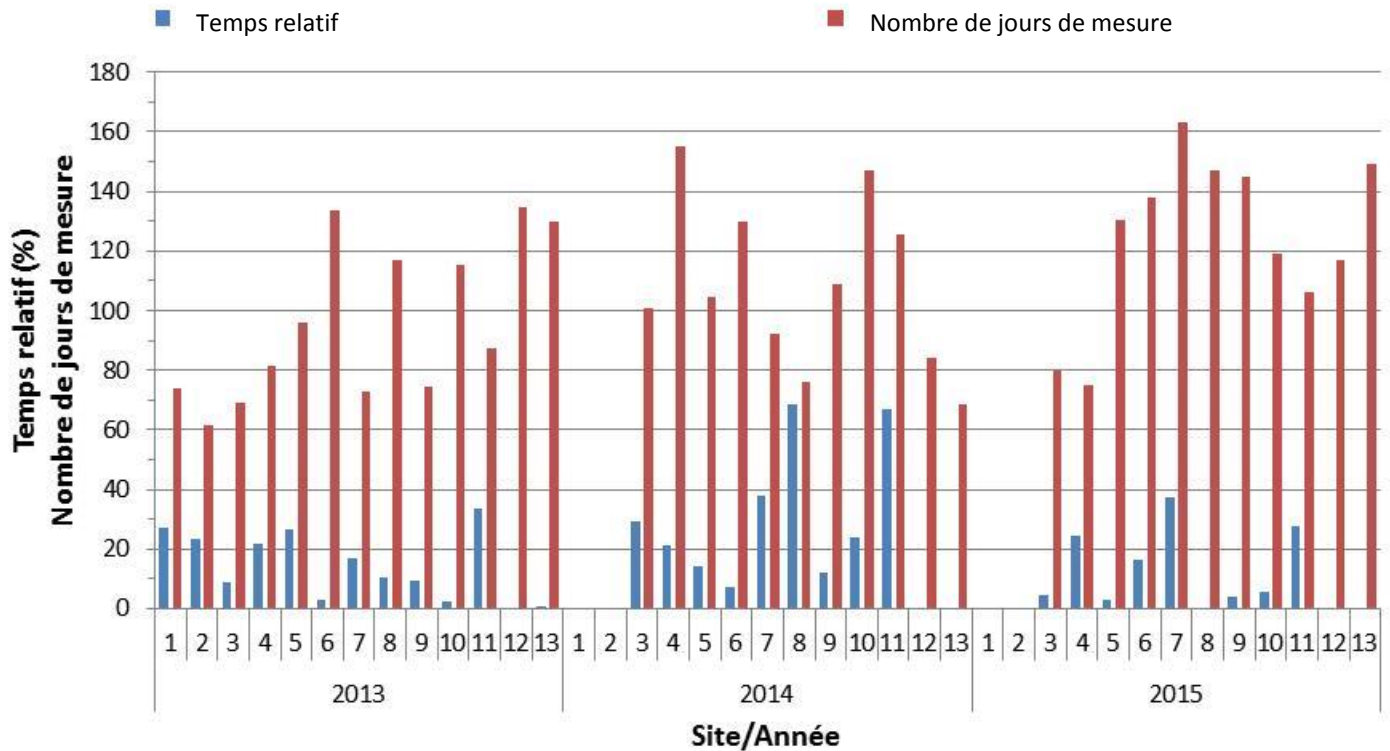


Figure 8. Temps relatif (%) où le potentiel matriciel était inférieur au point de consigne (sol plus sec) et nombre de jours de mesure selon le site et l'année.

5.1 Le suivi de l'irrigation

5.1.1 Verger de pommiers en établissement

Le verger suivi était situé dans la MRC de l'Île-d'Orléans. Le sol était un sable loameux avec 11,2 % de fragments grossiers et possédait un taux de matière organique de 1,8 %. La capacité au champ se situait à -5 kPa tandis que la consigne d'irrigation selon le sol et la culture a été ciblée à -20 kPa (Bergeron, 2015). La consigne d'irrigation déterminée a également été validée par d'autres consignes d'irrigation pour le pommier mentionnées dans la littérature (CRAAQ, 2006; Meron et coll., 2001; Shackel et coll. 2012). Ainsi, la réserve en eau facilement utilisable pour la culture se situait à 30 mm d'eau disponible pour 40 cm de sol. Le suivi tensiométrique est présenté aux Figure 10, Figure 11 et Figure 12. Entre 2013 et 2015, peu d'irrigation a été nécessaire pour maintenir le potentiel matriciel à la consigne d'irrigation (-20 kPa). En effet, en 2013, une seule irrigation a été effectuée tandis que quatre furent nécessaires en 2014 et qu'aucune irrigation n'a été réalisée en 2015. Le suivi à l'aide de tensiomètres installés à deux profondeurs racinaires distinctes (20 et 40 cm) a permis d'évaluer le statut hydrique du sol et d'assurer le suivi de prélèvement des pommiers. Les apports en eau par la pluie ont, de manière générale, été suffisants pour combler la demande en évapotranspiration des pommiers. Des observations sur le terrain ont également démontré la présence d'une nappe d'eau qui interviendrait potentiellement dans l'apport en eau du sol en surface. Un suivi de la nappe à l'aide de piézomètres installés dans trois sections du verger est présentement en cours et permettra de mieux déterminer la contribution de la nappe d'eau (Figure 9). L'utilisation des tensiomètres a démontré la pertinence de l'emploi d'outils de mesure, car sans ces appareils, les irrigations auraient certainement été établies selon un régime préétabli qui n'aurait pas optimisé l'utilisation de l'eau.



Figure 9. Piézomètre installé pour suivre l'évolution de la hauteur de la nappe d'eau.

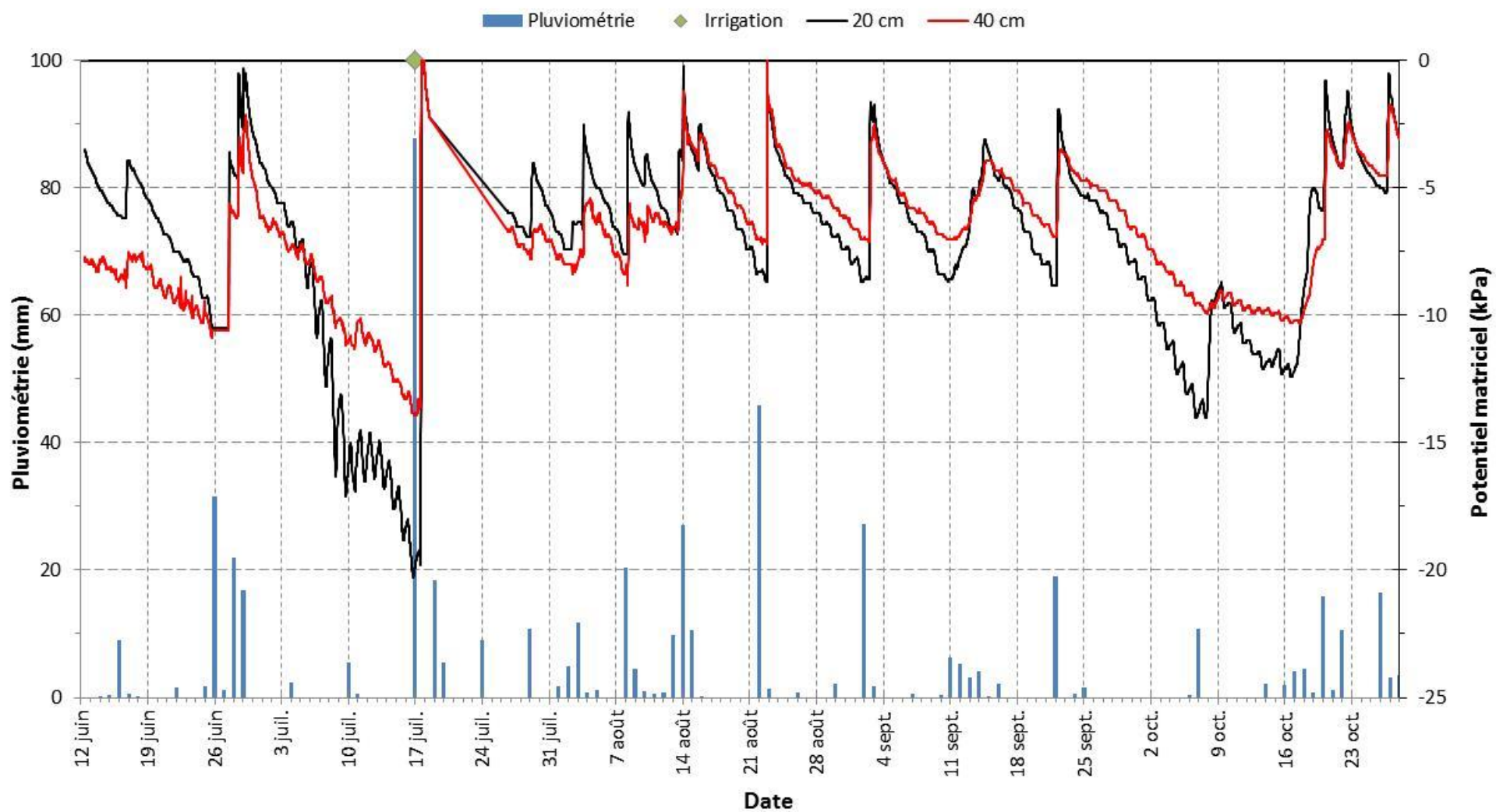


Figure 10. Suivi tensiométrique du potentiel matriciel à 20 et 40 cm (kPa), de l'irrigation et de la pluviométrie (mm), verger de pommiers (site 13), saison 2013.

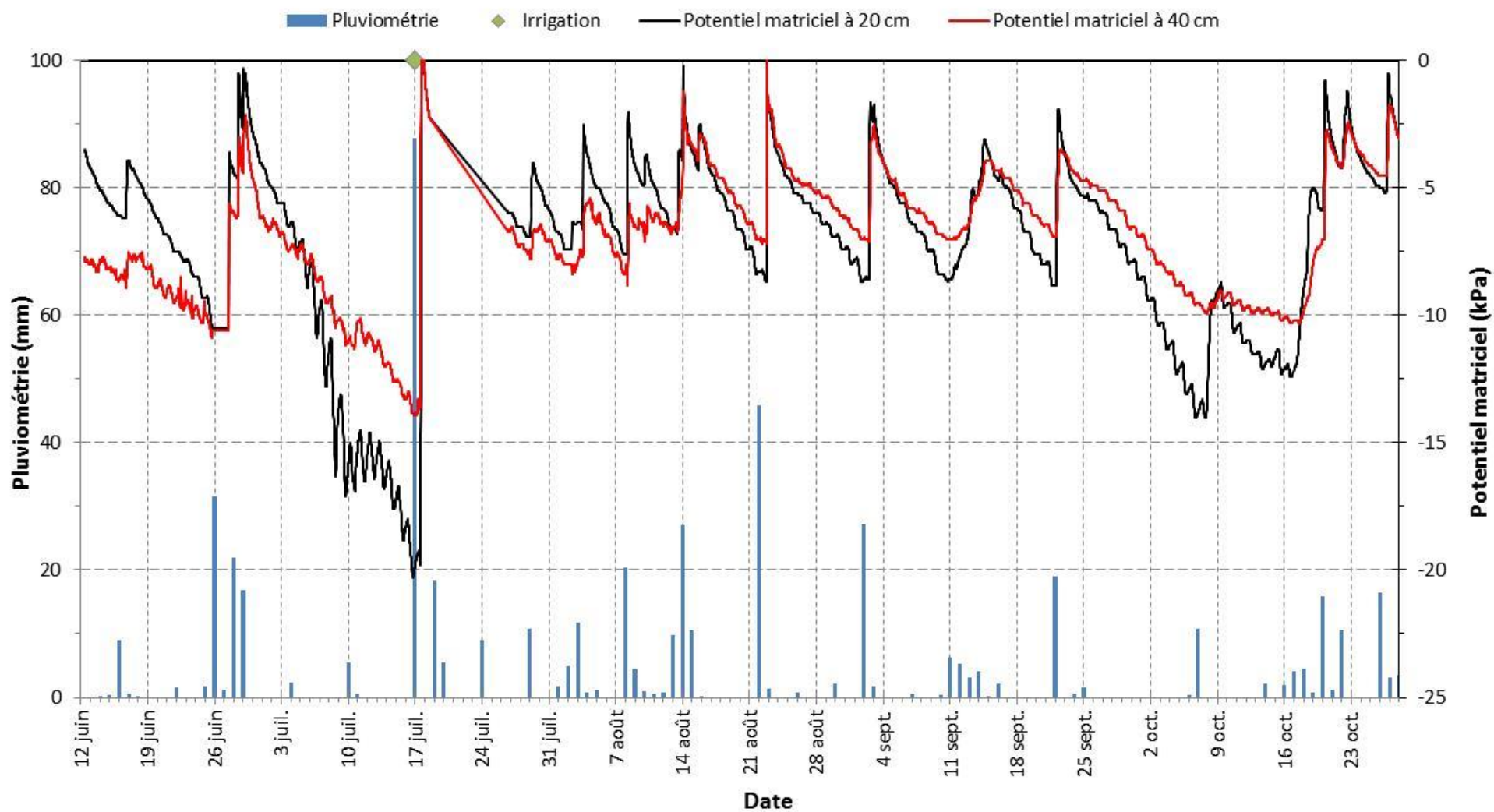


Figure 11. Suivi tensiométrique du potentiel matriciel à 20 et 40 cm (kPa), de la teneur en eau volumique ($\text{cm}^3 \text{ eau} / 100 \text{ cm}^3 \text{ sol}$), de l'irrigation et de la pluviométrie (mm), verger de pommiers (site 13), saison 2014.

