



Comparaison et évaluation d'outils de gestion de l'irrigation

Rapport final

Rapport présenté au :
Conseil pour le développement de l'agriculture
du Québec (CDAQ)

Projet CDAQ # : 6712
Projet IRDA # : 901 017

Rapport élaboré par :
Jérémy Vallée, agr., B. Sc.
Carl Boivin, agr., M.Sc.
Daniel Bergeron, agr., M.Sc.
René Audet, agrométéorologue, M.Sc.
François Chrétien, agr., M.Sc.

Janvier 2014



Institut de recherche
et de développement
en agroenvironnement

Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) s'est engagé à travailler avec des partenaires de l'industrie. Les opinions exprimées dans le présent document sont celles du demandeur et ne sont pas nécessairement partagées par AAC et le CDAQ.

Une partie du financement de ce projet a été assurée par Agriculture et Agroalimentaire Canada, par l'entremise du Programme canadien d'adaptation agricole (PCAA). Au Québec, la part destinée au secteur de la production agricole est gérée par le Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec.



Agriculture et
Agroalimentaire Canada

Agriculture and
Agri-Food Canada

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

Le rapport peut être cité comme suit :

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 pages.

Équipe de réalisation du projet :

Répondant et responsable scientifique : Carl Boivin¹
Chargé de projet : Jérémie Vallée¹
Collaborateurs : Jérémie Vallée¹, Carl Boivin¹, Daniel Bergeron³, René Audet, François Chrétien, Paul Deschênes¹, Stéphane Nadon¹, Jessy Caron (2012)¹, Mélissa Gagnon², Andrew Jamieson³, Bruce Shewfelt², Steve Sager², Daniel Saurette², Patrick Handyside², Ted van der Gulik⁴.

Fermes participantes : Les jardins Ducharme
Groupe Gosselin production FG Inc.

Étudiants d'été : Paul Harrison², Christopher Lee², Antoine Lamontagne, Arianne Blais Gagnon, Mireille Dubuc, Nicolas Watters, Michaël Lemay et Simon Gagnon.

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 #430
Télécopie : 418 644-6855
Courriel : carl.boivin@irda.qc.ca

Remerciements

Une partie du financement de ce projet a été fournie par l'entremise des conseils sectoriels du Québec, de la Colombie-Britannique et de l'Ontario qui exécutent le Programme canadien d'adaptation agricole (PCAA) pour le compte d'Agriculture et Agroalimentaire Canada.

¹ Institut de recherche et de développement en agroenvironnement

² Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Direction régionale Montréal-Laval-Lanaudière

³ Agriculture en Agroalimentaire Canada

⁴ British Columbia Ministry of Agriculture and Lands

TABLE DES MATIÈRES

1	Résumé	1
2	Description du projet	2
2.1	Introduction	2
2.2	Objectif général	4
2.3	Objectifs spécifiques.....	4
3	Matériel et méthode.....	5
3.1	Sites expérimentaux.....	5
3.2	Matériel végétal et régie de culture	6
3.3	Traitements	6
3.4	Dispositifs expérimentaux	6
3.5	Collecte des données	8
3.5.1	Caractérisation physico-chimique des sols	8
3.5.2	Conditions météorologiques.....	9
3.5.3	Tension et teneur en eau volumique du sol dans les parcelles expérimentales.....	9
3.5.4	Stades phénologiques et recouvrement végétal.....	9
3.5.5	Contenu en matière sèche des plants et récoltes préliminaires de tubercules	10
3.5.6	Récolte et évaluation de la qualité.....	10
4	Résultats obtenus et analyse en fonction des objectifs spécifiques.....	12
4.1	Évaluer la performance du modèle de gestion de l’irrigation développé en Colombie-Britannique basée sur le bilan hydrique	12
4.1.1	Analyse de l’interface du logiciel BH	12
4.1.2	Variabilité technologique des valeurs d’évapotranspiration	14
4.1.3	Variabilité spatiale des valeurs d’évapotranspiration.....	18
4.1.4	Détermination des consignes d’irrigation	21
4.1.5	Gestion des consignes d’irrigation avec le logiciel	23
4.1.6	Comparaison du volume des apports en eau par l’irrigation.....	30
4.1.7	Rendements	32
4.1.8	Coefficients culturaux	34
4.1.9	Stades phénologiques	36
4.2	Comparer différents outils de gestion de l’irrigation.....	38
4.3	Évaluer une approche hybride de gestion de l’irrigation (bilan hydrique et appareils de mesure en temps réel).....	41
4.4	Anticipation des besoins en eau des cultures.....	42
4.5	Évaluation économique des différentes méthodes de gestion	45
5	Conclusion.....	47
6	Améliorations du logiciel proposées	48
6.1	L’enregistrement.....	48
6.2	Réinitialisation de la réserve utile	48
6.3	Données météorologiques de l’utilisateur	48

6.4	Calendrier d'irrigation	48
6.5	Réserve facilement disponible à la plante	49
6.6	Coefficients culturaux.....	49
6.7	Paillis et couverts végétaux	49
6.8	Historique	50
6.9	Mise à jour des stations météorologiques.....	50
6.10	Révision de la version française de l'interface web.....	50
7	Diffusion des résultats	50
8	Bibliographie.....	51
9	Annexe	53
9.1	Équation Penman-Montheith.....	53
9.2	Équation Baier-Robertson	53
9.3	Paramètres utilisés dans l'interface du bilan hydrique	54
9.4	Photographies	55
9.5	Pluviométrie.....	73

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Diagramme triangulaire des classes de texture de sols (AAC, 2002).....	5
Figure 2. Schéma du dispositif de Ste-Mélanie.....	7
Figure 3. Schéma du dispositif de Lanoraie.....	7
Figure 4. Schéma du dispositif de Deschambault.....	8
Figure 5. Une des fenêtres de l'interface du logiciel du bilan hydrique.....	13
Figure 6. Évapotranspiration journalière mesurée par les deux stations météorologiques situées au site de Deschambault, saison 2012.....	16
Figure 7. Évapotranspiration journalière mesurée par les deux stations météorologiques situées au site de Deschambault, saison 2013.....	17
Figure 8. Valeurs d'évapotranspiration calculées à partir de stations météorologiques situées au site de Deschambault et à proximité, saison 2012.....	19
Figure 9. Valeurs d'évapotranspiration calculées à partir de stations météorologiques situées au site de Deschambault et à proximité, saison 2013.....	20
Figure 10. Courbe de désorption en eau du sol des trois sites, saison 2012.....	22
Figure 11. Courbe de désorption en eau du sol des trois sites, saison 2013.....	22
Figure 12. Suivi tensiométrique et dates d'irrigation réelles et simulées à l'aide du logiciel du bilan hydrique au site de Deschambault, saison 2012.....	25
Figure 13. Suivi tensiométrique et dates d'irrigations fournies par le logiciel du bilan hydrique au site de Ste-Mélanie, saison 2013.....	26
Figure 14. Suivi tensiométrique et dates d'irrigations fournies par le traitement tensiométrique au site de Ste-Mélanie, saison 2013.....	27
Figure 15. Suivi tensiométrique et dates d'irrigations fournies par le logiciel du bilan hydrique au site de Deschambault, saison 2013.....	28
Figure 16. Suivi tensiométrique et dates d'irrigations fournies par le traitement tensiométrique au site de Deschambault, saison 2013.....	29
Figure 17. Influence du K_c sur l'évapotranspiration, Deschambault, saison 2012.....	35
Figure 18. Évapotranspiration cumulative (mm) à Ste-Mélanie, saison 2013.....	36
Figure 19. Courbe de désorption en eau du sol réalisée au champ, saison 2012.....	39
Figure 20. Courbe de désorption en eau du sol réalisée au champ, saison 2013.....	39
Figure 21. Anticipation du nombre de jours jusqu'à la prochaine irrigation par l'interface du bilan hydrique.....	42
Figure 22. Anticipation du nombre de jours entre les irrigations avec la régie tensiométrique au site de Ste-Mélanie, saison 2013.....	44
Figure 23. Précipitations (mm) mesurées au site de Ste-Mélanie, saison 2012.....	73
Figure 24. Précipitations (mm) mesurées au site de Ste-Mélanie, saison 2013.....	73
Figure 25. Précipitations (mm) mesurées au site de Lanoraie, saison 2012.....	75
Figure 26. Précipitations (mm) mesurées au site de Lanoraie, saison 2013.....	75
Figure 27. Précipitations (mm) mesurées au site de Deschambault, saison 2012.....	76
Figure 28. Précipitations (mm) mesurées au site de Deschambault, saison 2013.....	76

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques du sol des parcelles expérimentales.....	21
Tableau 2. Apports en eau d'irrigation moyens selon le traitement en juillet et août 2012 et 2013.	31
Tableau 3. Potentiel de rendements et qualité des haricots extra-fins selon le traitement et la saison, Ste-Mélanie.	33
Tableau 4. Potentiel de rendements et qualité des tubercules selon le traitement et la saison, Deschambault.	33
Tableau 5. Potentiel de rendements et qualité des tubercules selon le traitement et la saison, Lanoraie.....	34
Tableau 6. Évolution des stades phénologiques selon les traitements, Ste-Mélanie, saison 2012.	37
Tableau 7. Évolution des stades phénologiques de la <i>Goldrush</i> au site de Deschambault.	38
Tableau 8. Comparaison de différents outils de gestion de l'irrigation.	40
Tableau 9. Liste des prix des équipements nécessaire à la gestion de l'irrigation.....	46
Tableau 10. Paramètres du bilan hydrique par défaut et modifiés.	54

1 Résumé

Durant les saisons 2012 et 2013, une gestion de l'irrigation basée sur le bilan hydrique a été explorée et comparée à d'autres outils de gestion comme le tensiomètre et la sonde réflectométrique. La performance d'un logiciel d'aide à la décision, développé en Colombie-Britannique (*Landscape Irrigation Scheduling Calculator*), a été évaluée au Québec. Cet outil est utilisé pour estimer quotidiennement le statut hydrique du sol. Ce logiciel utilise les valeurs d'évapotranspiration générées par la station météorologique de son choix, membre du réseau d'Agrométéo Québec ou directement sur son entreprise.

Les différents outils de gestion de l'irrigation ont été comparés entre eux selon leur capacité à cibler une consigne d'irrigation spécifique, soit 50 % de la réserve utile en eau du sol. La régie d'irrigation sous gestion tensiométrique a été établie comme étant la référence, car il s'agit de mesures directes du statut hydrique du sol. Durant l'été 2012, l'outil basé sur le bilan hydrique a été évalué sans modifier les valeurs fournies par l'interface. La performance mesurée avec les valeurs par défaut a été peu convaincante, en ne réalisant que très peu de concordances en termes de date d'irrigation comparativement aux autres outils de gestion. Par la suite, une version dite bonifiée a été mis de l'avant, où les valeurs par défaut ont été remplacées par celles issues de la caractérisation physique du sol des sites expérimentaux. Une simulation a été effectuée à l'aide de ces données et celle-ci aurait nettement mieux performé, en réalisant davantage de concordances pour 2012. En 2013, la version bonifiée a bien performé et se compare aux autres outils de gestion de l'irrigation.

Comparativement à la saison 2012, les irrigations réalisées en 2013 ont été moins nombreuses laissant ainsi la possibilité d'évaluer la performance globale d'une gestion basée sur le bilan hydrique lors de saison à faible et à forte demande en évapotranspiration. Ainsi, il a été possible d'observer que le bilan hydrique performe davantage lors de saisons où la demande en évapotranspiration est faible, telle qu'en 2013. Le volume d'eau alors utilisé avec la gestion de l'irrigation basée sur le bilan hydrique bonifié a été plus élevé d'au plus 20 % par rapport à la gestion tensiométrique, et ce, pour l'ensemble des sites et des années.

Dans le cadre d'une gestion raisonnée de l'irrigation, l'anticipation des besoins en eau des cultures est importante afin de bien planifier les opérations au champ. À ce titre, le logiciel évalué dans le cadre du projet détient un net avantage sur les autres outils. En intégrant une estimation du statut hydrique du sol ainsi que les prévisions météorologiques, l'outil anticipe les besoins en eau des cultures pour les prochains jours. Cet aspect est d'autant plus important dans les systèmes culturels où les superficies en culture sont élevées.

Quoique les résultats indiquent que la méthode du bilan hydrique n'est pas aussi précise que la régie par tensiomètre, une approche hybride serait toutefois à privilégier. Cette approche combinerait les avantages conséquents à l'utilisation du bilan hydrique et du tensiomètre.

2 Description du projet

2.1 Introduction

Pour qu'une régie d'irrigation soit optimale, les apports en eau doivent être effectués au moment opportun et tenir compte à la fois des besoins de la plante, des caractéristiques du sol et des conditions météorologiques. Peu de producteurs utilisent des instruments de mesure pour déterminer à quel moment déclencher les irrigations. Ces derniers basent généralement leur décision sur l'aspect visuel de la culture et sur le toucher du sol, ce qui conduit souvent à une gestion inefficace de la ressource en plus de représenter des risques de pollution diffuse. À titre d'exemple, Giroux et Sarrasin (2011) rapportent que l'eau de 69 % des 77 puits d'eau potable (producteurs de pommes de terre ou voisinage) échantillonnés dans 5 régions du Québec contenait des pesticides. La même étude rapporte également que l'eau de 40 % des puits échantillonnés avait des concentrations en nitrates supérieures à la norme pour l'eau potable. Sans toutefois établir un lien direct entre l'irrigation et la pollution diffuse, les conclusions de cette étude mettent en lumière le lien étroit entre la pollution diffuse et la dynamique de l'eau dans le sol.

Il existe des outils de régie permettant de mesurer en temps réel la situation au champ et ainsi préciser le bon moment pour irriguer, les tensiomètres en sont de très bons exemples. Les cultures, où les revenus par unité de surface sont très élevés (ex. : fraise, framboise et bleuet en corymbe), la gestion en temps réel de l'irrigation justifie les investissements importants reliés aux équipements de mesure. Pour les systèmes plus extensifs, irrigués par aspersion où les revenus par unité de surface sont beaucoup moins élevés, la décision d'investir dans l'achat de plusieurs appareils de mesure peut être plus difficile à justifier pour les entreprises. Dans de tels cas, l'approche par bilan hydrique, qui tient compte des précipitations et de l'évapotranspiration de la culture, est souvent présentée comme une solution intéressante. En ce sens, une approche de gestion de l'irrigation par le bilan hydrique a été développée en Colombie-Britannique (C.-B.) par l'*Irrigation Industry Association of British Columbia* sous la gouverne de M. Ted Van Der Gulik du ministère de l'Agriculture de la C.-B. La collaboration de la Colombie-Britannique (M. Ted Van Der Gulik) a permis d'évaluer la performance de cette méthode qui s'appuie sur une interface conviviale disponible via un site internet. Ainsi, il est possible de spécifier plusieurs informations afin de préciser les paramètres propres à la culture et à la régie d'irrigation. Grâce à ces informations et à la consultation de données climatiques, une approximation du temps avant le prochain épisode d'irrigation est générée. Ce modèle, par sa disponibilité et sa capacité d'adaptation aux différentes régies d'irrigation, demeure un outil très prometteur. Par contre, un modèle basé principalement sur des données météorologiques et qui ne tient compte que d'une estimation du statut hydrique du sol pourrait conduire à des biais importants dans les prévisions.

La pomme de terre est un bon exemple de culture produite sur de grandes superficies qui a recours à l'irrigation. En effet, entre 2000 et 2012, les superficies de pommes de terre irriguées auraient augmenté considérablement passant de 3260 à 5300 ha (BPR, 2003; Bergeron, 2012). D'ailleurs, différents projets portant sur la gestion de l'eau d'irrigation dans la pomme de terre ont

été réalisés ces dernières années dans la région de Québec et ailleurs au Canada. Les essais réalisés au Québec ont démontré qu'un surplus d'eau affecte négativement le rendement (Boivin et Landry, 2008; Boivin et coll., 2008). En ce sens, le déclenchement de l'irrigation lorsque 50 % de la réserve en eau utile du sol est épuisée s'est avéré optimal d'un point de vue environnemental et économique (Boivin et Landry, 2011).

Une approche hybride qui considérerait le bilan hydrique pour prévoir les interventions, associée à un nombre limité de mesures en temps réel du statut hydrique du sol dans des champs témoins, permettrait de gérer de grandes superficies de façon plus efficace en réunissant les avantages des deux approches. De plus, contrairement aux systèmes par goutte-à-goutte qui sont fixes, ceux par aspersion (rampes, pivots, canons, etc.) demandent généralement plus de temps pour irriguer (déplacement du système d'un champ à un autre et vitesse d'avancement limitée lors de l'application). Ainsi, prévoir quelques jours à l'avance les champs qui seront à irriguer est un avantage certain. Enfin, le modèle de bilan hydrique développé en C.-B. ne permet pas de corriger les possibles biais dans la prévision, ce que l'approche hybride permettrait à l'aide de mesures quantitatives effectuées sur le terrain.

2.2 Objectif général

Améliorer la gestion de l'irrigation afin de maximiser les gains économiques et environnementaux.

2.3 Objectifs spécifiques

- Évaluer la performance du modèle de gestion de l'irrigation développé en C.-B. basée sur le bilan hydrique;
- Comparer et évaluer différents outils de gestion de l'irrigation;
- Évaluer une approche hybride de gestion de l'irrigation (bilan hydrique et appareils de mesure en temps réel);
- Anticiper les besoins en eau de la culture quelques jours à l'avance;
- Évaluation économique des différentes méthodes de gestion.

3 Matériel et méthode

3.1 Sites expérimentaux

Les dispositifs expérimentaux étaient situés dans des champs en production commerciale de pommes de terre et de haricots extra-fins chez deux entreprises agricoles. Ces dernières, Les Jardins Ducharme (46,10° N, 73,50° O) et La Ferme Sylvain Tarte (46,01° N, 73,21°O) (Groupe Gosselin Production FG), étaient localisées respectivement à Sainte-Mélanie et à Lanoraie dans la région de Lanaudière au Québec. Un troisième site expérimental était situé sur la ferme expérimentale de l'IRDA à Deschambault dans la région de la Capitale-Nationale (46,67 ° N, 71,916881 °O). Les sols où les dispositifs expérimentaux ont été établis appartiennent à la série de sols Uplands à Sainte-Mélanie, à la série Lanoraie à Lanoraie ainsi qu'à la série Chicot à Deschambault. La texture du sol a été déterminée grâce au diagramme triangulaire des classes de texture de sols (Figure 1) et aux analyses granulométriques effectuées en laboratoire.

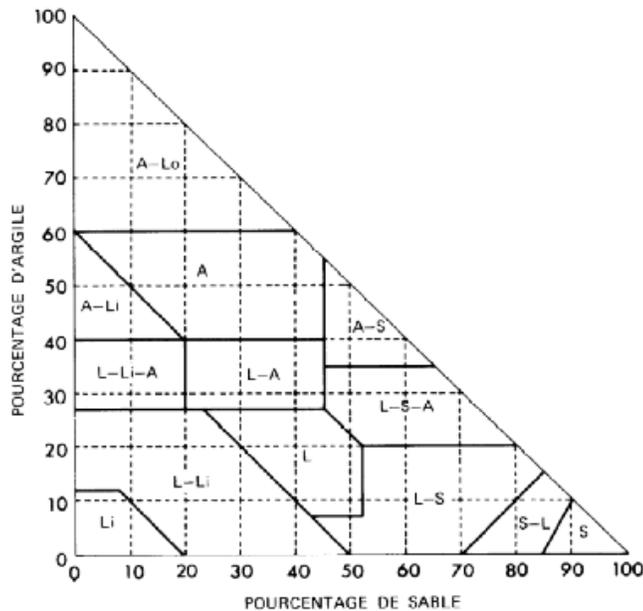


Figure 1. Diagramme triangulaire des classes de texture de sols (AAC, 2002).