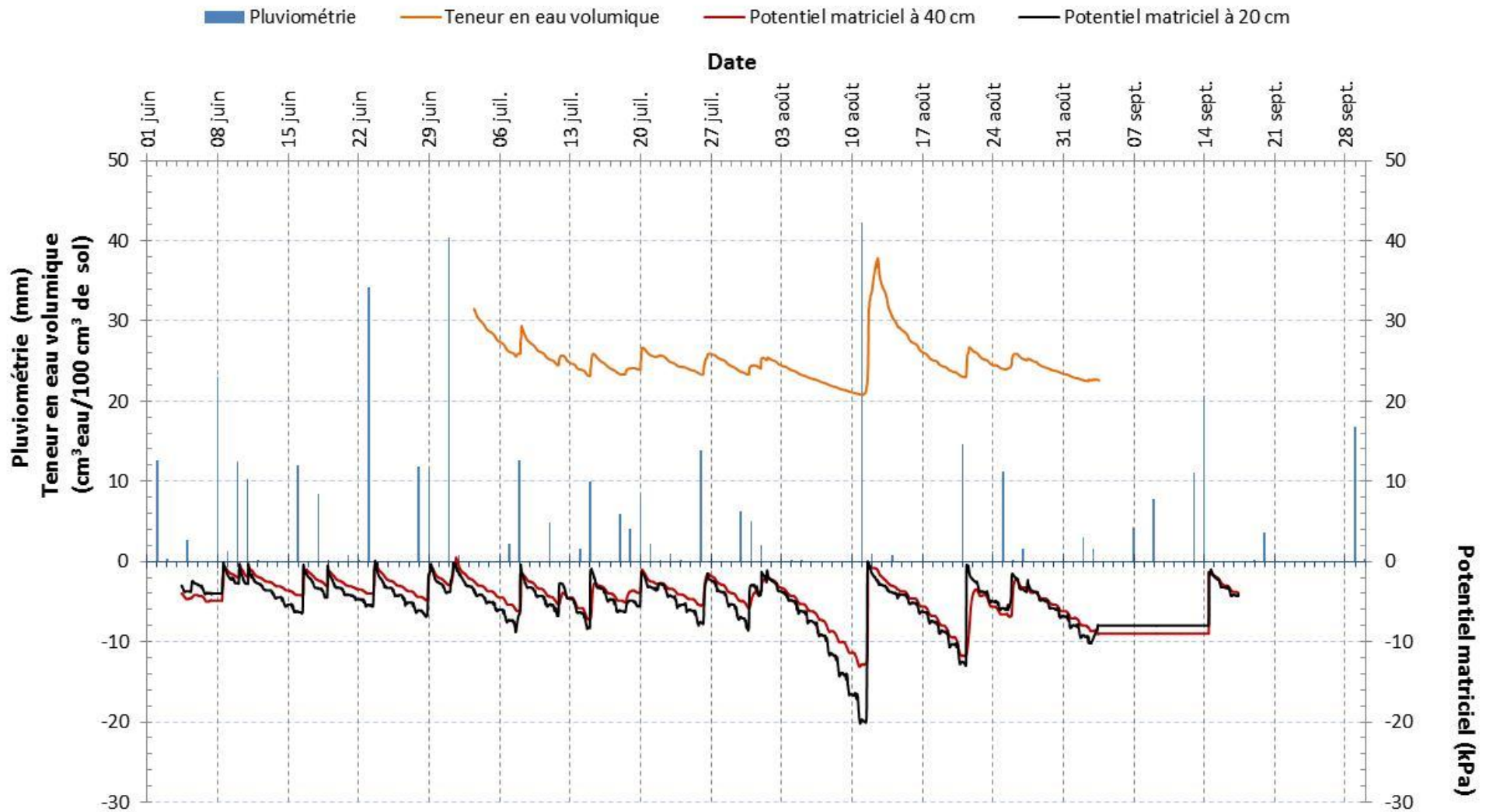


Figure 12. Suivi tensiométrique du potentiel matriciel à 20 et 40 cm (kPa), de la teneur en eau volumique (cm³ eau / 100 cm³ sol) et de la pluviométrie (mm), verger de pommiers (site 13), saison 2015.

4.1.2 Fraisiers à jours neutres

Au cours des saisons 2013 à 2015, un suivi de l'irrigation, à l'aide de tensiomètres, a permis d'évaluer les régies des producteurs et leur impact sur l'humidité du sol. Parmi les différentes situations rencontrées, l'assèchement en surface seulement (Figure 13) ou l'assèchement en profondeur (Figure 14) sont les situations qui ont été les plus souvent rencontrées dans la production de la fraise à jours neutres. Un assèchement en surface et une zone très humide en profondeur tel que le démontre la Figure 13 est souvent causé par une durée d'irrigation trop longue et une fréquence d'irrigation insuffisante. Dans ce cas, l'horizon inférieur est gorgé d'eau et le prélèvement par les plantes n'est pas optimal.

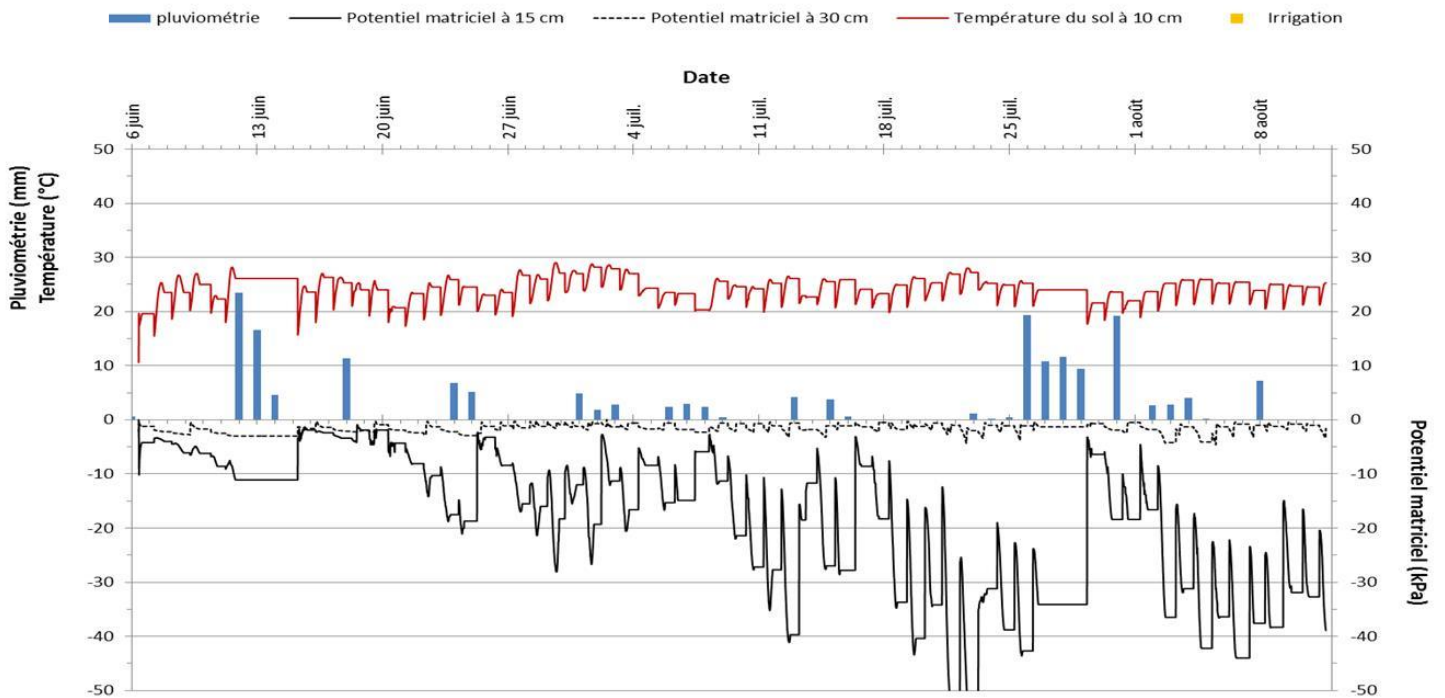


Figure 13. Exemple d'assèchement du sol en surface.

L'assèchement en profondeur, lui, est souvent causé par une fréquence insuffisante et/ou une durée trop courte. Dans ces situations, les apports en eau ne parviennent pas à réhumecter de manière uniforme le profil de sol et un assèchement en profondeur peut survenir. Cette situation est souvent de courte durée, car dans la plupart des cas, un épisode de pluie important permet de réhumecter le sol en profondeur.

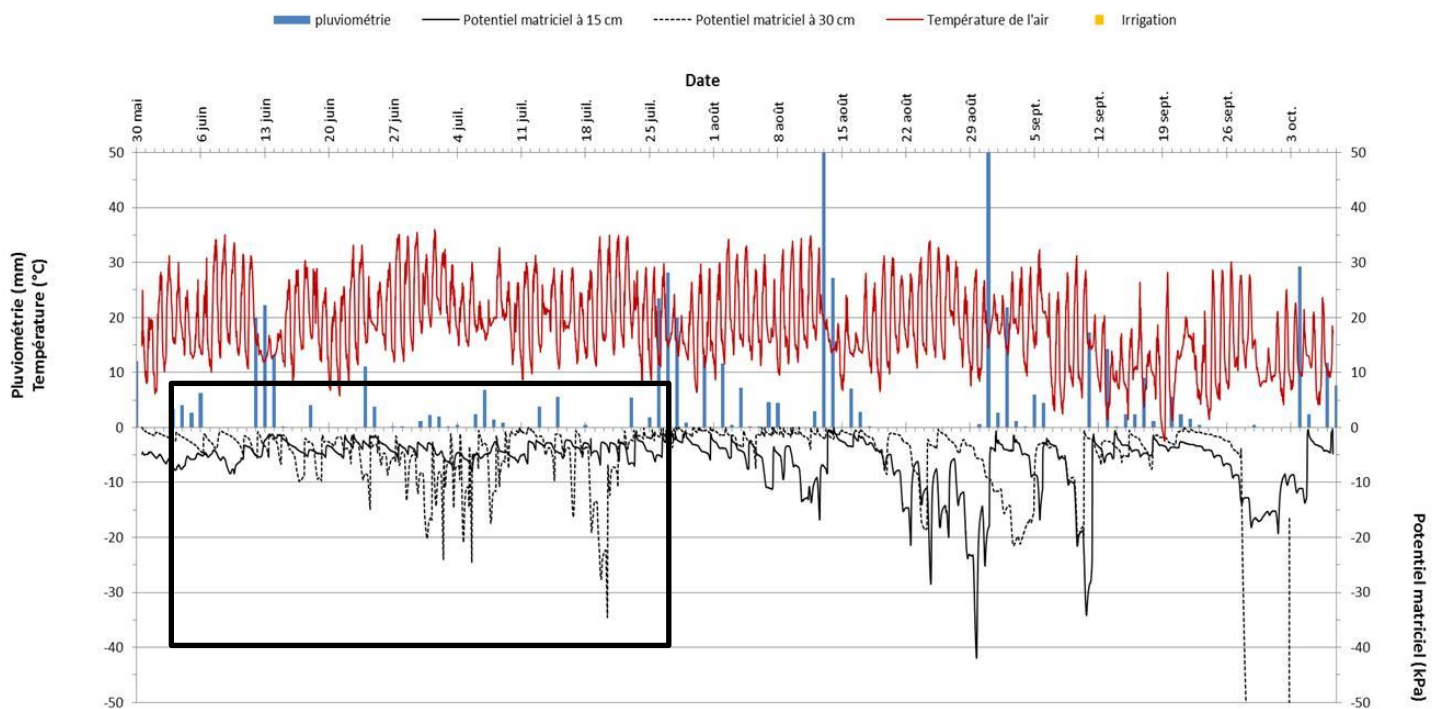


Figure 14. Exemple d'assèchement du sol en profondeur.

4.1.3 Pommes de terre

Le suivi à l'aide de deux sondes tensiométriques permet de valider de manière pratique la durée d'un épisode d'irrigation. Une irrigation idéale permet de saturer temporairement le sol en surface et se prolonge jusqu'à ce que la sonde en profondeur « réagisse » et indique une valeur près de celle de la capacité au champ, sans atteindre zéro. La Figure 15 est un bel exemple d'une durée adéquate. Dans ce cas précis, le statut hydrique du sol en profondeur n'a pas été dans des conditions de saturation. De cette manière, l'eau d'irrigation a été contenue dans les horizons mesurés par les sondes tensiométriques. De plus, le risque de lessivage des éléments nutritifs est faible, car selon les tensiomètres, l'eau dans le profil était à un potentiel matriciel avoisinant la capacité au champ.

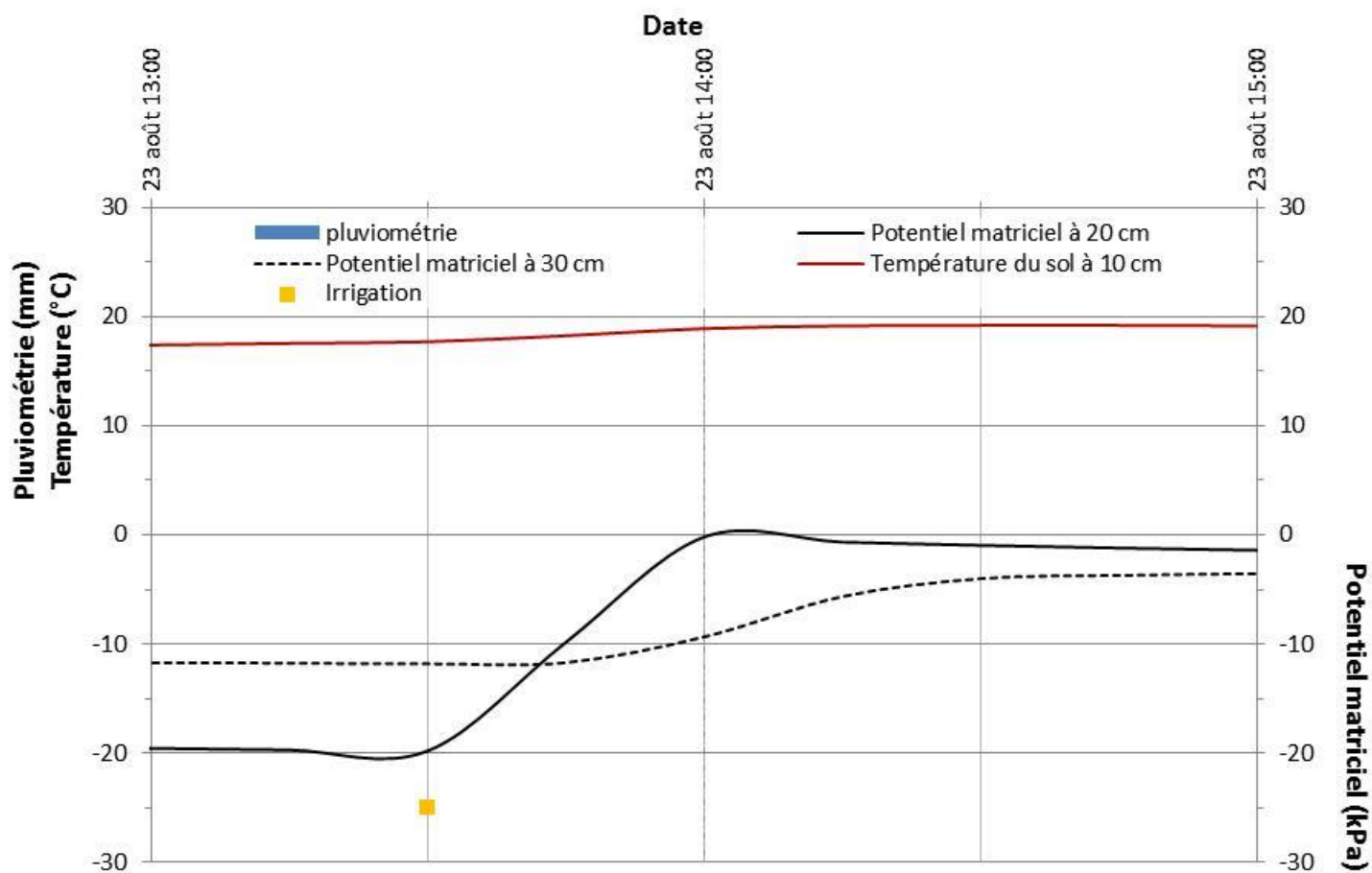


Figure 15. Exemple d'une durée d'irrigation idéale en aspersion.

4.3 Les limites de l'utilisation d'outils sans fil

Depuis son invention, le tensiomètre a beaucoup évolué. Avec la démocratisation des technologies sans fil, il est aujourd'hui possible d'utiliser des tensiomètres dont la lecture peut s'effectuer à distance. Cette technologie relativement récente procure sans contredit des avantages intéressants tels que :

- Le suivi de l'évolution et de la tendance du potentiel matriciel;
- L'enregistrement des données pour établir des historiques;
- La centralisation des données de plusieurs appareils connectés;
- L'amélioration de l'accessibilité aux données (Internet);
- La diminution du temps passé à la collecte des données et le coût s'y rattachant;

Toutefois, certains de ces avantages peuvent devenir un inconvénient. De par sa nature autonome, il est possible de penser que le tensiomètre n'exige maintenant que l'installation en début de saison pour bien fonctionner. Or, l'expérience acquise lors de plusieurs projets, dont celui-ci, prouve que le suivi au champ est encore essentiel. Tel que démontré par les Figure 16 et Figure 17, le tensiomètre peut parfois ne pas représenter la réalité de l'ensemble d'un champ. Il peut en effet mesurer le statut hydrique du sol affecté par différents facteurs biotiques ou abiotiques qui étaient peu ou pas présents lors de l'installation (maladies, mauvaises herbes, plants morts, sonde déchargée, etc.). Ainsi, malgré toutes ces avancées technologiques, il est important de conserver son esprit critique et d'effectuer un suivi minimal au champ pour s'assurer de la validité des mesures effectuées.



Figure 16. Tensiomètre installé dans une section de champ de fraises à jours neutres aux prises avec des mauvaises herbes.



Figure 17. Tensiomètre installé dans une section qui ne représente pas la vigueur des plants du reste du champ.

6 Régie d'irrigation - Évapotranspiration

Les deux principales méthodes utilisées pour la régie de l'irrigation sont le bilan hydrique et la mesure de l'état hydrique du sol avec des tensiomètres. Le bilan hydrique consiste à comparer les apports (pluie et irrigation) et les pertes en eau (évapotranspiration, ruissellement et infiltration hors de la zone racinaire) dans un site et pour une période donnée. Chaque méthode présente des avantages et des limites. Le bilan hydrique implique de calculer d'abord l'évapotranspiration potentielle à l'aide de stations météorologiques et d'estimer ensuite le plus précisément possible l'évapotranspiration de la culture tout au long de la saison de croissance, par le biais d'un coefficient cultural (k_c). Le défi est d'utiliser le bon k_c qui varie selon les cultivars, les pratiques culturales, le type de sol, les conditions climatiques locales et le degré d'assèchement du sol. Aussi, il est difficile d'estimer l'efficacité de la pluie et de l'irrigation afin d'effectuer un bilan précis. Cette méthode présente toutefois l'avantage d'être peu dispendieuse et de permettre des prévisions sur la nécessité d'irriguer. L'approche tensiométrique offre, quant à elle, une mesure réelle de l'état hydrique du sol et permet d'en apprécier l'évolution. Le tensiomètre nécessite toutefois de l'entretien, peut se décharger, est plus dispendieux par unité de surface, offre une mesure localisée et est moins adapté aux sols lourds. Compte tenu de ces considérations, une approche hybride pourrait s'avérer intéressante (Boivin et Bergeron, 2015). Hartz (1999) estime également que le bilan hydrique et les mesures tensiométriques présentent chacun leurs limites et que l'utilisation conjointe des deux méthodes peut s'avérer un excellent moyen de gérer l'irrigation par goutte à goutte en productions maraîchères en Californie.

Durant le projet, l'évapotranspiration potentielle a été mesurée. De manière quotidienne ou hebdomadaire, les mesures d'évapotranspiration ont été transmises aux producteurs de même que les prévisions d'évapotranspiration pour les jours à venir. Ces informations ont été utilisées en 2014 pour la réalisation de feuillets hebdomadaires faisant état de la situation dans deux « parcelles phares » en pommes de terre.

En 2015, des grilles de référence pour l'irrigation de la fraise à jours neutres ont été élaborées. Bien que la régie était basée sur l'utilisation de tensiomètres, l'évapotranspiration pouvait être utilisée pour construire une prévision des durées d'irrigation nécessaires afin de combler les besoins de la culture au cours des trois prochains jours. Dans le but de faciliter son adaptation, la grille n'a été élaborée que pour la période « plein développement » du fraisier, en considérant 100 % de couverture de la butte par la culture. Le coefficient a été calculé à partir des travaux de Bergeron (2010) et de Hanson et Bendixen (2004). Ainsi, le K_c considéré a été celui correspondant à la proportion du champ qui était occupé par les buttes. Un exemple de grille est présenté au Tableau 2. Dans ce cas précis, 50 % du champ est occupé par les buttes de sol. En considérant le fraisier au stade de plein développement, le K_c considéré a donc été de 0,50 pour calculer le besoin journalier de la culture (ET_r). Le besoin calculé a ensuite été converti en temps d'irrigation théorique nécessaire d'après le système d'irrigation en place et la pression d'opération utilisée. Le Tableau 2 a été élaboré pour le fraisier à maturité, avec un système d'irrigation fournissant 2,2 mm par heure avec une efficacité de 95 %. Les observations de 2015 tendent à démontrer que lorsque l' ET_p est plus faible, le K_c considéré peut être assez fiable. Par contre, lorsque le besoin théorique augmente, le besoin réel semble plafonner. Cette particularité a été observée par Bergeron (2010) et cela indique que la formule pour calculer le K_c pourrait éventuellement être modifiée en tenant compte de cette situation (Figure 18). Ainsi, deux durées d'irrigation visées sont présentées au Tableau 2 : une qui utilise un K_c constant et une autre qui tient compte du phénomène de plafonnement. Aussi, une valeur maximale d' ET_r de 2,8 mm a été retenue, correspondant à celle mesurée par Bergeron (2010). Les valeurs présentées ne doivent pas dicter les durées réelles d'irrigation. Elles ont été fournies aux producteurs que dans le but d'indiquer l'ampleur du volume d'eau pouvant être nécessaire au cours des prochaines heures. Elles doivent être utilisées de pair avec un suivi de l'état hydrique du sol.

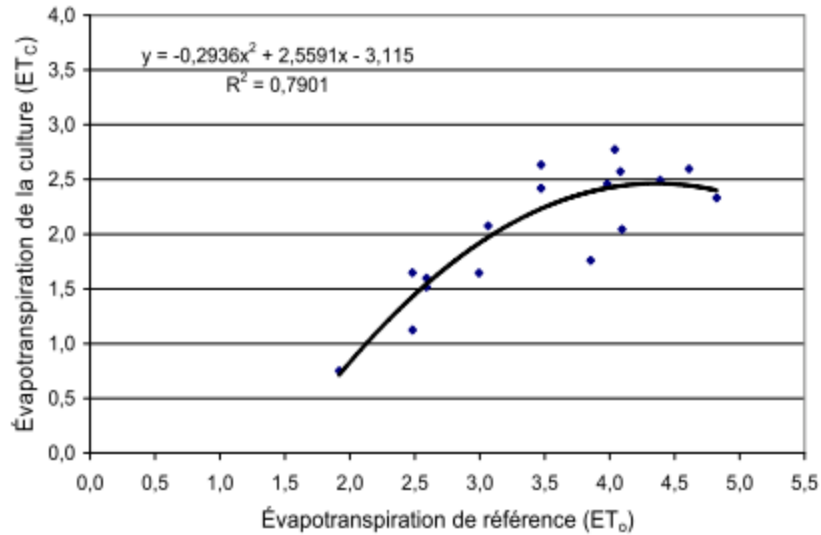


Figure 18. Évapotranspiration réelle (ET_c, mm) en fonction de l'évapotranspiration potentielle (ET_o, mm).

Parallèlement à cette démarche, des essais d'uniformité ont été réalisés pour s'assurer de l'uniformité des pressions d'opération (Nadon et coll., 2016). Cette grille a permis, de manière théorique, de planifier les besoins en eau pour les prochains jours. Par exemple, une prévision d'évapotranspiration de 4 mm impliquerait une irrigation d'une durée de 55 à 67 minutes dans la journée, selon la méthode utilisée. Ce temps d'irrigation permet uniquement de remplacer l'eau prélevée par la plante.

Tableau 2. Estimation de durées d'irrigation (minutes) nécessaires pour combler la demande d'évapotranspiration à pleine maturité.

ET_p (mm)	Kc	ET_r (mm)	ET_r (mm)*	Durée d'irrigation visée	Durée d'irrigation visée*
				(minutes)	
1	0,5	0,5	0,3	14	7
1,25	0,5	0,6	0,3	17	9
1,5	0,5	0,8	0,4	21	10
1,75	0,5	0,9	0,4	24	12
2	0,5	1,0	0,8	28	23
2,25	0,5	1,1	1,2	31	32
2,5	0,5	1,3	1,5	34	40
2,75	0,5	1,4	1,7	38	47
3	0,5	1,5	1,9	41	53
3,25	0,5	1,6	2,1	45	58
3,5	0,5	1,8	2,3	48	62
3,75	0,5	1,9	2,4	52	65
4	0,5	2,0	2,4	55	67
4,25	0,5	2,1	2,5	59	68
4,5	0,5	2,3	2,5	62	68
4,75	0,5	2,4	2,4	65	67
5	0,5	2,5	2,5	69	69
5,25	0,5	2,6	2,6	72	72
5,5	0,5	2,8	2,8	76	76
5,75	0,5	2,9	2,8	79	76
6	0,5	3,0	2,8	83	76
6,25	0,5	3,1	2,8	86	76
6,5	0,5	3,3	2,8	90	76

* $ET_r = -0,2936 ET_p^2 + 2,5591 ET_p - 3,115$ (Bergeron, 2010)

6.1 Durée des irrigations et quantités d'eau appliquées par goutte à goutte

Avec l'irrigation par goutte à goutte, il est possible d'intervenir fréquemment afin de combler en continu les besoins de la culture. Les quantités à appliquer visent donc à combler ce besoin en ramenant le sol asséché à un niveau d'humidité supérieur à son état initial, sans toutefois dépasser la teneur en eau à la capacité au champ. Cette dernière correspond à une teneur en eau au-delà de laquelle l'eau n'est pas retenue par le sol et se perdra éventuellement par drainage.

Les valeurs présentées en exemple au Tableau 2 servent à effectuer un calcul théorique de la quantité d'eau à appliquer (durée d'irrigation) pour combler le besoin journalier de la culture qui est dans ce cas-ci le fraisier à jours neutres. Il ne s'agit pas d'une quantité d'eau à appliquer en une seule fois, car la quantité demandée est souvent supérieure à la capacité de rétention du sol. En effet, selon le système en place et le type de sol, les durées à retenir pourraient être par exemple fréquentes et de très courtes durées (ex. 2 à 3 fois 30 minutes par

jour). Afin de guider l'utilisateur d'un système d'irrigation par goutte à goutte, il est possible d'évaluer au préalable les durées possibles en tenant compte de la capacité de réserve en eau du sol.

Pour procéder à l'évaluation des quantités théoriques pouvant être appliquées, il s'agira d'abord d'évaluer la portée du système d'irrigation par goutte à goutte, de considérer la teneur en eau initiale du sol et, à partir des données de la caractérisation physique du sol (courbe de rétention), la quantité d'eau pouvant être ajoutée sans que l'eau ne soit perdue par drainage.

6.2 Estimation du volume de sol à la portée du système d'irrigation

Dans les systèmes culturaux où l'irrigation est apportée via un système par goutte à goutte, une proportion du sol en périphérie du tube de goutte à goutte est hors de portée des épisodes d'irrigation. Ainsi, ce volume de sol, à moins d'être à la portée des précipitations, s'assèche progressivement (Bergeron, 2010; Boivin et Deschênes, 2011; Landry et Boivin, 2014). Cette problématique limite le volume d'eau pouvant être emmagasiné dans le sol pour la culture et devrait encadrer, d'une certaine façon, la gestion des apports en eau. Dans une optique d'optimisation de l'usage de l'eau et de minimisation du risque de lessivage (engrais et pesticides), il est essentiel de bien connaître ce volume maximal d'eau que le sol peut retenir à chaque irrigation. C'est pourquoi, une réflexion s'est amorcée pour déterminer si le sol possédait la capacité de conserver l'eau d'irrigation prescrite par les grilles de référence, et ce, dans la zone racinaire.

Pour ce faire, la méthode du « cône d'humectation » a été développée et utilisée pour estimer, en premier lieu, le volume de sol à la portée d'un apport en eau par l'irrigation. Cette méthode consiste à déterminer le volume de sol qui est potentiellement mouillable par un goutteur.