3.2 Matériel végétal et régie de culture

Deux des trois sites ont été implantés en pommes de terre et sont localisés à Deschambault (cv *Goldrush*) et à Lanoraie (cv. *Russet Burbank*). Le site en haricots extra-fins (cv. *Denver* et *Anger*) a été implanté à Sainte-Mélanie. Les essais ont été réalisés en conditions de production commerciale et selon la régie de culture du producteur (travail du sol, implantation, fertilisation et traitements phytosanitaires) pour les sites situés à Lanoraie et à Sainte-Mélanie. Pour ce qui est du site de Deschambault, les opérations culturales ont été sous la supervision de l'équipe de l'IRDA.

3.3 Traitements

Les différents sites ont permis de comparer jusqu'à trois outils de gestion de l'irrigation. La consigne retenue pour déclencher un épisode correspond à 50 % de la réserve en eau utile du sol en culture (RU). Hormis le témoin non irrigué, les outils comparés sont :

T1 - Modèle de bilan hydrique (BH) développé en C.-B.;

T2 - Modèle de la C.-B. et ajustements des prévisions à l'aide de tensiomètres;

T3 - Modèle de la C.-B. et ajustements des prévisions à l'aide de sondes réflectométriques (Deschambault seulement);

Témoin non irrigué.

La durée d'un épisode est déterminée en fonction de la profondeur d'enracinement de la culture et de l'état hydrique du sol au moment de déclencher l'irrigation. Ainsi, les pertes d'eau en dehors du système racinaire sont minimisées.

3.4 Dispositifs expérimentaux

Le dispositif expérimental qui a été utilisé pour les sites de Lanoraie et de Sainte-Mélanie est un plan en blocs aléatoires avec 3 traitements et 4 blocs pour un total de 12 unités expérimentales ou parcelles par site (Figure 2, Figure 3). Pour le site de Deschambault, un traitement où des sondes réflectométriques sont utilisées pour déclencher l'irrigation s'est ajouté aux trois autres. Conséquemment, ce dispositif compte 4 traitements et 4 blocs pour un total de 16 parcelles (Figure 4).

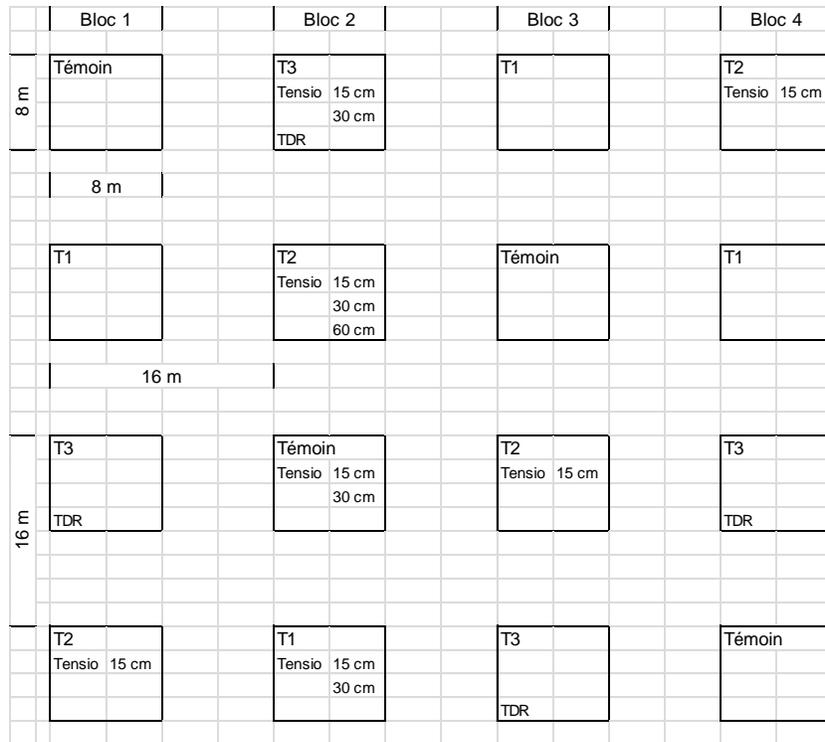


Figure 4. Schéma du dispositif de Deschambault.

3.5 Collecte des données

3.5.1 Caractérisation physico-chimique des sols

Des analyses de sol ont été réalisées sur des échantillons composites prélevés dans la strate de sol 0-20 cm dans chacun des blocs aux 3 sites expérimentaux. Les sols ont été tamisés à 2 mm puis séchés à l'air à 21 °C. La granulométrie a été déterminée par la méthode de l'hydromètre en six points suivis d'un tamisage des sables (Gee et Bauder, 1986). Le pH_{eau} a été mesuré dans un rapport sol/eau 1:1 (CPVQ, 1988). Le contenu en matière organique (MO) totale a été mesuré selon la méthode d'oxydation par voie humide de Walkley-Black (Allison, 1965). Le N_{tot} , préalablement extrait par digestion Kjeldahl, a été déterminé par colorimétrie sur autoanalyseur Technicon (McGill et Figueiredo, 1993). Le phosphore (P), le potassium (K), le calcium (Ca), le magnésium (Mg) et l'aluminium (Al) ont été extraits dans une solution Mehlich-3 (Tran et Simard, 1993) et dosés à l'ICP optique. Des échantillons de sol non perturbé ont également été prélevés dans chacun des blocs afin d'établir en laboratoire les courbes de désorption en eau des sols (Topp et coll., 1993). Pour le site de Deschambault, cette caractérisation a seulement été effectuée en 2012, car les essais ont été effectués sur le même site en 2013. Pour les sites chez les producteurs, la caractérisation a été effectuée aux printemps 2012 et 2013, car les dispositifs ont changé d'endroits annuellement.

3.5.2 Conditions météorologiques

La pluviométrie (pluviomètre HOBO, modèle RG3-M) a été mesurée tout au long de la saison (section 9.5) ainsi que la température et l'humidité relative de l'air ambiant avec des acquyseurs de données HOBO Pro v2 (modèle U23-001). Des stations météorologiques, situées à chacun des sites, ont permis de mesurer la température et l'humidité relative (HC2-S3, Campbell Scientific), la radiation solaire (LI-200SZ, LI-COR), la vitesse et la direction du vent (Wind monitor, Young Model 05103-10) ainsi que la pluviométrie (TE525WS, Campbell Scientific)(Annexe, Photographie 1). Les données sont enregistrées chaque heure avec un acquyseur de données CR1000 (Campbell Scientific). Aussi, une station météorologique (Base RF, Hortau) a été installée sur le site de Deschambault.

3.5.3 Tension et teneur en eau volumique du sol dans les parcelles expérimentales

La tension de l'eau dans le sol (potentiel matriciel) a été mesurée tout au long du projet avec des tensiomètres de marque Hortau (modèles Tx-3 et Tx-80) (Photographie 2) afin de gérer les épisodes d'irrigation. Chacune des parcelles du traitement basé sur la tensiométrie était équipée d'un tensiomètre. De plus, pour chacun des sites, l'ensemble des traitements d'un bloc était également équipé d'un tensiomètre. Enfin, pour chacun des sites et dans une parcelle, un tensiomètre était installé à 30 et 60 cm de profondeur. Toutes ces données étaient enregistrées en temps réel dans un ordinateur à l'aide du logiciel Irrolis-Light (version 1.9, version 3) de Hortau, afin d'effectuer des analyses quant à l'efficacité des différents traitements d'irrigation. En ce qui a trait au traitement supplémentaire au site de Deschambault, la gestion des apports en eau était basée sur la mesure de la teneur en eau volumique du sol avec des sondes TDR sans fil (CWS655, Campbell Scientific) (Photographie 3). Ces données étaient enregistrées avec un acquyseur de données (CR1000) à une fréquence de 15 minutes.

3.5.4 Stades phénologiques et recouvrement végétal

Dès la semaine suivant le semis, pour la culture de haricots extra-fins, un suivi hebdomadaire des stades phénologiques et du recouvrement végétal a été entrepris. Dans le cas de la culture de pommes de terre, les stades phénologiques ont été estimés sur l'ensemble des parcelles uniquement à Deschambault tandis que le recouvrement végétal n'a pas fait l'objet d'un suivi sur les deux sites. Le stade phénologique a été déterminé en observant les plants d'une zone prédéterminée, d'une longueur de 1,4 m, localisée au même endroit pour toutes les parcelles. Les stades phénologiques considérés font partie de l'échelle BBCH (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt and Chemical industry) (Zadoks et coll., 1974). Les différents stades retenus sont : germination, feuille, floraison ainsi que la fructification. Ces derniers sont subdivisés en sous stades et doivent être évalués en fonction de leur proportion observable dans la zone de mesure. Cette même zone permet d'évaluer le recouvrement du sol par le couvert végétal de la culture. Une zone de trois rangs est alors photographiée. Par la suite, un traitement photographique (ImageJ, National Institutes of Health) permet d'isoler la couleur verte du feuillage et ainsi calculer le pourcentage de recouvrement de la culture (Photographie 4 et

Photographie 5). Cette aire est photographiée à raison d'une fois par semaine afin d'évaluer le taux de croissance végétative des plants.

3.5.5 Contenu en matière sèche des plants et récoltes préliminaires de tubercules

Bihebdomadairement, dès la semaine suivant le semis, pour la culture de haricots extra-fins, le contenu en matière sèche des plants a été mesuré. Pour ce faire, 5 plants consécutifs, dans une zone prédéterminée de la parcelle, ont été prélevés, puis séchés à 105 °C, pour être finalement pesés. Pour les sites en pommes de terre, une récolte de tubercules durant la saison a eu lieu le 16 et le 23 juillet en 2012, le 25 juillet et 30 juillet en 2013 pour les sites de Deschambault et de Lanoraie respectivement. Pour ce faire, la production en tubercules de trois plants de pommes de terre, situés sur un même rang, a été prélevée dans chacune des parcelles. Les tubercules étaient pesés individuellement et la masse sèche de la partie aérienne du plant était pesée après avoir été séchée à 105 °C.

3.5.6 Récolte et évaluation de la qualité

Une récolte finale a été réalisée sur chacun des sites afin de mesurer le rendement total, vendable et la qualité de la récolte. Pour les sites en pommes de terre, la récolte consistait à récupérer les tubercules sur 4 m (2 fois 2m dans certains cas) pour chacun des deux rangs centraux de chacune des parcelles. Les tubercules ont été classés par calibre. Les rendements totaux et vendables (Ronde : Canada N° 1 excluant les grelots de 1,9 cm à 4,1 cm de diamètre; longue : Canada N° 1 excluant les grelots de moins de 5,1 cm de diamètre) ont été déterminés. La qualité des tubercules a aussi été établie et la présence de gale commune (*Streptomyces scabies*) a été évaluée. L'évaluation du degré d'infestation des tubercules par la gale commune a été réalisée à partir d'une méthode développée par Otrysko et Banville de la Station de recherche Les Buissons du MAPAQ (Otrysko et coll., 1984). L'indice de gale calculé par cette méthode utilise un facteur de pondération variant de 1 à 5, qui tient compte à la fois de l'étendue et du type de symptôme observé sur les tubercules. Vingt-cinq tubercules (calibre Canada N° 1) sont prélevés de façon aléatoire dans chacun des lots récoltés. Chacun des tubercules a été classé selon une sévérité croissante des dégâts (superficiels, pustules, confluent ou creux profonds) et selon la superficie couverte par les dommages sur le tubercule (0 % à trace, trace à 5 %, 5-20 %, 20-40 %, 40 % et +). Le nombre total de tubercules par catégorie est ensuite calculé. Le facteur de pondération approprié est attribué à chacune des catégories en fonction de l'intensité de la combinaison sévérité et étendue des dommages. L'indice de gale est calculé en additionnant les résultats issus de la multiplication du nombre de tubercules d'une catégorie par son facteur de pondération, puis en divisant cette somme par le nombre total de tubercules évalués. Aussi, une évaluation du niveau d'infestation à la rhizoctonie (*rhizoctonia solani*) a été effectuée sur l'ensemble des pommes de terre récoltées. À l'aide d'une grille d'évaluation, un indice est obtenu en fonction de la pondération accordée à chaque différence observée sur les tubercules de pomme de terre. Tout comme la gale commune, l'indice calculé par la méthode utilise un facteur de pondération variant de 1 à 5 et qui tient compte à la fois de l'étendue et du type de symptôme

observé sur les tubercules. Enfin, le poids spécifique a été mesuré à partir d'un sous-échantillon de 3 kg de tubercules par parcelle. Le sous-échantillon est d'abord pesé (poids dans l'air). Les tubercules sont ensuite immergés dans l'eau et le poids noté à nouveau (poids dans l'eau). Le poids spécifique est issu de la division du poids dans l'air par la différence entre le poids dans l'air et celui dans l'eau.

Pour le site en haricots et pour chacune des parcelles, les plants de 4 sections de 0,5 m, choisis de manière représentative, à l'intérieur de la parcelle ont été récoltés. Ces plants ont d'abord été pesés à l'état frais. Ensuite, tous les haricots ont été détachés des plants et pesés à l'état frais. Les plants ont été séchés à 105 °C et de nouveau pesés. Un sous échantillon de 700 g a été composé à partir des haricots récoltés, toujours par parcelle. Les haricots du sous échantillon ont été classés selon leur diamètre (< 5 mm, entre 5 et 6,5 mm, > 6,5 mm), pesés et de nouveau regroupés. Ces derniers ont été cuits dans un autocuiseur 180 secondes dès que la pression interne de l'autocuiseur dépasse les 81,4 kPa. Par la suite, 100 g de haricots ont été prélevés pour déceler la présence de fil (en réalisant un test de traction) et 500 g ont été utilisés pour évaluer le ratio grains/gousse (ouvrir chaque gousse et en retirer les graines pour ensuite peser les graines et les gousses séparément et en calculer le rapport).

4 Résultats obtenus et analyse en fonction des objectifs spécifiques

4.1 Évaluer la performance du modèle de gestion de l'irrigation développé en Colombie-Britannique basé sur le bilan hydrique

4.1.1 Analyse de l'interface du logiciel BH

La gestion de l'irrigation basée sur le bilan hydrique (BH) à l'aide du modèle développé en C.-B. a été explorée durant les saisons 2012 et 2013. Voici un tour d'horizon du logiciel ainsi que des principaux constats qui s'imposent.

Le logiciel basé sur le bilan hydrique originaire de la C.-B. est un outil permettant d'évaluer théoriquement le statut hydrique du sol. L'interface du logiciel est intuitive et simple à utiliser (Figure 5), (Photographie 6 à 8). Pour faire une simulation, il suffit de créer un « projet » et ce, en quatre étapes faciles. Premièrement, il faut sélectionner la culture à irriguer. Ensuite, selon la culture choisie le logiciel prend en considération diverses constantes concernant la profondeur racinaire à maturité, le coefficient d'utilisation de l'eau par la culture et des coefficients culturaux (k_c). Par ailleurs, ces coefficients feront l'objet d'une discussion plus approfondie dans les sections suivantes. Maintenant, la deuxième section à remplir est celle portant sur les caractéristiques texturales du sol. Cette étape consiste à identifier les classes texturales de sol selon la profondeur où elles se situent. Le logiciel associe, par la suite, une valeur théorique maximale de rétention en eau (capacité au champ). Notez qu'il est également possible de déterminer manuellement une valeur de rétention maximale en eau. Par la suite, des informations relatives au système d'irrigation comme le type de système, l'espacement entre les gicleurs et le débit de ces derniers sont nécessaires pour calculer la quantité d'eau appliquée au sol lors des périodes d'irrigation. Finalement, la dernière section concerne le calendrier d'irrigation où le logiciel intègre l'ensemble des facteurs déterminés aux étapes précédentes avec les données météorologiques d'évapotranspiration. Pour le Québec, les données d'évapotranspiration proviennent d'un réseau de 250 stations météorologiques dont les données validées sont rendues disponibles sur le site d'Agrométéo Québec⁵. L'évapotranspiration de la culture est déterminée grâce à la station météorologique la plus près du site qui est accessible directement dans l'interface.

⁵ <http://www.agrometeo.org/>

Type de culture
Profil du sol
Conception du système d'irrigation
Calendrier d'irrigation

Étape 4 Calendrier d'irrigation

Il est maintenant possible d'établir le calendrier d'irrigation de la parcelle. Sélectionnez la station météo la plus proche. Entrez aussi la date du début du cycle d'irrigation. Vous pouvez entrer la date de la fin du cycle si vous le voulez. Le calculateur entrera en communication avec le site Farmwest.com et recueillera les données sur l'évapotranspiration afin d'établir le calendrier d'irrigation. La case ci-dessous indiquera si l'irrigation doit avoir lieu immédiatement ou dans un certain nombre de jours. S'il s'agit d'un système au goutte-à-goutte, le calculateur indiquera le temps de fonctionnement s'appliquant à un segment.

Étape précédente: Calendrier d'irrigation

- Station météo la plus proche [Voir la carte station](#)
Province : Québec Station Deschambault (Exp.)
Sélectionnez « Climat données utilisateur » pour les valeurs personnalisées.
- Irrigation du champ commencée le ?
Cliquez pour sélectionner la date du début de l'irrigation 08/01/2013
- Examiner les données météo historiques ?
Pour voir et produire des calendriers d'après les données des périodes de végétation antérieures, modifiez la date. Par défaut, la date est celle d'aujourd'hui. En changeant la date, le logiciel utilisera les données à la date que vous aurez entrée. 08/02/2013

Efficace ET de précipitations & quotidien

Date	Précipitations efficaces	Évapotranspiration
Août. 1	0.08	0.16
Août. 2	0.08	0.16

Eau qui reste dans le sol par le jeu et Date irriguées

Set d'irrigation 1

Août 1
Date de l'Estimation

Paramètre	Valeur
Réserve d'eau utile du sol	2.8"
Déficit hydrique maximal du sol	2"
Seuil de déclenchement	2"
Réserve en eau non utilisable	1.6"
	1.2"
	0.8"
	0.4"
	0"

1 jour(s)
jusqu'à la prochaine irrigation
*D'après l'évapotranspiration, les précipitations prévues et le calcul de l'eau présente dans le sol.

Sauvegarder Voir et Imprimer des Rapports

Déconnexion Projet BH (Deschambault (Exp.)) Système d'irrigation Micro-asperseur Champ Potato 8.00m x 8.00m (64.00 m2) Ouvrir le navigateur du projet

Figure 5. Une des fenêtres de l'interface du logiciel du bilan hydrique.

4.1.2 Variabilité technologique des valeurs d'évapotranspiration

L'évapotranspiration est un phénomène qui regroupe deux processus physiques distincts : l'évaporation et la transpiration. L'évaporation est le processus physique par lequel l'eau liquide est transformée en vapeur d'eau dans l'atmosphère. De la même façon, la transpiration modifie l'état liquide de l'eau en un état gazeux. La transpiration implique un mouvement de l'eau du sol vers le feuillage de la canopée via la plante. Par la suite, la vapeur d'eau est diffusée dans l'atmosphère par les stomates des plantes.