6.2.1 Exemple pour un sol donné

Le sol servant d'exemple est un loam sableux avec plus de 50 % de fragments grossiers (> 2 mm) et une capacité au champ à -3 kPa, avec une profondeur d'enracinement de 30 cm. De nombreuses observations et des mesures réalisées, notamment par Boivin et Deschênes (2011) et Landry et Boivin (2014), dans des sols possédant des caractéristiques physiques comparables ont permis d'établir les paramètres généraux sur la portée d'humectation réelle des systèmes par goutte à goutte. Pour faciliter la démonstration, une figure géométrique simple a été choisie pour déterminer la zone d'humectation du système goutte à goutte (Figure 19). Le choix de la forme géométrique s'est arrêté sur le cône de révolution tronqué puisqu'il représentait bien la zone mouillable observée et mesurée lors des projets antérieurs. Les paramètres importants à considérer pour établir le volume de sol comprennent le rayon d'humectation en surface, la profondeur maximale d'enracinement de la culture et le rayon d'humectation en profondeur. Cette approche théorique a toutefois certaines limites. En effet, le rayon d'humectation et la dynamique du mouvement de l'eau dans le sol varient selon le potentiel matriciel initial lors des irrigations. Ainsi, lorsque le sol est plus sec, la conductivité hydraulique non saturée de celui-ci diminue, ce qui induit une modification du mouvement de l'eau dans le sol et une réduction potentielle du cône d'humectation. À l'inverse, lors de précipitations importantes, certaines zones sèches de la butte peuvent se réhumecter. Le volume de sol devient alors beaucoup plus important que les seuls cônes d'humectation. Dans la réalité, la zone humectée ne peut toujours se réduire à une forme géométrique simple, car l'entremêlement des précipitations et des irrigations influence, de manière complexe, la dynamique du mouvement de l'eau dans une butte de sol recouverte de paillis de plastique. De manière générale, plus les précipitations sont fréquentes et abondantes, plus la simulation à l'aide du cône doit être bonifiée par une considération plus grande du volume de sol humecté. À l'inverse, moins les précipitations sont fréquentes et abondantes, plus la simulation à l'aide du cône de révolution prend son sens.

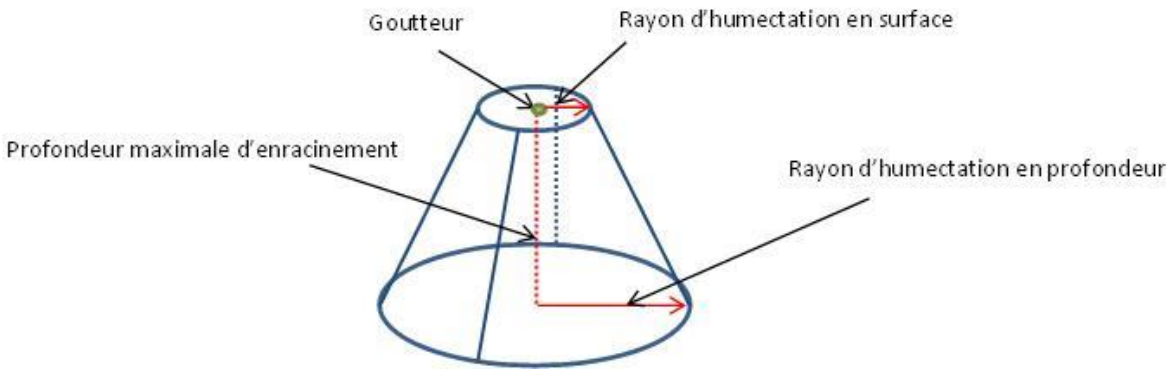


Figure 19. Cône d'humectation représentant la zone de sol à portée d'un goutteur.

Concrètement, avec un rayon d'humectation de surface de 5 cm, une profondeur maximale d'enracinement de 30 cm et un rayon d'humectation en profondeur de 15 cm, le volume obtenu a été de 10 210 cm³ de sol. À partir de ce volume, qui est à la portée d'un goutteur, le volume d'eau que ce cône pourrait contenir a été estimé selon le statut hydrique du sol au moment de l'apport et la valeur cible suivant l'apport (capacité au champ). En sachant le volume d'eau que le cône d'humectation peut contenir à la capacité au champ, il est ensuite facile de déduire le volume d'eau nécessaire et le temps nécessaire pour appliquer cette quantité d'eau à un potentiel matriciel donné, pour revenir à la capacité au champ (Tableau 3). La hauteur d'eau facilement disponible est l'eau retenue par le sol entre la capacité au champ et -15 kPa (valeur de potentiel matriciel sur la courbe de désorption en eau où un « plateau » est observé).. Grâce à cette valeur d'eau disponible, il est possible de comparer cette valeur avec les valeurs d'évapotranspiration réelle. Ainsi, lorsque le sol se situe à la capacité au champ, l'eau disponible (de -3 kPa à -15 kPa) peut combler une demande en évapotranspiration réelle de 2,4 mm ou soit l'équivalent d'une valeur d'environ 4,75 mm d'ET_p (Tableau 2). À la fin de cette journée, le potentiel matriciel théorique moyen devrait se situer à environ -15 kPa.

Tableau 3. Équivalent en hauteur d'eau disponible (mm), volume d'eau irrigable (ml), ainsi que le temps nécessaire pour combler le volume irrigable (minutes) par goutteur selon le potentiel matriciel du sol (kPa) pour le sol utilisé en exemple.

	Potentiel matriciel (kPa)												
	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11	-12	-13	-14	-15
Équivalent en hauteur d'eau disponible * (mm)	2,4	1,8	1,3	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5	0,3	0,3	0,1	0,1	0
Volume d'eau irrigable par goutteur (ml)	Capacité au champ	163	281	408	460	470	485	511	557	560	602	613	638
Temps nécessaire** pour combler le volume irrigable par goutteur (minutes)	Capacité au champ	17	29	42	47	48	49	52	57	57	61	62	65

*Réserve facilement utilisable considérée entre -3 et -15 kPa.

**Les temps nécessaires présentés sont un exemple pour un système qui fournit 2,2 mm par heure avec une efficacité de 95 %.

Les informations présentées dans les tableaux précédents (Tableau 2 et Tableau 3) pris séparément ne représentent qu'une vision très singulière et incomplète de la réalité dans un contexte de régie d'irrigation. Pour mieux exprimer cette réalité, il devient nécessaire de combiner l'information des Tableau 2 et Tableau 3. En effet, le but premier de l'irrigation est de maintenir le statut hydrique du sol dans un intervalle qui maximise l'évapotranspiration de la culture (intervalle hydrique idéal). L'anticipation ou la prévision des besoins futurs apporte une seconde dimension en permettant d'être proactif et d'anticiper les irrigations à venir. Autrement dit, ces aspects deviennent intimement liés et doivent être considérés conjointement dans une régie de l'irrigation raisonnée et efficace.

Les stratégies pouvant être employées pour remplacer l'eau prélevée et maintenir le sol à un potentiel matriciel idéal sont nombreuses et variables. La mise en place de telles stratégies doit reposer notamment sur les caractéristiques du sol et des besoins potentiels des cultures. Donc, dans un premier temps, l'analyse est maintenant de considérer si l'apport en eau visant à remplacer uniquement les besoins de la culture respecte la capacité du cône d'humectation (Tableau 4). Ces proportions permettent d'évaluer si la capacité du cône d'humectation est suffisante pour combler les besoins projetés de la culture. Toute proportion supérieure à 100 % indique que le volume d'eau nécessaire excède la capacité du cône et devrait se faire en fractionnant l'irrigation. Ces informations mettent en lumière la capacité limitée du sol à recevoir une quantité importante d'eau à chaque irrigation.

Pour bien comprendre la complexité d'établir une régie d'irrigation optimale, il est possible d'analyser la stratégie la plus exigeante qui soit : fournir la quantité d'eau qui répondra aux besoins en évapotranspiration et maintenir le statut hydrique du sol à la capacité au champ. Toujours pour le sol cité en exemple, les durées d'irrigation prescrites sont présentées au Tableau 5. Les durées d'irrigation peuvent ainsi varier entre 7 et 141 minutes. Lorsque le potentiel matriciel se situe à la capacité au champ (-3 kPa), le temps d'irrigation à prévoir pour la journée sera celui qui vise à apporter la quantité d'eau nécessaire pour combler la demande en évapotranspiration (Tableau 2) tandis que lorsque la demande en évapotranspiration est à 0, le temps indiqué correspond au temps nécessaire pour combler le volume irrigable (Tableau 3).

Il est donc possible d'estimer, à partir des caractéristiques du sol et de la portée du système d'irrigation, les durées d'irrigation optimales. Les valeurs présentées aux Tableaux 2 à 5 inclusivement correspondent à une situation donnée et doivent être adaptées selon les sites et les systèmes en place.

Aussi, il est important de noter que les durées présentées sont théoriques et elles ne visent qu'à faciliter l'élaboration d'une régie adaptée aux systèmes en place. Elles ne remplacent pas la nécessité de mesurer au champ la dynamique réelle de l'eau dans le sol lors et suite aux irrigations, à l'aide de tensiomètres par exemple. Ainsi, en fonction du type de sol (texture, proportion de gravier, densité, présence de couche compacte ou de sol à texture très différente selon les horizons, etc.), le déplacement de l'eau apportée pourra être fort différent selon les sites.

Tableau 4. Au terme d'un apport en eau, déterminé par les prévisions en évapotranspiration (mm) et le potentiel matriciel du sol au moment de déclencher l'irrigation, proportion de la réserve en eau du cône (%) qui sera comblée.

Évapotranspiration (Prévision) (mm)																						
ET _p	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,25	5,5	5,75	6	
ET _r	0,5	0,63	0,75	0,88	1	1,13	1,25	1,38	1,5	1,63	1,75	1,88	2	2,13	2,25	2,38	2,5	2,63	2,75	2,88	3	
Potentiel matriciel (kPa)	-3	Capacité au champ																				
	-4	41	52	62	73	137	192	240	282	318	348	372	390	402	408	407	401	415	435	456	456	456
	-5	24	30	36	42	80	112	140	164	185	203	217	227	234	237	237	233	241	253	265	265	265
	-6	17	21	25	29	55	77	96	113	127	139	149	156	161	163	163	160	166	174	182	182	182
	-7	15	18	22	26	49	68	85	100	113	124	132	139	143	145	145	143	147	155	162	162	162
	-8	14	18	22	25	48	67	84	98	111	121	130	136	140	142	142	139	144	151	159	159	159
	-9	14	17	21	24	46	65	81	95	107	117	125	131	135	137	137	135	140	147	154	154	154
	-10	13	17	20	23	44	61	77	90	102	112	119	125	129	130	130	128	133	139	146	146	146
	-11	12	15	18	21	40	56	70	83	93	102	109	115	118	120	120	118	122	128	134	134	134
	-12	12	15	18	21	40	56	70	82	93	102	109	114	117	119	119	117	121	127	133	133	133
	-13	11	14	17	20	37	52	65	77	86	95	101	106	109	111	110	109	112	118	124	124	124
-14	11	14	17	19	37	51	64	75	85	93	99	104	107	109	109	107	111	116	122	122	122	
-15	11	13	16	19	35	49	61	72	82	89	95	100	103	104	104	103	106	111	117	117	117	

Note : système d'irrigation appliquant 2,2 mm/heure à une efficacité de 95 %.

Tableau 5. Temps d'irrigation (minutes) pour maintenir le potentiel matriciel à -3 kPa selon le potentiel matriciel initial et les prévisions d'évapotranspiration (mm).

		Évapotranspiration (Prévision) (mm)																						
		ET _p	0	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,25	5,5	5,75	6
		ET _r	0	0,5	0,63	0,75	0,88	1	1,13	1,25	1,38	1,5	1,63	1,75	1,88	2	2,13	2,25	2,38	2,5	2,63	2,75	2,88	3
Potentiel matriciel (kPa)	-3	0	7	9	10	12	23	32	40	47	53	58	62	65	67	68	68	67	69	72	76	76	76	76
	-4	17	24	25	27	29	39	49	57	64	70	75	79	81	83	84	84	83	86	89	92	92	92	92
	-5	29	35	37	39	41	51	60	68	75	81	86	90	93	95	96	96	95	97	101	104	104	104	104
	-6	42	48	50	52	54	64	73	81	88	94	99	103	106	108	109	109	108	110	114	117	117	117	117
	-7	47	54	55	57	59	70	79	87	94	100	105	109	112	114	115	114	113	116	119	123	123	123	123
	-8	48	55	56	58	60	71	80	88	95	101	106	110	113	115	116	115	114	117	120	124	124	124	124
	-9	49	56	58	60	61	72	81	89	96	102	107	111	114	116	117	117	116	118	122	125	125	125	125
	-10	52	59	61	62	64	75	84	92	99	105	110	114	117	119	120	120	119	121	124	128	128	128	128
	-11	57	64	65	67	69	79	88	97	104	110	115	119	121	123	124	124	123	126	129	132	132	132	132
	-12	57	64	66	67	69	80	89	97	104	110	115	119	122	124	125	125	124	126	129	133	133	133	133
	-13	61	68	70	72	73	84	93	101	108	114	119	123	126	128	129	129	128	130	134	137	137	137	137
	-14	62	69	71	73	74	85	94	102	109	115	120	124	127	129	130	130	129	131	135	138	138	138	138
-15	65	72	74	75	77	88	97	105	112	118	123	127	130	132	133	133	132	134	137	141	141	141	141	

Note : système d'irrigation appliquant 2,2 mm/heure à une efficacité de 95 %.

6.3 Irrigation pulsée

L'analyse de la demande en évapotranspiration réelle à pleine maturité et des durées d'irrigation nécessaires pour soutenir les besoins en lien avec la capacité de rétention du sol, dans les limites de performance du système de goutte à goutte, laisse présager que l'irrigation pulsée est une stratégie raisonnable à mettre en place pour optimiser l'usage de l'eau.

Bien que les producteurs participant au projet aient déjà mis en place une régie impliquant des durées d'irrigation relativement courtes, soit de l'ordre de 45 à 90 minutes, il y a lieu d'étudier la possibilité de réduire la durée et d'augmenter la fréquence de ces apports. En présence d'un loam sablo-argileux avec une forte proportion de gravier par exemple, il a été démontré que des irrigations d'une durée de 45 ou 60 minutes sont trop longues et qu'elles peuvent engendrer des pertes d'eau par percolation sous la zone racinaire dans le type de sol concerné (Bergeron, 2010).

Un essai d'irrigation pulsée a donc été réalisé en 2015 chez un des participants au présent projet. La régie devait être automatisée entièrement à l'aide de tensiomètres à transmission sans fil. Si le fractionnement des apports opérés manuellement s'avère complexe pour la gestion de la main-d'œuvre, l'automatisation demeure de son côté un défi, afin que tous les équipements impliqués (pompes, valves, système de contrôle, tensiomètres, etc.) fonctionnent parfaitement de concert. Ainsi, certains problèmes ont été rencontrés lors de réalisation de l'essai. Les résultats présentés ne concernent que le mois d'août 2015, période au cours de laquelle il a été possible de bien comparer l'irrigation pulsée à celle que le producteur utilise habituellement. Les directives de fonctionnement pour l'irrigation pulsée sont présentées au Tableau 6.

Tableau 6. Directives de fonctionnement pour l'irrigation pulsée.