Pour estimer l'évapotranspiration de la culture, il est possible d'utiliser des données issues des stations météorologiques et des équations mathématiques qui engendrent le résultat numérique. Généralement, les données météorologiques prises en considération sont : la température de l'air, la radiation solaire, l'humidité relative et la vitesse du vent. Donc, de nombreux paramètres doivent être évalués à l'aide d'appareils de mesures. Il existe de nombreux éléments qui peuvent influencer la qualité des données météorologiques d'une station. Il ne suffit qu'à penser à la qualité des composantes, la calibration ou la conception même des équipements pour se rendre compte que l'écart entre deux données issues de deux appareils mesurant le même paramètre dans un même environnement peut devenir important, voire critique.

Pour réaliser la méthode du bilan hydrique et que celle-ci demeure pertinente, il est essentiel d'obtenir une valeur fiable d'évapotranspiration et ce, à chaque jour. Ainsi, le manque de précision sur la valeur exacte d'évapotranspiration peut devenir problématique pour la méthode du bilan hydrique et entraîner un écart non souhaitable entre les événements d'irrigation. De plus, lorsque le logiciel calcule la réserve utile en eau facilement utilisable par la plante, il utilise une valeur par défaut. Si celle-ci est inférieure ou supérieure à la valeur réelle, cela engendrera une erreur chaque jour de simulation. En cumulant ces erreurs, il devient alors tout à fait plausible que la journée de l'irrigation prévue par le logiciel soit devancée ou retardée. Dans un cas comme dans l'autre cette situation n'est pas souhaitable dans une optique d'irrigation raisonnée.

Afin d'évaluer cette variabilité, deux stations météorologiques ont été installées au site de Deschambault. Il s'agit d'abord d'une station acquise chez Campbell Scientific et d'une seconde acquise chez Hortau. Les deux stations sont situées à moins de dix mètres l'une de l'autre. Puisque la distance entre les deux stations météorologiques n'a pu conduire à des différences significatives dans la mesure des paramètres météorologiques, ces dernières devraient, théoriquement, calculer des valeurs d'évapotranspiration similaires (Figure 6 et Figure 7). Les valeurs observées, en 2012, démontrent dans un premier temps, une tendance similaire, mais aussi une variabilité sur certaines valeurs ponctuelles. La variabilité se caractérise par une occurrence plus élevée de valeurs près de zéro pour la station Hortau. Les valeurs près de zéro sont probablement des erreurs de lecture et ne devraient pas être utilisées dans le cadre de la méthode du bilan hydrique. Les données issues de la station Hortau ont également une amplitude plus importante entre les minimums et les maximums. En 2013, les fortes variations ont été observées lors des valeurs maximales d'évapotranspiration.

Un suivi sur la qualité des données de la station météorologique Campbell a été réalisé tout au long de la saison. En validant les valeurs d'évapotranspiration avec d'autres valeurs provenant de stations météorologiques avoisinantes, il est possible de cibler les valeurs aberrantes à proscrire. Les écarts observés entre les deux stations sont probablement explicables par cette différence fondamentale de suivi des données. Le suivi sur la qualité des données est un élément extrêmement important pour assurer la précision du modèle.

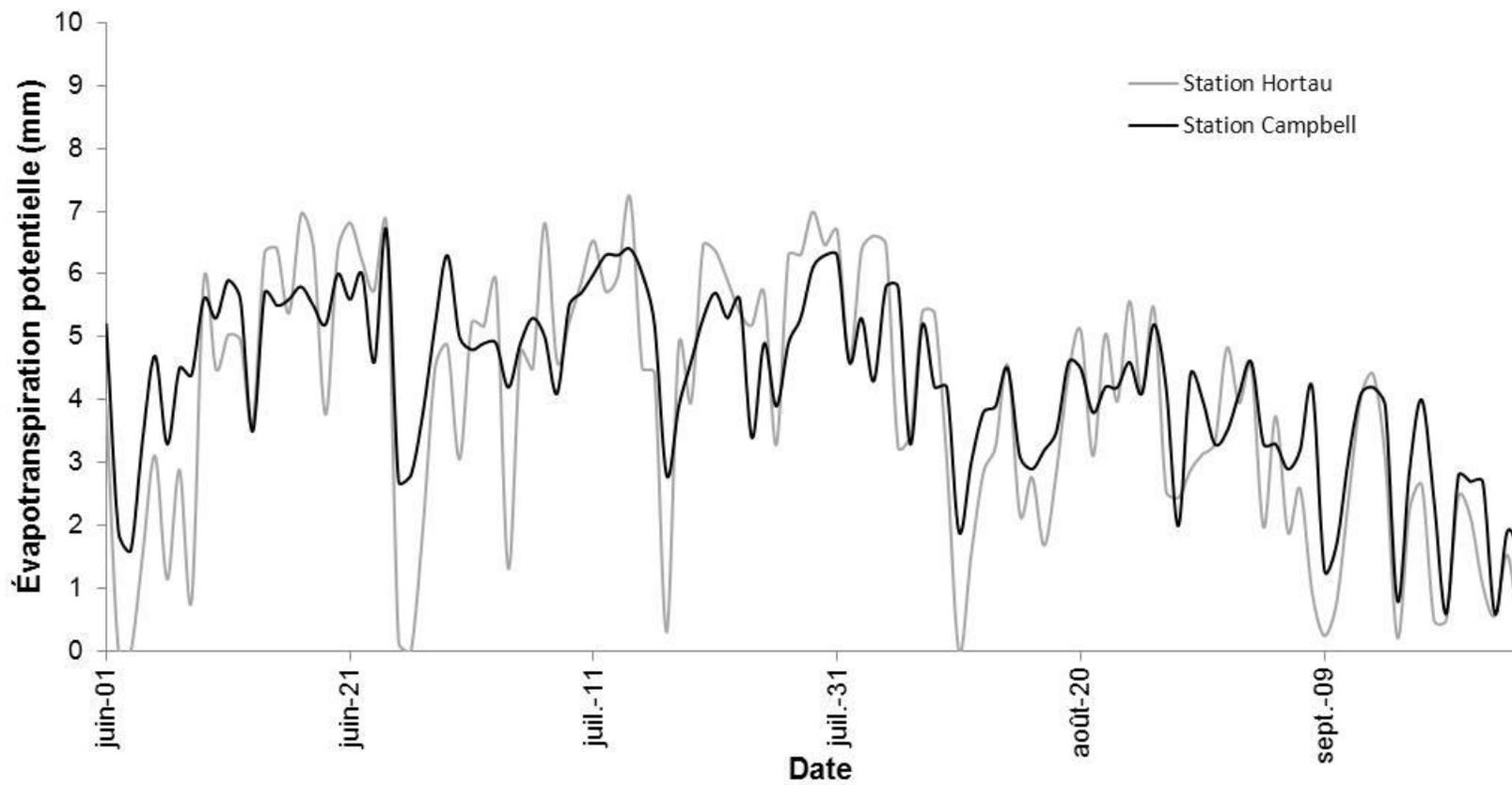


Figure 6. Évapotranspiration journalière mesurée par les deux stations météorologiques situées au site de Deschambault, saison 2012.

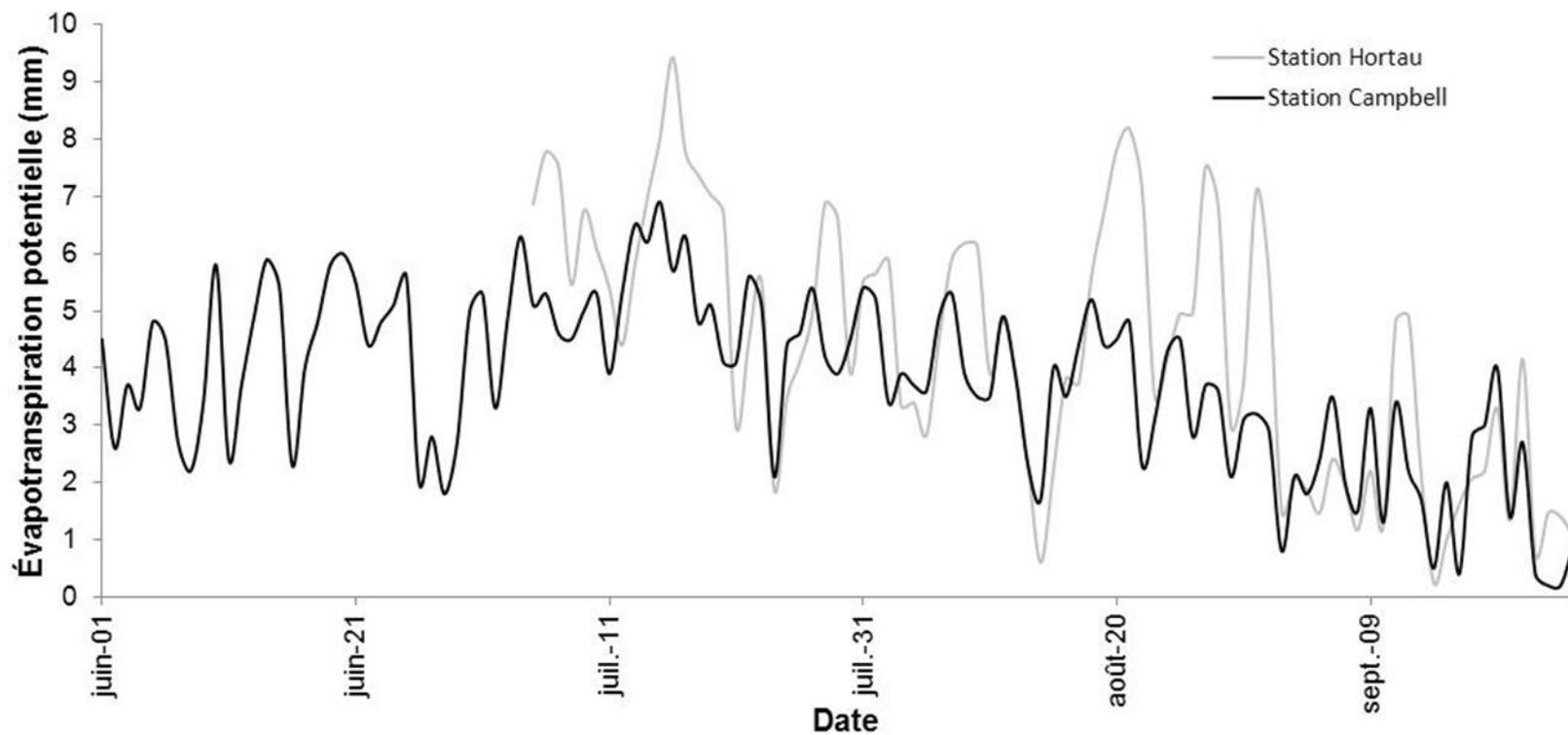


Figure 7. Évapotranspiration journalière mesurée par les deux stations météorologiques situées au site de Deschambault, saison 2013.

4.1.3 Variabilité spatiale des valeurs d'évapotranspiration

Pour établir un calendrier précis d'irrigation, le logiciel doit faire le suivi quotidien du statut hydrique du sol. Pour calculer la quantité totale d'eau perdue par le sol, l'évapotranspiration potentielle est alors déterminée à l'aide des stations météorologiques. Puisque chacune des stations météorologiques échantillonne des conditions spécifiques à leur environnement local, qu'en est-il de l'évapotranspiration calculée à partir de celles-ci? La méthode du bilan hydrique demeure-t-elle pertinente lorsque la station météorologique n'est pas à proximité du champ à irriguer? Pour répondre à ces interrogations, il suffit de comparer les données d'évapotranspiration mesurées par les stations météorologiques situées à proximité (rayon < 30 km) du site expérimental de Deschambault (Figure 8 et Figure 9) Pour déterminer les valeurs d'évapotranspiration potentielles, la méthode se base sur des équations empiriques dont les paramètres des équations sont obtenus grâce aux stations météorologiques. La méthode de calcul officiel utilisée par les stations météorologiques automatiques (Deschambault Campbell, St-Alban, Ste-Anne-de-la-Pérade, Ste-Catherine-de-la-Jacques-Cartier) est la formule Penman-Montheith (Équation 1) tandis qu'une station où les données sont relevées manuellement (Deschambault Manuelle) utilisera l'équation de Baier-Robertson (Équation 2). Dans un rayon de 30 km, il existe une forte similitude entre les valeurs d'évapotranspiration potentielles calculées avec les données des stations. Au-delà des variations locales d'évapotranspiration potentielle, une partie de la variabilité des mesures pourrait être attribuable aux équipements (calibration, type d'équipement, installation, etc). Fait à noter, il y a très peu de différence entre les valeurs d'évapotranspiration potentielles issues des stations météorologiques de Deschambault. Pourtant, les valeurs d'évapotranspiration sont calculées à l'aide de deux formules bien distinctes. La gestion de la qualité des données a peut-être pu aider à uniformiser les deux valeurs issues de ces deux formules. Bien que des analyses statistiques n'aient pas été réalisées, il apparaît que ces divergences pourraient engendrer que de légères modifications au calendrier d'irrigation. Les conséquences sont alors considérées comme minimales voir négligeables.

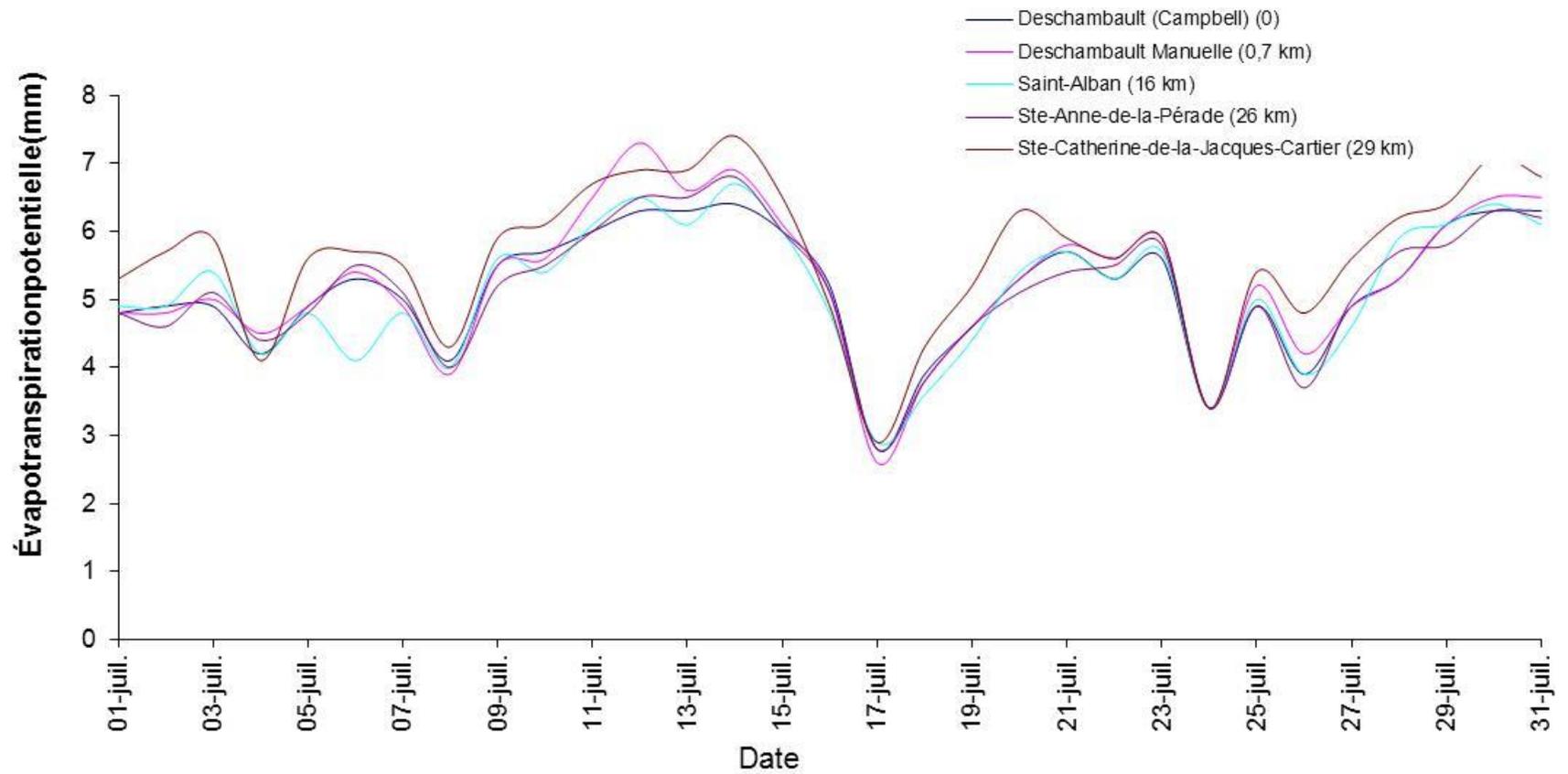


Figure 8. Valeurs d'évapotranspiration calculées à partir de stations météorologiques situées au site de Deschambault et à proximité, saison 2012.

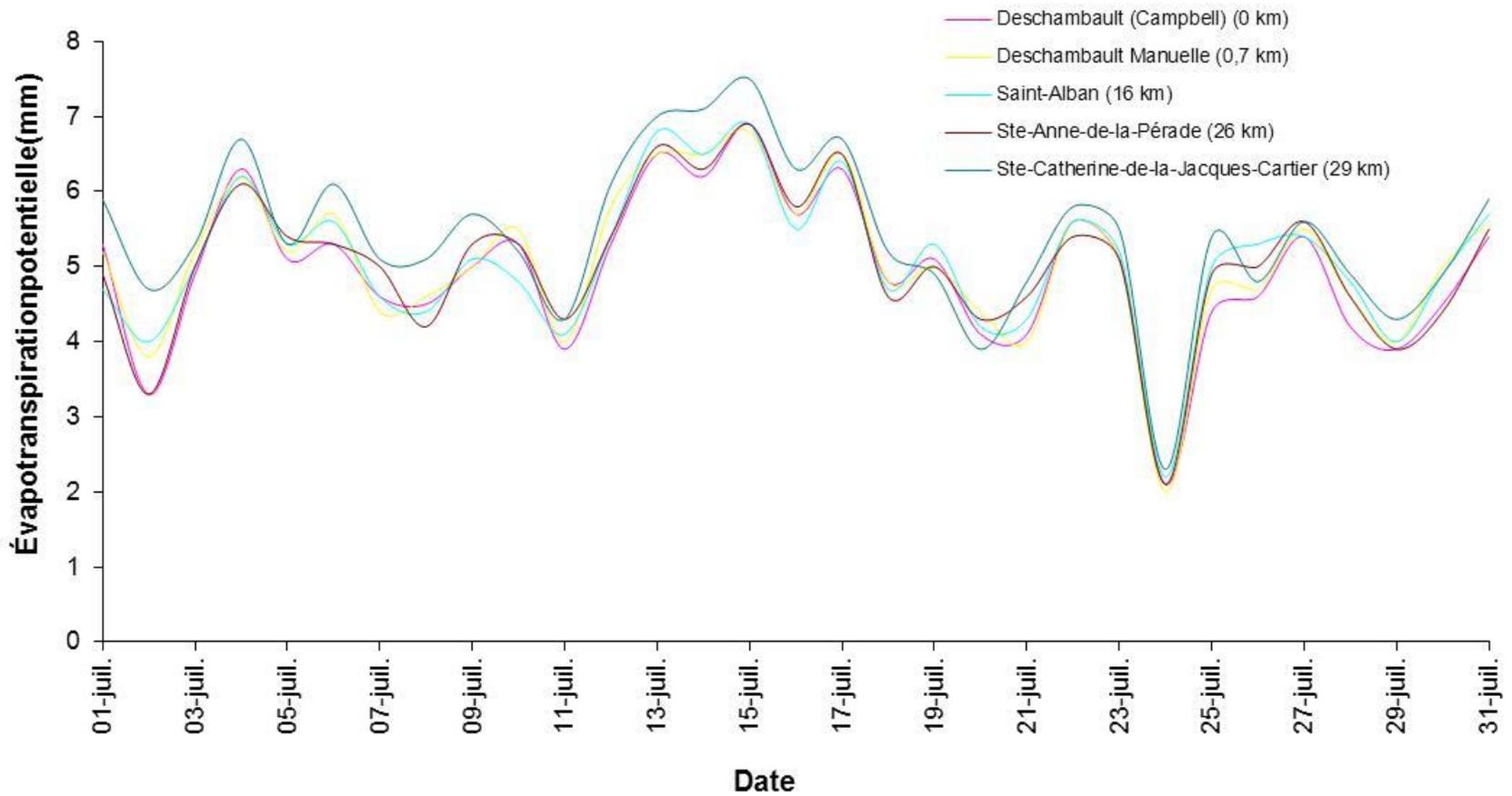


Figure 9. Valeurs d'évapotranspiration calculées à partir de stations météorologiques situées au site de Deschambault et à proximité, saison 2013.