Potentiel matriciel de déclenchement	-10 à -12 kPa
Durée d'irrigation	30 minutes
Période d'irrigation	Entre 6h00 et 16h00
Période d'attente après chaque irrigation	2 heures

Trois tensiomètres ont été installés dans 3 parcelles différentes à 15 cm de profondeur et la moyenne de la valeur de tension des 3 instruments était utilisée pour déclencher les irrigations. Trois autres tensiomètres ont été mis en place à 30 cm de profondeur afin de guider les durées d'irrigation. Pour les parcelles avec la régie d'irrigation habituelle du producteur, des tensiomètres ont été installés de la même manière et les durées étaient de 60 minutes si une irrigation par jour était effectuée ou de 45 minutes si deux irrigations étaient nécessaires.

Des exemples concrets de fractionnement ont été évalués et l'évolution du potentiel matriciel est présenté aux Figure 20, Figure 21 et Figure 22. La Figure 20 présente l'exemple du 16 août 2015 entre 6 et 20 h. Dans la journée, 3 irrigations de 30 minutes ont été réalisées pour maintenir le statut hydrique du sol dans l'intervalle préalablement établi. L'évapotranspiration potentielle mesurée entre 6 et 20 h a été de 3,8 mm. En se référant au Tableau 5, il est possible d'évaluer le temps théorique d'irrigation à 113 minutes (ET_p à 3,75 mm et potentiel matriciel à -8 kPa). Dans ce cas-ci, 90 minutes d'irrigations ont été suffisantes pour combler la demande en évapotranspiration et augmenter le niveau d'humidité du sol à la capacité au champ à la fin de la journée. Les irrigations pulsées ont permis de combler les besoins et les tensiomètres enfouis à 30 cm de profondeur n'ont indiqué une valeur inférieure à celle de la capacité au champ qu'en fin de journée, suite à la 3^e irrigation. Dans ce cas, il n'y a donc pas eu d'eau perdue sous la zone racinaire, sauf lors du dernier évènement. Le raffinement de l'approche pourrait donc prévoir une modulation de la durée selon la période de la journée.

Lors de cette journée, la simulation théorique aurait potentiellement surestimé le temps d'irrigation de 23 minutes. Il est possible que cet écart puisse être expliqué par le positionnement des tensiomètres à l'intérieur de la butte de sol. En effet, les tensiomètres ont été positionnés pour réaliser un suivi de l'irrigation. Ils ont donc été installés non loin du tube de goutte à goutte. Or, les tensiomètres procurent une mesure du potentiel matriciel de manière très localisée. L'approche théorique considère un potentiel matriciel théorique moyen et uniforme qui représente 100 % du volume du cône d'humectation. Il est donc possible de croire que le potentiel matriciel moyen du cône puisse être différent de celui qui a été mesuré par les tensiomètres.

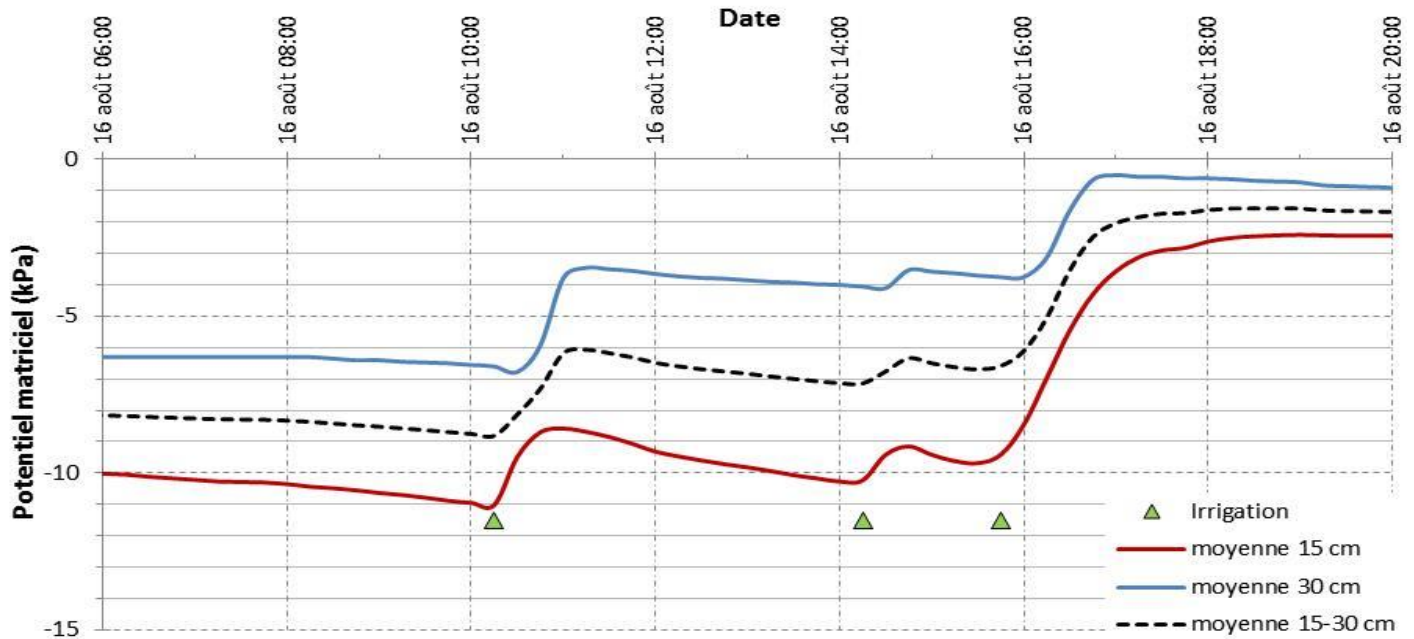


Figure 20. Évolution du potentiel matriciel (kPa) à deux profondeurs (cm) ainsi que les irrigations réalisées au cours de la journée du 16 août 2015.

La Figure 21 présente un autre cas d'irrigation pulsée, lors de la journée du 20 août 2015. Entre 8 et 20 h, près de 4,9 mm d'évapotranspiration potentielle ont été enregistrés. Toujours en se rapportant au Tableau 5, avec une évapotranspiration potentielle de 5 mm et un potentiel matriciel moyen de -10 kPa, le temps d'irrigation théorique recommandé est de 121 minutes. Durant cette journée, 4 irrigations pulsées de 30 minutes ont été réalisées ce qui représente 120 minutes au total. À la fin de la journée, le potentiel matriciel moyen (près de -6 kPa) est inférieur au potentiel à la capacité au champ (-3 kPa). Ainsi, il est possible de croire que le temps d'irrigation théorique aurait sous-estimé le temps réel qui aurait été nécessaire pour maintenir le statut hydrique du sol à la capacité au champ. L'approche théorique calcule le temps d'irrigation nécessaire selon un système complètement chargé et uniforme à 100 %. Il ne considère pas les périodes de chargement du système où le débit réel est inférieur à celui escompté. Le fractionnement du temps d'irrigation en quatre épisodes a mené à quatre périodes de chargement. De cette façon, le volume d'eau appliqué en 120 minutes d'irrigation en pratique ne correspond pas à 120 minutes lorsque le système est en charge.

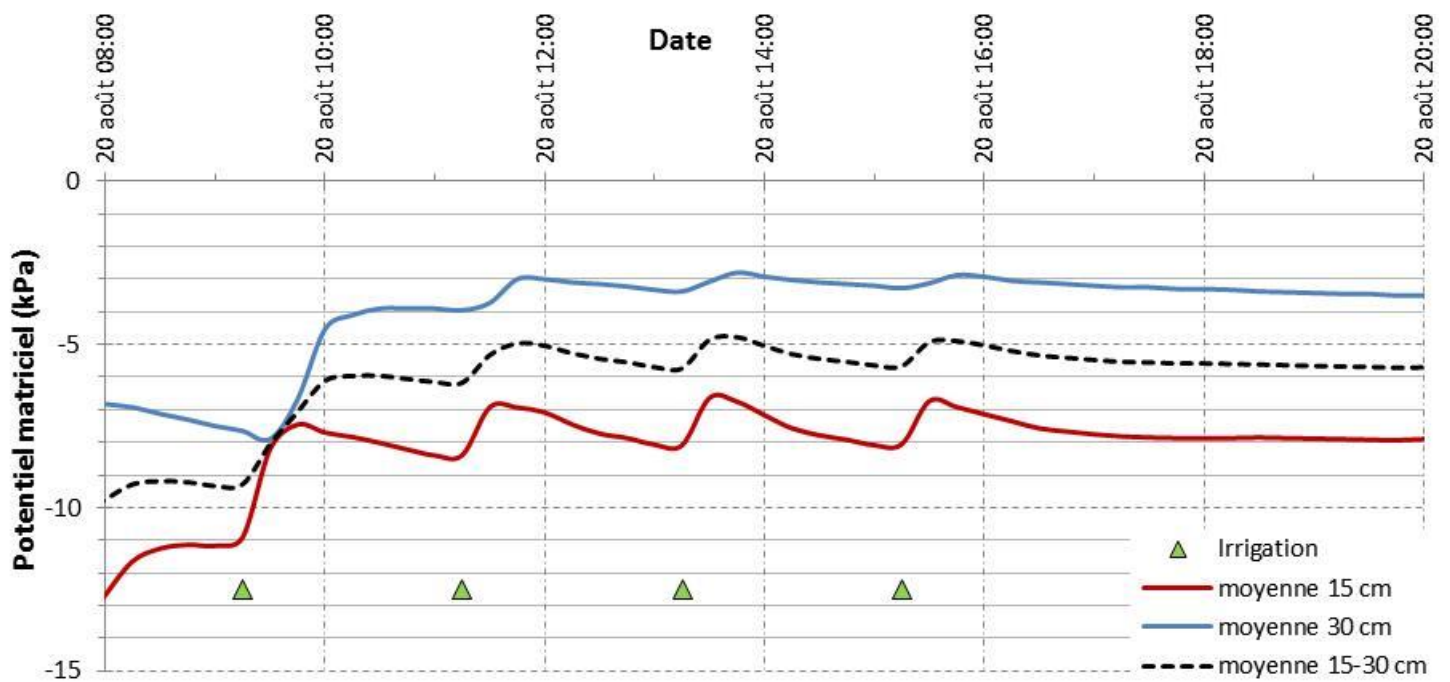


Figure 21. Évolution du potentiel matriciel (kPa) à deux profondeurs (cm) ainsi que les irrigations réalisées au cours de la journée du 20 août 2015.

La durée d'un épisode d'irrigation et le nombre de fractionnements journaliers sont des facteurs importants à évaluer. Dans le cas du traitement avec des irrigations non pulsées, un exemple est présenté à la Figure 22. Durant la même journée que l'exemple précédent, soit le 20 août 2015, 2 épisodes d'irrigations de 45 minutes ont été réalisés pour subvenir aux besoins en eau de la culture. Dans cette parcelle, le statut hydrique du sol à 6 h était différent : le sol était beaucoup plus sec en surface et plus humide en profondeur. La première irrigation de 45 minutes a certes permis de remonter le potentiel matriciel à 15 cm (vers -8 kPa), mais elle a également apporté des conditions anoxiques en profondeur. À la deuxième irrigation, le même phénomène s'est reproduit. La stratification des potentiels matriciels dans le profil influence le volume de sol mouillable. Dans ce cas-ci, une irrigation de 45 minutes a été trop longue pour réhumecter uniquement le sol en surface. Le maintien du potentiel matriciel en profondeur à des valeurs plus élevées que celle de la capacité au champ influence négativement l'absorption de l'eau par les racines. De plus, une certaine partie de l'eau provenant de l'irrigation a été drainée en profondeur, diminuant ainsi l'optimisation de son usage.

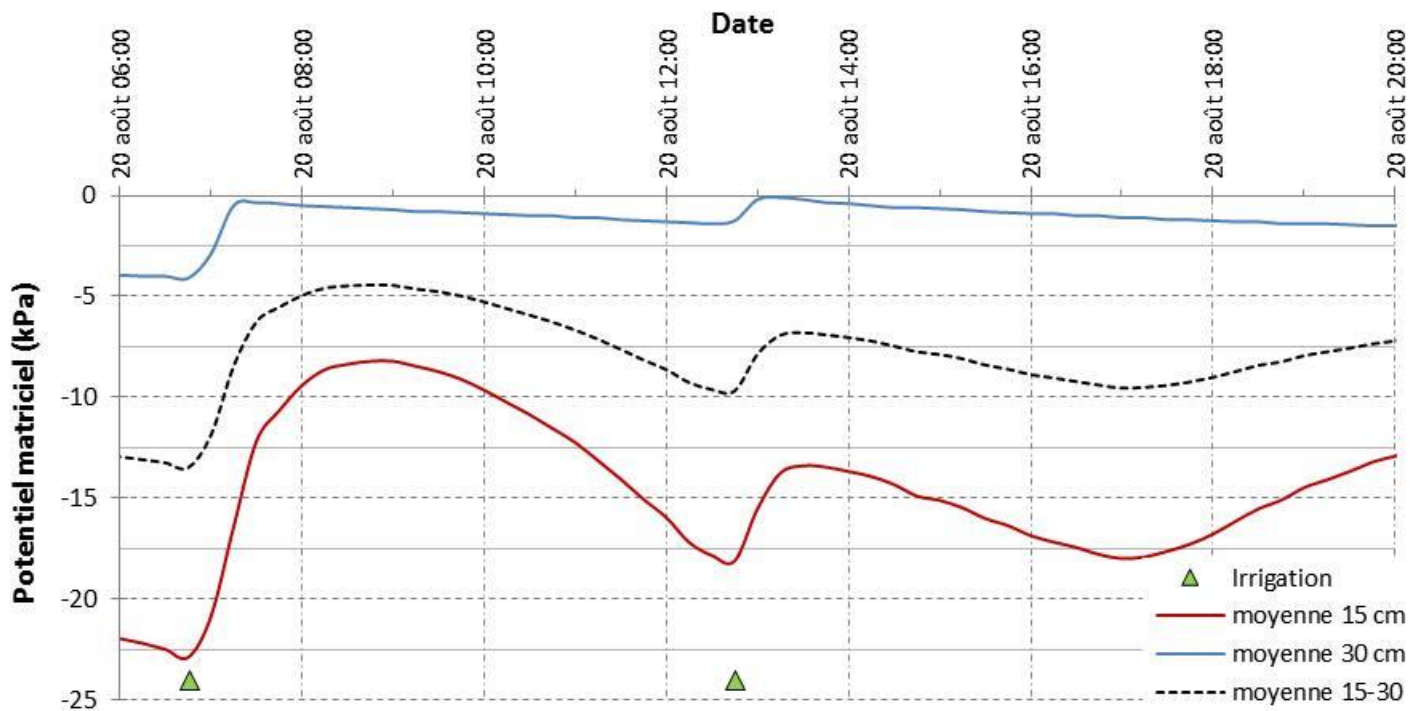


Figure 22. Évolution du potentiel matriciel (kPa) à deux profondeurs (cm) ainsi que les irrigations réalisées au cours de la journée du 20 août 2015.