4.1.4 Détermination des consignes d'irrigation

Une irrigation efficace débute avec l'établissement de consignes d'irrigations qui considèrent les conditions de croissance particulières de la culture et qui permettent le maintien d'un régime hydrique idéal. L'établissement d'une consigne d'irrigation est une démarche essentielle qui doit être réalisée, peu importe la manière dont le statut hydrique sera suivi au cours de la saison de croissance. La caractérisation des parcelles expérimentales a été réalisée afin de recueillir des données essentielles à l'élaboration des consignes d'irrigation pour chacun des sites et pour connaître les conditions dans lesquelles les essais ont été réalisés (Tableau 1). Les sols à l'étude se situent tous dans des classes texturales assez grossières (loam sableux à sable) et possèdent une teneur en matière organique se situant entre 1,9 et 3,6 %. De plus, des courbes de désorption ont été réalisées en laboratoire (Figure 10 et Figure 11). L'interprétation de ces courbes a permis de caractériser le sol et d'identifier le consigne d'irrigation relative aux traitements.

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques du sol des parcelles expérimentales.

Saison	Site expérimental	Culture/cultivar	Texture du sol prédominante	Matière organique (%)	pH _{eau}
2012	Deschambault	PdT <i>Goldrush</i>	Loam Sableux	2,5	n.d.
	Lanoraie	PdT <i>Russet Burbank</i>	Sable	2,1	5,3
	Ste-Mélanie	Haricot extra-fin <i>Denver</i>	Sable loameux	3,6	n.d.
2013	Deschambault	PdT <i>Goldrush</i>	Loam Sableux	2,5	n.d.
	Lanoraie	PdT <i>Russet Burbank</i>	Sable	1,9	<u>n.d.</u>
	Ste-Mélanie	Haricot extra-fin <i>Anger</i>	Sable	3,1	n.d.

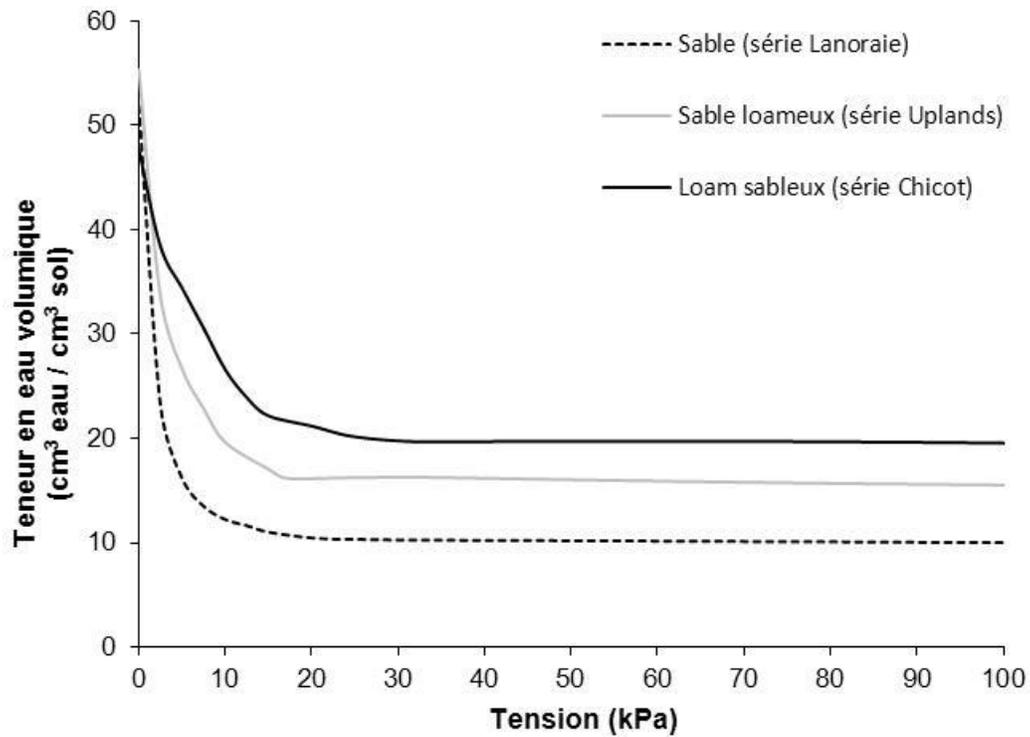


Figure 10. Courbe de désorption en eau du sol des trois sites, saison 2012.

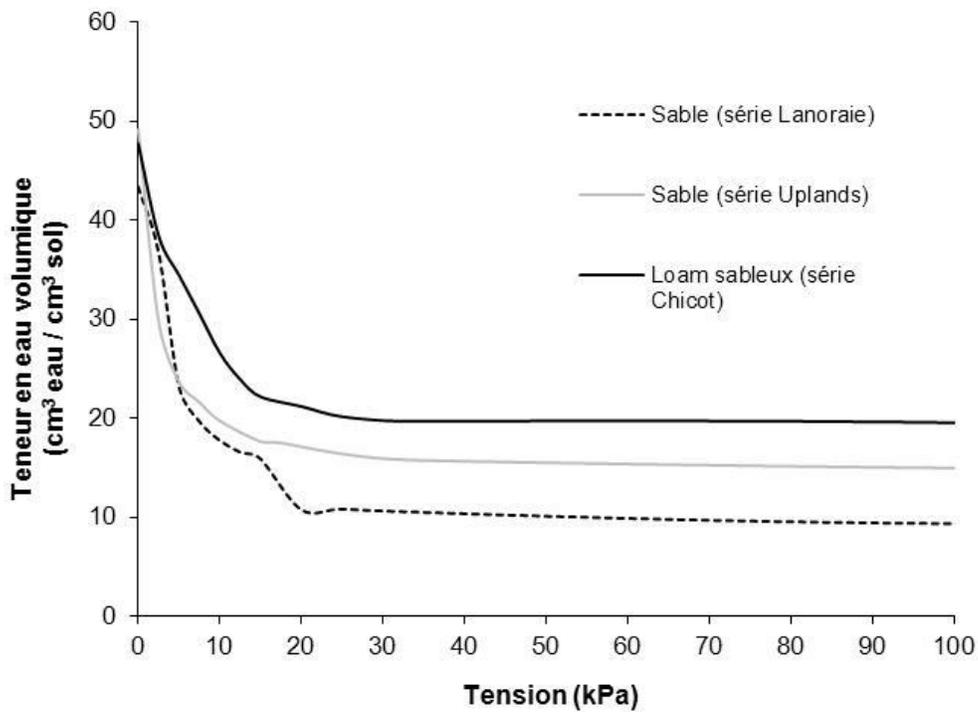


Figure 11. Courbe de désorption en eau du sol des trois sites, saison 2013.

4.1.5 Gestion des consignes d'irrigation avec le logiciel

Lors de la saisie du projet, le logiciel propose des valeurs prédéterminées à partir de nombreux facteurs d'importance. Afin d'évaluer la pertinence d'utiliser ces valeurs « par défaut », une simulation a été réalisée avec le logiciel en ne modifiant aucune valeur attribuée par le logiciel. Par la suite, les valeurs ont été remplacées par d'autres reflétant davantage les caractéristiques spécifiques du sol et des cultures (irrigations bonifiées). Le scénario « irrigation bonifiée » (Tableau 10) est une référence théorique qui permet d'apprécier la précision du modèle. Notez que le scénario n'a pas été éprouvé durant l'été 2012, mais qu'il s'agit plutôt d'une simulation. Finalement, ces deux scénarios ont été comparés avec le traitement tensiomètre (irrigations réelles) (Figure 12). Durant l'été 2012 et selon le traitement tensiomètre, il y a eu cinq événements d'irrigation soit les 10, 13, 21, 25 et 30 juillet. Le traitement tensiomètre servira donc de référence, car les événements d'irrigation ont été justifiés par l'état hydrique réel du sol. L'intérêt est maintenant de comparer les événements d'irrigation théoriques prévus par la méthode du bilan hydrique avec le traitement tensiomètre de référence. La simulation avec les valeurs par défaut du logiciel aurait engendré sept événements d'irrigation tandis que la version bonifiée aurait proposé six événements. Dans chacune des simulations, le logiciel surestime donc le nombre d'irrigations à effectuer par rapport à une gestion de l'irrigation réalisée par tensiométrie. Il est aussi intéressant d'évaluer les concordances entre les dates prévues par ces différentes simulations et la référence tensiométrique. À ce sujet, la simulation bonifiée s'est clairement démarquée en réalisant quatre concordances sur les cinq événements que constitue l'irrigation de référence. Cependant, la simulation avec les valeurs par défaut, ne réalise qu'une seule concordance.