Diminuer la durée des épisodes d'irrigation et augmenter la fréquence de ces derniers semblent être des stratégies qui permettent de maintenir le potentiel matriciel dans l'intervalle voulu. Le Tableau 7 présente le temps relatif où le potentiel matriciel ne se situait plus dans les limites idéales établies. Ces résultats indiquent que le temps relatif où le potentiel matriciel est inférieur à -10 kPa et supérieur à -3 kPa a été d'une durée relative plus courte avec la régie d'irrigation pulsée (durée des irrigations de 30 minutes). Dans un loam sableux contenant une proportion de fragments grossiers importante, l'irrigation pulsée semble avoir plus efficacement maintenu le statut hydrique du sol dans un intervalle idéal en comparaison avec l'irrigation unique de 60 min ou pulsée de 45 minutes.

Tableau 7. Temps relatif (%) selon la régie d'irrigation utilisée et la profondeur du tensiomètre (cm) où le potentiel matriciel se situait hors des limites prescrites, 1^{er} au 29 août 2015.

Régie d'irrigation	Potentiel matriciel inférieur à -10 kPa			Potentiel matriciel supérieur à -3 kPa		
	15 cm	30 cm	Moyenne 15-30 cm	15 cm	30 cm	Moyenne 15-30 cm
Irrigation pulsée, durée des irrigations de 30 minutes	18,7	2,5	2,8	20,5	51,0	26,1
Irrigation unique de 60 min ou fractionnée d'une durée de 45 minutes	27,5	0,0	7,5	12,4	73,5	38,1

6.3.1 Durée et volume d'irrigation

La durée des épisodes d'irrigation et le nombre de ceux-ci entre les différentes régies à l'essai sont présentés au Tableau 8. Entre le 2 et le 29 août 2015, avec la régie de l'irrigation pulsée, 330 minutes d'irrigation de moins ont été réalisées malgré les 9 irrigations supplémentaires effectuées, soit une diminution de 24,4 %.

Tableau 8. Nombre d'épisode d'irrigation et temps d'irrigation total (minutes) selon les régies d'irrigation à l'essai du 2 au 29 août 2015.

	Irrigation pulsée de 30 min	Irrigation unique de 60 min ou fractionnée de 45 min
Nombre d'épisodes d'irrigation	34	25
Temps d'irrigation total (minutes)	1020	1350

Le suivi et l'évolution de l'évapotranspiration, des irrigations de même que de la pluviométrie permettent de cibler les moments déterminant où les régies semblent se distinguer. Comme l'indique la Figure 23, les précipitations pourraient avoir eu une influence différente selon les régies d'irrigation. Il est possible de croire que l'irrigation pulsée aurait permis de maintenir un statut hydrique du sol, plus particulièrement en profondeur, dans un intervalle plus sec et, de cette manière, elle aurait permis de profiter davantage des apports en eau des précipitations.

Les rendements obtenus dans les deux traitements (pulsée ou non) n'ont pas été significativement différents. Ainsi, l'efficacité d'utilisation de l'eau est grandement améliorée avec l'irrigation pulsée, car pour un même rendement, les quantités d'eau utilisées ont été diminuées de 24,4 %.

Les nombreuses hypothèses formulées au cours de cette section indiquent qu'il reste encore plusieurs éléments de réponse à prouver et démontrer formellement. Bien que l'analyse de ces deux régies d'irrigation n'a pu se faire sur une longue période de la saison, ni sur plusieurs saisons de culture, il demeure intéressant de mentionner que dans les sols drainants, le fractionnement de l'irrigation avec des durées relativement courtes peut être une régie d'irrigation intéressante pour optimiser l'usage de l'eau.

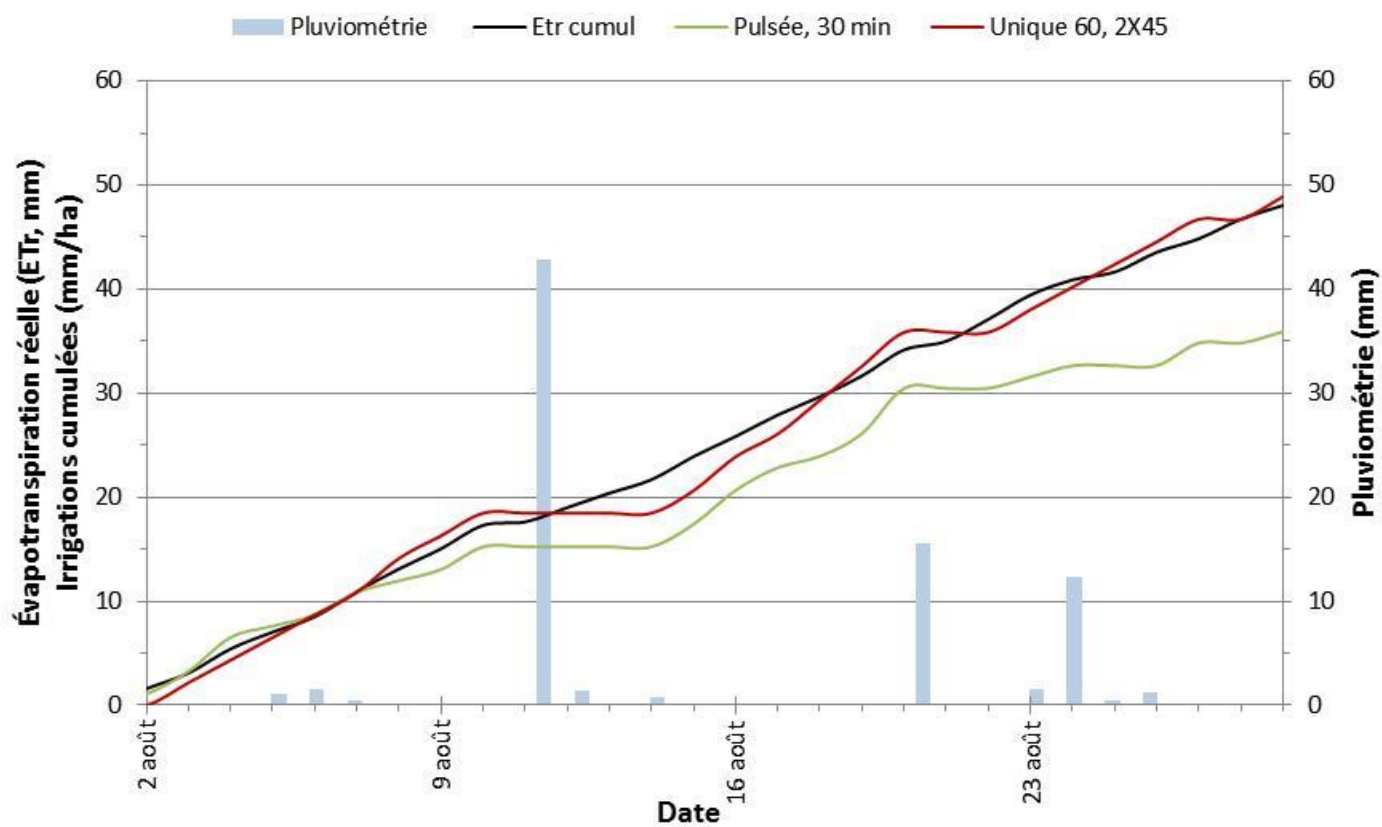


Figure 23. Évolution cumulative de l'évapotranspiration (mm) et des irrigations (mm/ha) ainsi que la pluviométrie (mm) du 2 au 29 août 2015.

Conclusion

De nombreux facteurs interviennent dans l'établissement d'une régie de l'irrigation. Il suffit de penser aux nombreux facteurs humains, techniques, technologiques, économiques ou encore aux ressources disponibles, pour rapidement se rendre compte que tous ces facteurs sont interreliés et que le tout doit être considéré dans l'élaboration et la mise en œuvre d'une régie de l'irrigation. De cette manière, chaque entreprise agricole, dont cet environnement de facteurs est unique, nécessite une régie d'irrigation personnalisée. Intervenir afin d'optimiser la régie de l'irrigation implique des actions concrètes à poser sur plusieurs fronts simultanément.

Tout d'abord, la caractérisation des propriétés physiques du sol demeure certainement un incontournable pour établir les premières bases d'une régie raisonnée de l'irrigation. En ce qui a trait aux réserves facilement utilisables en eau des sols caractérisés chez les 13 entreprises suivies, elles ont varié de 7 à 36 mm pour une profondeur de sol de 30 cm. Avec une bonne connaissance de la capacité de rétention en eau du sol et de la dynamique du mouvement de l'eau dans ce dernier, la régie raisonnée de l'irrigation s'édifie. Maintenant, en considérant la culture, l'établissement d'une consigne d'irrigation devient une autre étape déterminante. À partir de ce point, il a été possible de saisir la limite que certains systèmes d'irrigation ont imposée à l'optimisation de l'irrigation. La performance du système d'irrigation en est un excellent exemple, mais la réflexion ne s'est pas arrêtée ici.

Le suivi rigoureux des besoins en eau d'un verger de pommiers en établissement, réalisé à l'aide de tensiomètres a permis de s'affranchir d'une régie de l'irrigation préétablie et orienter celle-ci vers des interventions qui tiennent compte du besoin réel de la culture. Selon les années, le besoin en irrigation du verger en implantation suivi peut être assez faible, voire nul dans un sol dont la texture est un sable loameux.

Aussi, l'utilisation du bilan hydrique a également été discutée, tout comme le concept de la hauteur d'eau de pluie potentiellement valorisable par la culture. Le suivi de l'irrigation à l'aide de tensiomètres, et ce, dans plusieurs cultures a confirmé une fois de plus l'utilité du tensiomètre pour optimiser la régie de l'irrigation. Finalement, l'approche hybride qui allie la régie d'irrigation à l'aide de la tensiométrie et de l'évapotranspiration semble représenter un grand potentiel pour gérer l'irrigation. De plus, la prévision des besoins en irrigation, des durées d'irrigation et du fractionnement sont des concepts qui doivent être étroitement liés dans les sols drainants.

Les bulletins d'irrigation qui ont été élaborés et diffusés dans ce projet, ont rappelé qu'il existe toujours un besoin d'accompagnement en irrigation. Pour faire suite au projet, une initiative a été élaborée pour développer des outils d'aide à la décision pour une régie raisonnée de l'irrigation dans la production de la pomme de terre. Les conclusions de ce nouveau projet permettront de bien évaluer les besoins et de cibler des axes de développement ayant trait à un service-conseil en irrigation.

Références

- Bergeron, D. 2001a. Réflexion sur la régie de l'irrigation goutte à goutte. Conférence prononcée lors de la Semaine Horticole le 8 février, Conseil Québécois de l'horticulture. 3 p.
- Bergeron, D. 2001b. L'irrigation goutte à goutte en production horticole. Conférence prononcée lors de la journée régionale d'information en horticulture le 20 novembre, MAPAQ, région Capitale-Nationale, p. 1-5
- Bergeron, D. 2003. Micro-irrigation : pour mieux utiliser l'eau efficacement et protéger l'environnement. Conférence prononcée lors d'une journée d'information sur l'irrigation à l'île d'Orléans, le 11 juin, 4 p.
- Bergeron, D. 2004. Outils de régie de l'irrigation. Conférence prononcée lors des Journées horticoles des Laurentides, le 21 janvier, MAPAQ, région des Laurentides.
- Bergeron, D. 2010. Régie de l'irrigation goutte à goutte dans la production de fraises à jours neutres au Québec (Thèse (M.Sc.)). Université Laval. Québec, 57 p. et annexe.
- Bergeron, D. 2015. Régie d'irrigation tensiométrique en pomiculture à l'Île d'Orléans, Conférence prononcée lors des Journées horticoles et grandes cultures de St-Rémi, 3 décembre. [En ligne], https://www.agrireseau.net/documents/Document_91316.pdf
- Bergeron, D. et C. Boivin. 2005. Mieux irriguer avec les tensiomètres. Conférence prononcée lors des Journées horticoles régionales de St-Rémi, le 8 décembre, 7 p., [En ligne], <https://www.agrireseau.net/pdt/documents/Tensiometre.pdf>.
- Bergeron, D., S. Bouchard et J. Noreau. 2006. Une bonne régie de l'irrigation : un gage de qualité. Conférence prononcée lors du Colloque Pomme de terre, le 17 novembre, Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ).
- Bergeron D. et J. Noreau. 2006a. Régie de l'eau – Irrigation goutte à goutte. Producteurs Plus – Zoom Légumes, p. 14-18.
- Bergeron D. et J. Noreau. 2006 b. Efficacité de l'irrigation par aspersion. Conférence prononcée lors des Journées horticoles régionales de St-Rémi, le 7 décembre.
- Boivin, C. et C. Landry. 2008. Cibler le stade phénologique optimal pour amorcer l'irrigation en lien avec le gain en pommes de terre et la perte des nitrates. Rapport final déposé au Syndicat des producteurs de pommes de terre de la région de Québec, IRDA, 51 p., [En ligne], http://www.irda.qc.ca/assets/documents/Publications/documents/boivin-landry-2008_rapport_stade_pheno_irrigation_pdt.pdf
- Boivin, C., C. Landry et J. Caron. 2008. Étude d'acquisition de connaissances sur la détermination de l'existence de patrons éventuels d'assèchement ou d'humidité dans un sol agricole en relation avec le rendement en pommes de terre et la perte de nitrates. Rapport final remis au Syndicat des producteurs de pommes de terre de la région de Québec. IRDA. 47 p.
- Boivin, C. et D. Bergeron. 2015. Pourquoi pas un service-conseil en irrigation? Conférence prononcée lors du Colloque Pomme de terre, le 20 novembre, Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), [En ligne], https://www.craaq.qc.ca/documents/files/EPDT1501/MC05_Boivin_Carl.pdf

Boivin, C. et P. Deschênes. 2011. Stratégies d'irrigation dans la fraise à jours neutres. Projet DS6348 Rapport déposé au CDAQ. IRDA. 98 p.

Bonin, S. 2009. Régie agroenvironnementale de l'irrigation dans la production de canneberges (*Vaccinium macrocarpon Ait.*). Mémoire. Université Laval. 102 p.

CRAAQ (Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec). 2006. L'implantation d'un verger de pommiers, 178 p.

CRAAQ. 2010. Guide de référence en fertilisation du Québec. 2^e Édition. CRAAQ, Québec. 473 p.

Gosselin, L., D. Bergeron et J. Noreau. 2006. La gestion de l'eau en fraisière. Conférence prononcée lors du Colloque sur l'irrigation, le 10 février, Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), 5 p., [En ligne], https://www.agrireseau.net/petitsfruits/documents/Gosselin_Bergeron_Noreau.pdf

Hanson B. et W. Bendixen. 2004. Drip irrigation evaluated in Santa Maria Valley strawberries. California Agriculture, 58 (1): 48-53.

Hartz, T. 1999. Water management in drip-irrigated vegetable production. UC Davis, Vegetable Research and Information Center. 7 p.

Landry, C. et C. Boivin. 2014. Relations entre les nutriments minérale et hydrique : impacts sur la productivité de la pomme de terre et l'utilisation des engrais azotés. Rapport final présenté au CDAQ dans le cadre du PCAA, 53 p., [En ligne], http://www.irda.qc.ca/assets/documents/Publications/documents/landry-boivin-2014_rapport_nutrition_minerale_hydrique_pdt.pdf

Landry, C., C. Boivin et J. Vallée. 2014. Relations entre le statut hydrique du sol et les stades de développement de la pomme de terre irriguée. Rapport final remis au CDAQ, IRDA, 58 p., [En ligne], http://www.irda.qc.ca/assets/documents/Publications/documents/landry-et-al-2014_rapport_statut_hydrique_sol_stades_pdt_irriguee.pdf

Létourneau, G., J. Caron, L. Anderson, et J. Cormier. 2015. Matric potential-based irrigation management of field-grown strawberry : Effects on yield and water use efficiency. Agric. Water Manag., 161, p. 102-113.

Meron, M., R. Hallel, M. Peres, B. Bravdo et R. Wallach. 2001. Tensiometer Actuated Automatic Micro Irrigation of Apples, Proc. Sensors in Hort. III, eds. I. Shumulevicj et al., Acta Hort. 562, ISHS 2001, p. 63-69

Nadon, S., D. Bergeron, C. Boivin et J. Vallée. 2016. Création et validation d'un feuillet technique sur la performance de systèmes d'irrigation par aspersion et par goutte à goutte en champ. Rapport final remis au RLIO, IRDA, 61 p., [En ligne], http://www.irda.qc.ca/assets/documents/Publications/documents/nadons_2016_diagnosticirrigation_rr.pdf

Shackel, K.A., T.L. Prichard et L.J. Schwanki, 2012. Irrigation Scheduling and Tree Stress, Dans Prune production manual, University of California, Agriculture and Natural Resources, Publication 3507, chapitre 12, p.119-134.

Shady, A.M. (éd.) 1989. Irrigation drainage and flood control in Canada. Hull (Québec), 309 p.

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

Vallée, J., C. Boivin, D. Bergeron, R. Audet et F. Chrétien. 2014. Comparaison et évaluation d'outils de gestion de l'irrigation. Rapport final remis au CDAQ, IRDA, 74 p., [En ligne], <http://www.irda.qc.ca/assets/documents/Publications/documents/vallee-et-al-2014-rapport-outils-gestion-irrigation.pdf>

Annexes :

6.4 Évapotranspiration potentielle

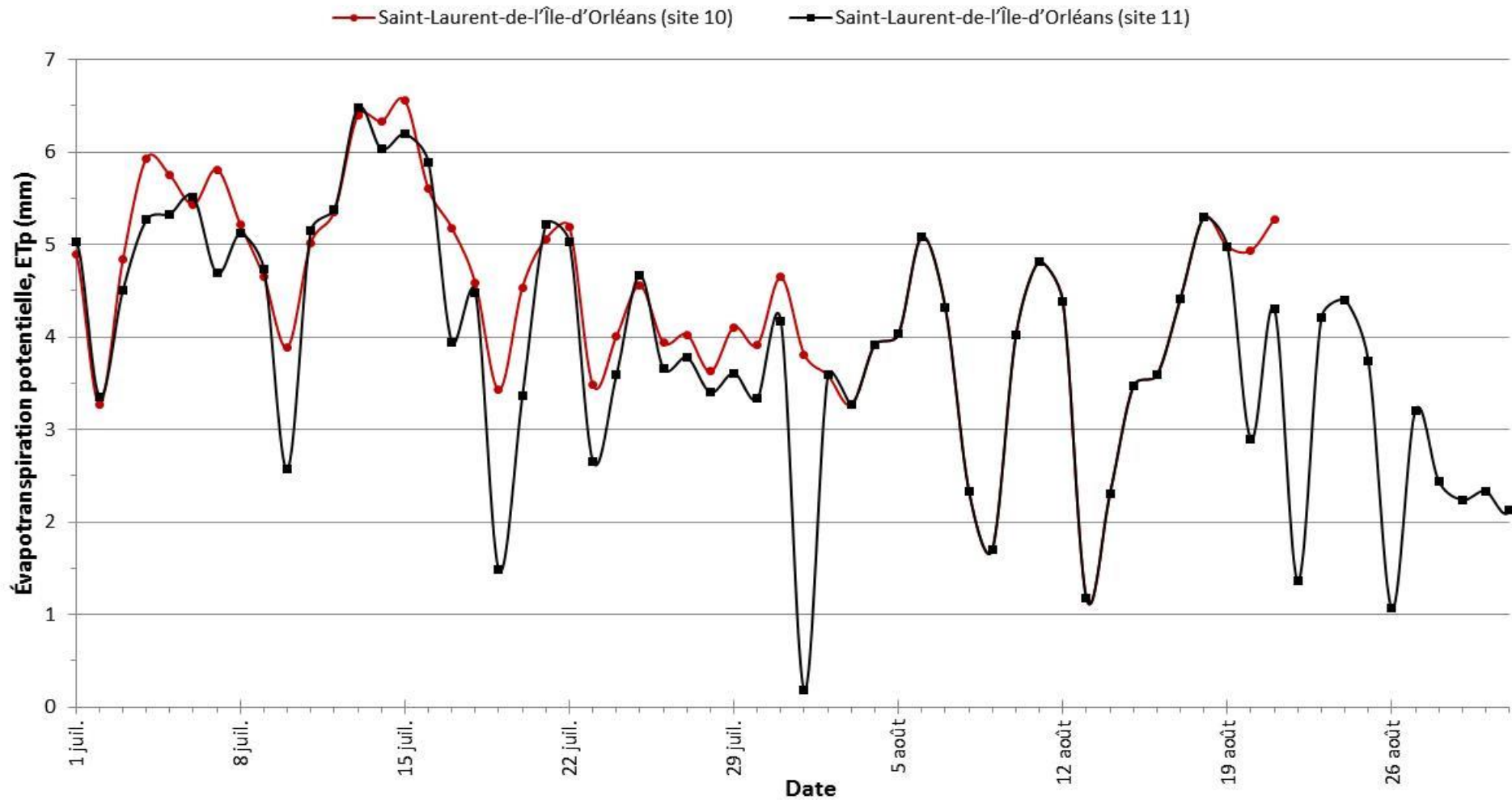


Figure 24. Évapotranspiration potentielle mesurée au cours de la saison 2013 aux sites de Saint-Laurent-de-l'Île-d'Orléans (site 10,11).

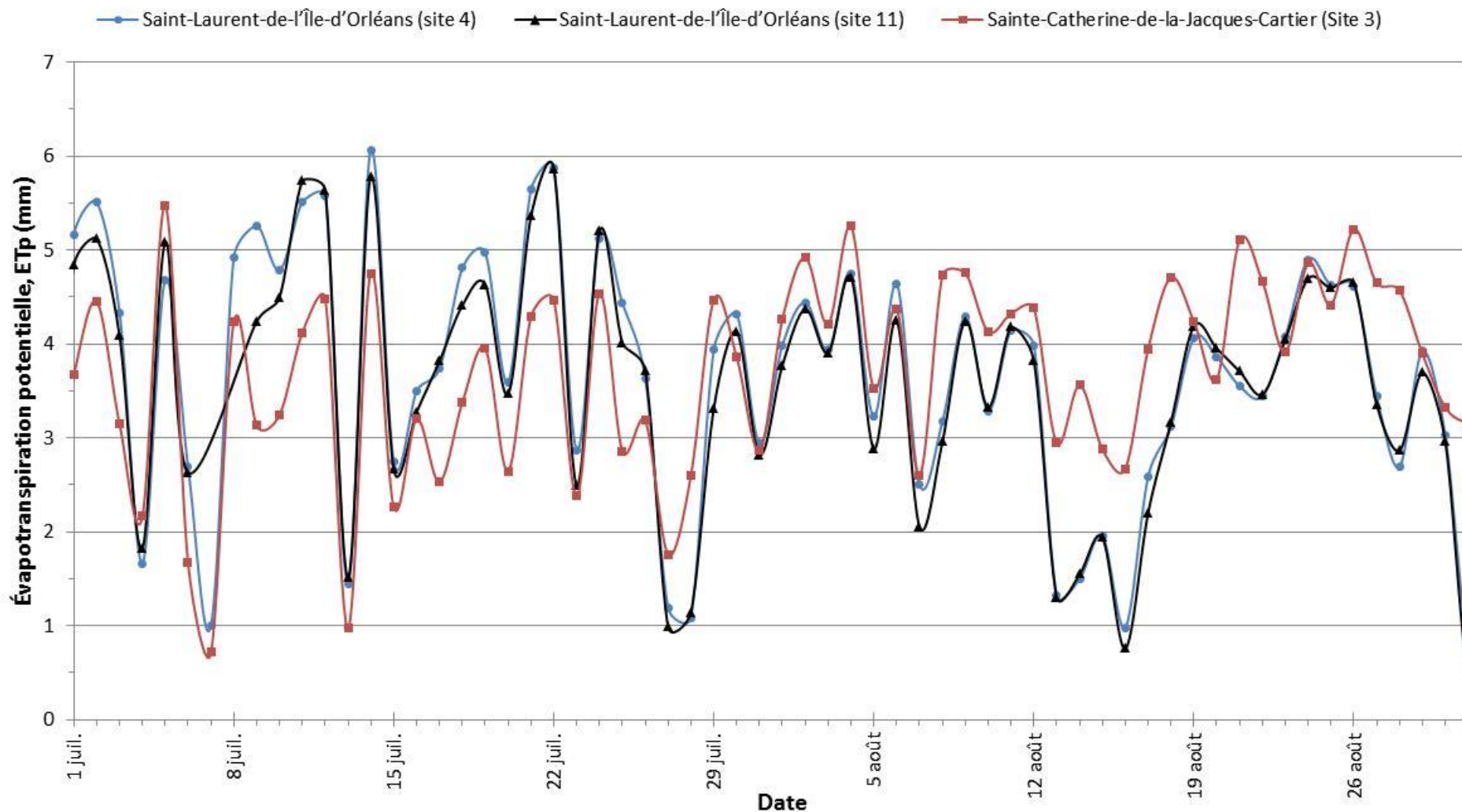


Figure 25. Évapotranspiration potentielle mesurée au cours de la saison 2014 aux sites de Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier (site 3) et Saint-Laurent-de-l'Île-d'Orléans (site 4, site 11).

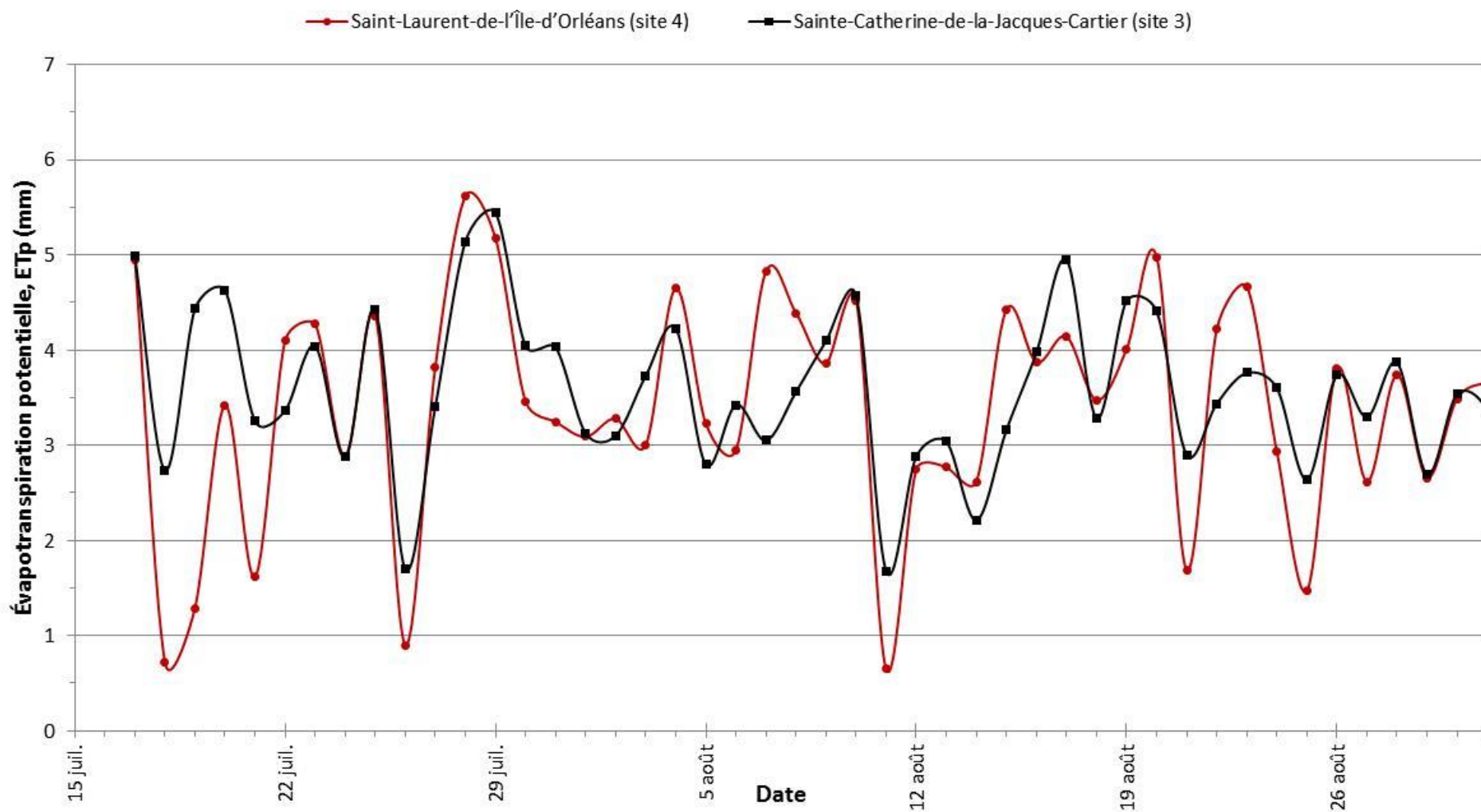


Figure 26. Évapotranspiration potentielle mesurée au cours de la saison 2015 aux sites de Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier (site 3) et Saint-Laurent-de-l'Île-d'Orléans (site 4).

6.5 Pluviométrie

Saison	Site	Précipitation mensuelle (mm) (nombre de jours mesurés)					Cumulatif mm
		Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	
2013	1	24,4 (4)	99,4 (31)	156,6 (31)	62,6 (30)	43,2 (24)	386,2 (120)
	2	35,0 (4)	123,0 (31)	117,8 (31)	75,4 (30)	43,8 (24)	395,0 (120)
	3	79,8 (25)	94,2 (31)	61,4 (31)	61,6 (30)	63,0 (25)	360,0 (142)
	4	118,0 (26)	131,0 (31)	130,2 (31)	91,0 (30)	74,4 (29)	544,6 (147)
	5	61,0 (6)	123,2 (31)	130,4 (31)	78,2 (30)	52,4 (24)	445,2 (122)
	6	35,8 (25)	97,2 (31)	106,4 (31)	81,8 (30)	51,6 (25)	372,8 (142)
	7	114,2 (24)	131,0 (31)	137,8 (31)	74,6 (30)	63,6 (28)	521,2 (144)
	8	45,6 (17)	83,0 (31)	145,0 (31)	59,4 (30)	49,8 (24)	382,8 (133)
	9	105,8 (24)	134,6 (31)	173,8 (31)	87,0 (30)	44,8 (24)	546,0 (140)
	10	122,4 (26)	123,0 (31)	137,6 (31)	78,4 (30)	64,2 (29)	525,6 (147)
	11	121,6 (30)	131,8 (31)	134,4 (31)	71,6 (30)	63,6 (29)	523,0 (151)
	12	63,8 (25)	101,2 (31)	93,2 (31)	110,4 (30)	54,4 (25)	423,0 (142)
	13	85,4 (19)	139,8 (31)	145,8 (31)	72,4 (30)	75,8 (28)	519,2 (139)
2014	1	78,8 (29)	132,8 (31)	90,0 (31)	96,0 (30)	106,4 (31)	504,0 (152)
	2	78,6 (29)	117,8 (31)	96,6 (31)	101,0 (30)	119,6 (31)	513,6 (152)
	3	85,2 (20)	157,2 (31)	163,8 (31)	96,4 (30)	nd	502,6 (112)
	4	78,8 (30)	152,5 (31)	91,6 (31)	101,7 (30)	122,4 (31)	547,0 (153)
	5	86,8 (30)	149,0 (31)	91,4 (20)	nd	nd	327,2 (81)
	6	92,2 (30)	118,6 (31)	196,2 (31)	93,2 (30)	105,2 (23)	605,4 (145)
	7	98,6 (30)	168,8 (31)	118,8 (31)	112,6 (30)	120,4 (30)	619,2 (153)
	8	71,2 (29)	98,4 (31)	101,6 (31)	110,0 (30)	113,4 (31)	494,6 (152)
	9	nd	145,6 (23)	120,0 (31)	118,8 (30)	111 (30)	495,4 (114)
	10	82,8 (30)	124,4 (31)	107,9 (31)	112 (30)	129,5 (31)	556,6 (153)
	11	49,0 (23)	154,0 (29)	118,0 (31)	90,6 (30)	nd	411,6 (113)
	12	142,2 (30)	89,4 (31)	110,4 (31)	85,4 (30)	90,6 (22)	518,0 (144)
	13	79,4 (30)	142,2 (31)	103,4 (31)	107,0 (30)	110,0 (31)	542,0 (153)
2015	1			nd			nd
	2			nd			nd
	3	129,0 (30)	143,6 (31)	107,4 (31)	81,2 (15)		461,2 (107)
	4	155,8 (30)	131,3 (31)	81,4 (31)	66,4 (30)		434,9 (122)
	5	153,6 (30)	131,4 (31)	77,2 (31)	68,6 (30)		430,8 (122)
	6*	129 (30)	143,6 (31)	107,4 (31)	81,2 (15)		461,2 (107)
	7	146,4 (30)	142,4 (31)	80,0 (31)	82,4 (30)		451,2 (122)
	8	146,8 (30)	119,4 (31)	nd	nd	nd	266,2 (61)
	9	141,0 (30)	143,8 (31)	85,4 (31)	70,8 (30)		441,0 (122)
	10	175,4 (30)	140,6 (31)	87,6 (31)	77,7 (30)		481,3 (122)
	11	149,8 (30)	135,2 (31)	80,2 (31)	82,6 (30)		447,8 (122)
	12	136,4 (30)	92,6 (31)	105,6 (31)	79,0 (30)		413,6 (122)
	13	141,6 (30)	119,2 (31)	75,8 (31)	69,2 (30)		405,8 (122)

*Pluviométrie du site 3

L'Hebdeau

Volume 1, No. 11, 4 septembre 2014

Le mois d'AOÛT en quelques statistiques

Paramètre	Site 1	Site 2	Site 3
T min (°C)	5,8 le 29	9,0 le 29	6,3 le 15
T max (°C)	29,5 le 25	28,8 le 25	30 le 24
Pluie max pour 1 jour (mm)	26,5 le 13	35,6 le 13	56,8 le 13
Pluie totale (mm)	91,6	118	163,8
Jours consécutifs sans pluie (nb)	9 (19 au 27)	8 (19 au 26)	9 (19 au 27)
ET _p (mm)	104,9	102,1	127,8

La sonde de réflectométrie métallique en moins de 50 mots

Plusieurs sondes peuvent être utilisées afin de connaître la teneur en eau du sol dans un contexte de recherche et développement. Parmi ces dernières, la sonde de réflectométrie métallique (TDR) est couramment utilisée pour sa précision et sa robustesse. Si vous croisez un scientifique dans votre champ en début de saison, il se peut fort bien qu'il soit en train d'en installer quelques-unes.

Quand est-ce que ça devient intéressant pour la pomme de terre?

Une hausse constante des valeurs de tension est observable au site 3 depuis le 16 août. La valeur du 16 kPa à finalement été atteinte, de peu, le 22 août. Les valeurs de tension étaient inférieures à cette dernière depuis le 27 juillet, soit presque un mois. Un épisode d'irrigation est venu abaisser la tension près de la saturation le 23 août. Le temps chaud et sec et la consommation en eau de la culture permettent ainsi une augmentation plus marquée des valeurs de tension que ce à quoi nous avons été habitués lors des dernières semaines. Effectivement, environ 5 jours suffiront pour que la tension évolue d'un statut près de la saturation à 16 kPa, comparativement à plus d'une vingtaine au cours des mois de juillet et août. L'irrigation du 29 août a permis de rabaisser les valeurs de tension et les épisodes de pluie ont fait en sorte de maintenir ces dernières aux alentours de 5 kPa.

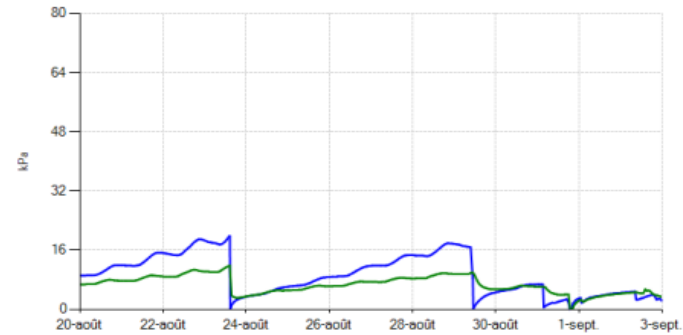


Figure 1. Tensiométrie au site 3, 20 août au 2 septembre 2014.

Les semaines se suivent, mais ne se ressemblent pas!

Les deux dernières semaines ont été visiblement très différentes. La première semaine a été marquée par des températures plutôt chaudes et aucune précipitation n'est survenue tandis que la deuxième s'est caractérisée par des températures plus fraîches (particulièrement vrai la nuit) et de bonnes précipitations. Au niveau du bilan hydrique au site 3 (Figure 2), les apports en pluie n'ont pas été suffisants pour maintenir un statut hydrique du sol idéal. Ainsi, deux irrigations ont été réalisées entre le 20 août et le 2 septembre au site 3.

Dans notre bilan de la semaine, il est intéressant de constater que les deux méthodes semblent fournir des estimations encore une fois très comparables. Si vous vous rappelez du dernier bilan hydrique (12 au 19 août), nous avons soulevé que le bilan hydrique commençait à dériver du bilan tensiométrique. Cet écart s'est poursuivi jusqu'à la prochaine irrigation (23 août). Par la suite, les écarts ont été moins importants. Dans le bilan hydrique de la semaine, nous avons utilisé un coefficient cultural qui reflète davantage le stade physiologique des plants. De manière générale, le coefficient cultural de fin de saison débute environ un mois avant la récolte finale. Dans la littérature, le coefficient cultural de fin de saison pour la pomme de terre est de 0,65. Dans notre bilan hydrique, nous avons plutôt utilisé un coefficient de 0,8. De cette manière, l'estimation de la réserve en eau du sol par le bilan hydrique est plus près de celle fournie par le bilan tensiométrique.

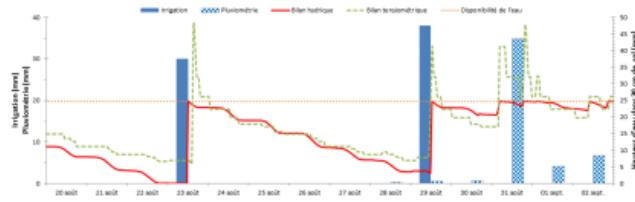
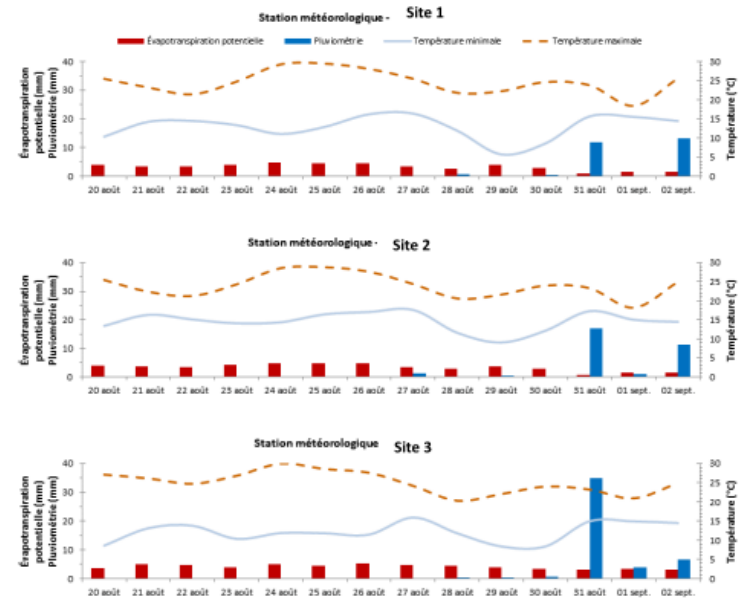


Figure 2 Bilan hydrique et tensiométrique, site 3, 20 août au 2 septembre 2014.

Les besoins en eau ont été fortement en baisse dans les dernières semaines.

Les précipitations et l'évapotranspiration (ET_p et ET_c) mesurées quotidiennement aux sites en pommes de terre et en fraises à jours neutres ont été comptabilisées et sont présentées au tableau suivant (20 août au 2 septembre). Le facteur de correction utilisé pour calculer l'évapotranspiration de la culture (ET_c) est de 0,8 pour la pomme de terre et 0,5 pour la fraise.

Données météorologiques 20 août au 2 septembre 2014.



Pluviométrie et estimation de la hauteur d'eau utilisée par la culture du 20 août au 2 septembre 2014.

Station	Jour (août,sept)	Pluie (mm)	ET _p (mm)	ET _c (mm)	ET _c cumul (mm)
Site 1, Saint-Laurent IO	20	0	3,9	3,1	3,1
	21	0	3,6	2,8	5,9
	22	0	3,4	2,8	8,7
	23	0	4,1	3,3	12,0
	24	0	4,9	3,9	15,9
	25	0	4,6	3,7	19,6
	26	0	4,6	3,7	23,3
	27	0	3,4	2,8	2,8
	28	0,7	2,7	2,2	5,0
	29	0	3,9	3,1	8,1
	30	0,4	3,0	2,4	10,5
	31	11,8	0,9	0,7	11,2
1	0,2	1,4	1,1	12,3	
2	13,3	1,6	1,3	13,6	
Site 2, Saint-Laurent IO	20	0	4,0	2,0	2,0
	21	0	3,7	1,9	3,8
	22	0	3,5	1,7	5,6
	23	0	4,0	2,0	7,6
	24	0	4,7	2,3	9,9
	25	0	4,6	2,3	12,2
	26	0	4,6	2,3	14,6
	27	1,2	3,4	1,7	1,7
	28	0	2,9	1,4	3,1
	29	0,2	3,7	1,8	5,0
	30	0	3,0	1,5	6,5
	31	17	0,5	0,3	6,7
1	0,8	1,3	0,7	7,4	
2	11,2	1,4	0,7	8,1	
Site 3, Ste-Catherine de la J.-C.	20	0	3,6	2,9	2,9
	21	0	5,1	4,1	7,0
	22	0	4,7	3,7	10,7
	23	0	3,9	3,1	13,8
	24	0	4,9	3,9	17,7
	25	0	4,4	3,5	21,3
	26	0	5,2	4,2	25,4
	27	0	4,7	3,7	3,7
	28	0,2	4,6	3,7	7,4
	29	0,4	3,9	3,1	10,5
	30	0,6	3,3	2,7	13,1
	31	34,8	3,2	2,5	15,7
1	4	3,3	2,6	18,3	
2	6,6	3,2	2,6	20,8	

L'édition du 4 septembre 2014 a été élaborée par :

Daniel Bergeron, agr., M.Sc.
daniel.bergeron@mapaq.gouv.qc.ca

Carl Boivin, agr., M.Sc.
carl.boivin@irda.qc.ca

Jérémie Vallée, agr.
[jeremie.vallée@irda.qc.ca](mailto:jerie.m.vallée@irda.qc.ca)

Paul Deschênes, agr., M.Sc.
paul.deschènes@irda.qc.ca



Suivez les mises à jour quotidiennes (pluie, température et demande en évapotranspiration) sur la page Facebook « Eau-Champ » à la section « Le Carnet météo »

<https://www.facebook.com/553087161468867/photos/a.553107451466838.1073741828.553087161468867/568175793293337/?type=1&theater>