Pour 2013, l'emphase a été mise sur des scénarios dits « bonifiés ». Ainsi, nous avons déterminé des consignes d'irrigations équivalentes afin que les outils (bilan hydrique, tensiomètres, sondes réflectométriques) maintiennent un statut hydrique correspondant à 50 % de la réserve utile. Ce qui n'était pas le cas avec le scénario par défaut. La caractérisation physique des sols à l'aide des courbes de désorption nous permet d'établir une réserve en eau du sol. Selon le type de sol et des outils de gestion, les consignes d'irrigations consistent en une valeur numérique au-delà de laquelle la culture est considérée en situation de stress hydrique. Par exemple, pour le site de Lanoraie en 2013, la réserve en eau du sol a été évaluée à 50 mm d'eau disponible pour une profondeur de 30 cm. La profondeur racinaire a été fixée à la même valeur qui est utilisée pour le traitement tensiométrique. Donc, la consigne d'irrigation a été établie à 25 mm (50 % de la réserve utile). La performance de deux traitements soit, le traitement du bilan hydrique (Figure 13) et le traitement tensiométrique (Figure 14) ont été relativement similaires au cours de la saison 2013 au site de Ste-Mélanie. En effet, les deux traitements ont nécessité deux irrigations en juillet, soit le 13 et le 27 pour le bilan hydrique et le 16 et le 28 juillet pour le traitement tensiométrique. Le bilan hydrique a très certainement devancé l'irrigation au 13 juillet tandis que celle du 27 semblait tout à fait justifiée. Il est logique de conclure que le logiciel surestimait légèrement l'évapotranspiration de la culture aux dates antérieures au 13 juillet. Cette surestimation pourrait être éventuellement corrigée en apportant de nouveaux coefficients

cultureux tenant compte du stade de croissance actuel plutôt que de regrouper selon le mois. Les coefficients cultureux seront abordés en détail dans la section 4.1.8.

L'approche du bilan hydrique a donné de bons résultats au site de Deschambault pour la saison de 2013. Les dates d'irrigation d'après le bilan hydrique (13 et 30 juillet) (Figure 15) ont été proches de celles prédites par le traitement tensiométrique (16 et 30 juillet) (Figure 16). En effet, au 13 juillet le bilan hydrique devançait la date idéale de l'irrigation. D'un autre côté, au 16 juillet, la consigne d'irrigation avait été dépassée pour le traitement tensiométrique d'une journée, voire deux. Ainsi, la date fournie par le bilan hydrique était assez proche du moment opportun.

Comparativement à la saison 2012, les irrigations réalisées en 2013 ont été moins nombreuses laissant ainsi moins d'opportunité à évaluer la performance globale du bilan hydrique. Néanmoins, dans des conditions de faible évapotranspiration, le bilan hydrique démontre une efficacité tout à fait acceptable à estimer le statut hydrique du sol.

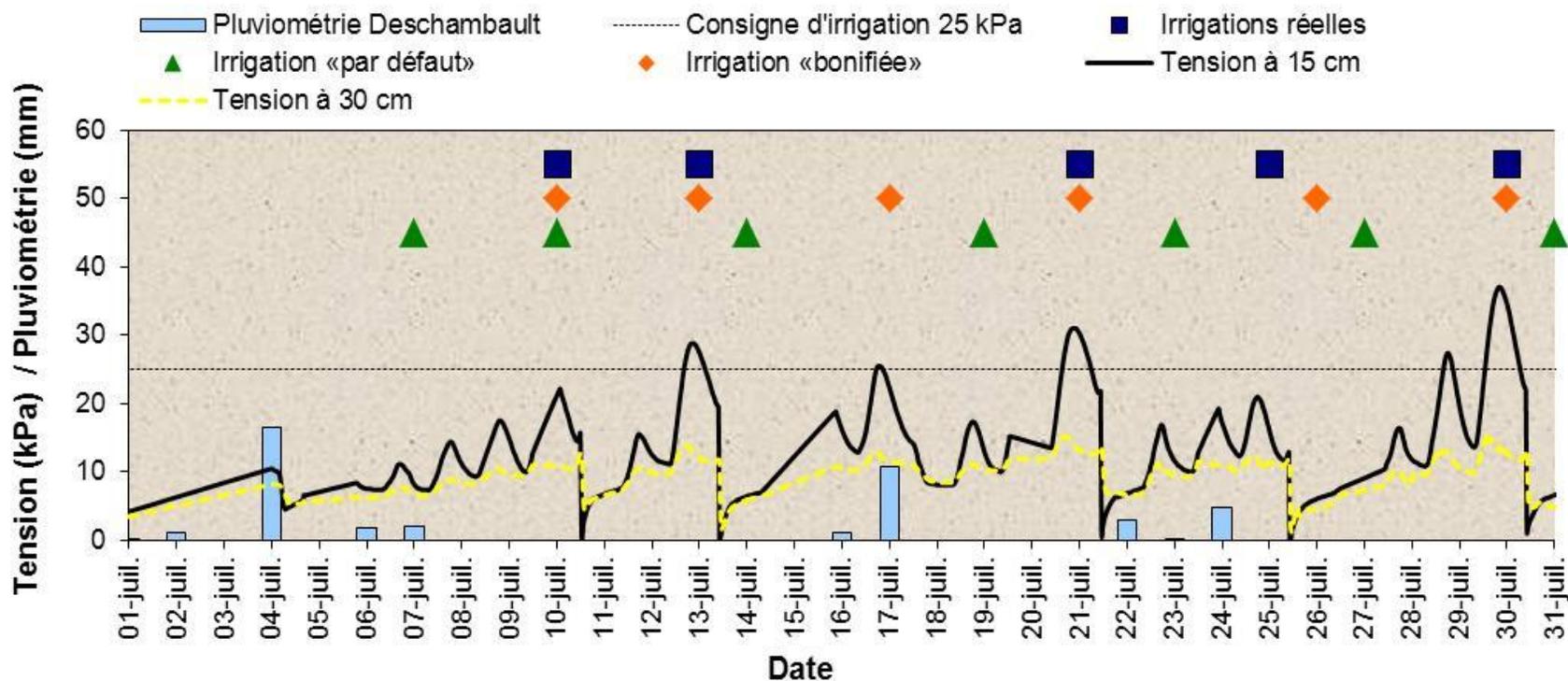


Figure 12. Suivi tensiométrique et dates d'irrigation réelles et simulées à l'aide du logiciel du bilan hydrique au site de Deschambault, saison 2012.

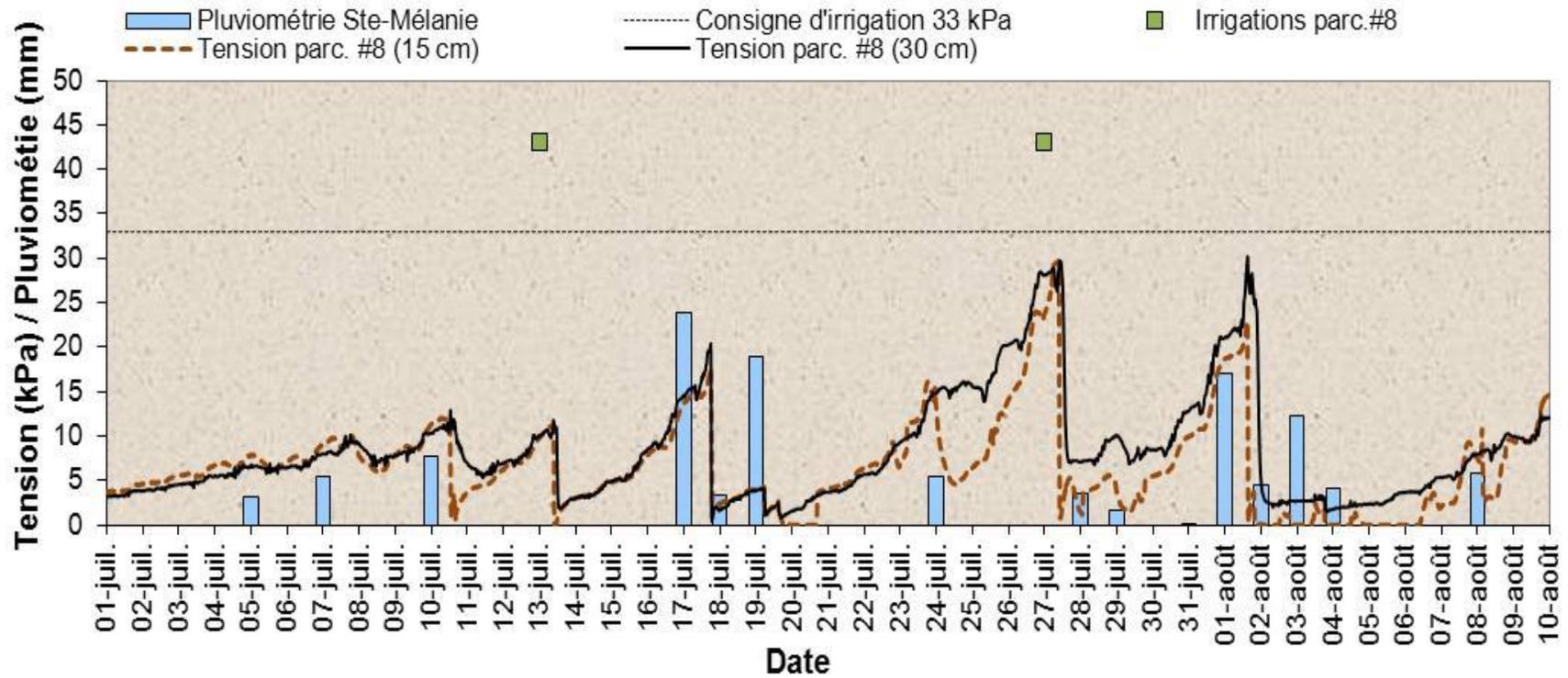


Figure 13. Suivi tensiométrique et dates d’irrigations fournies par le logiciel du bilan hydrique au site de Ste-Mélanie, saison 2013.

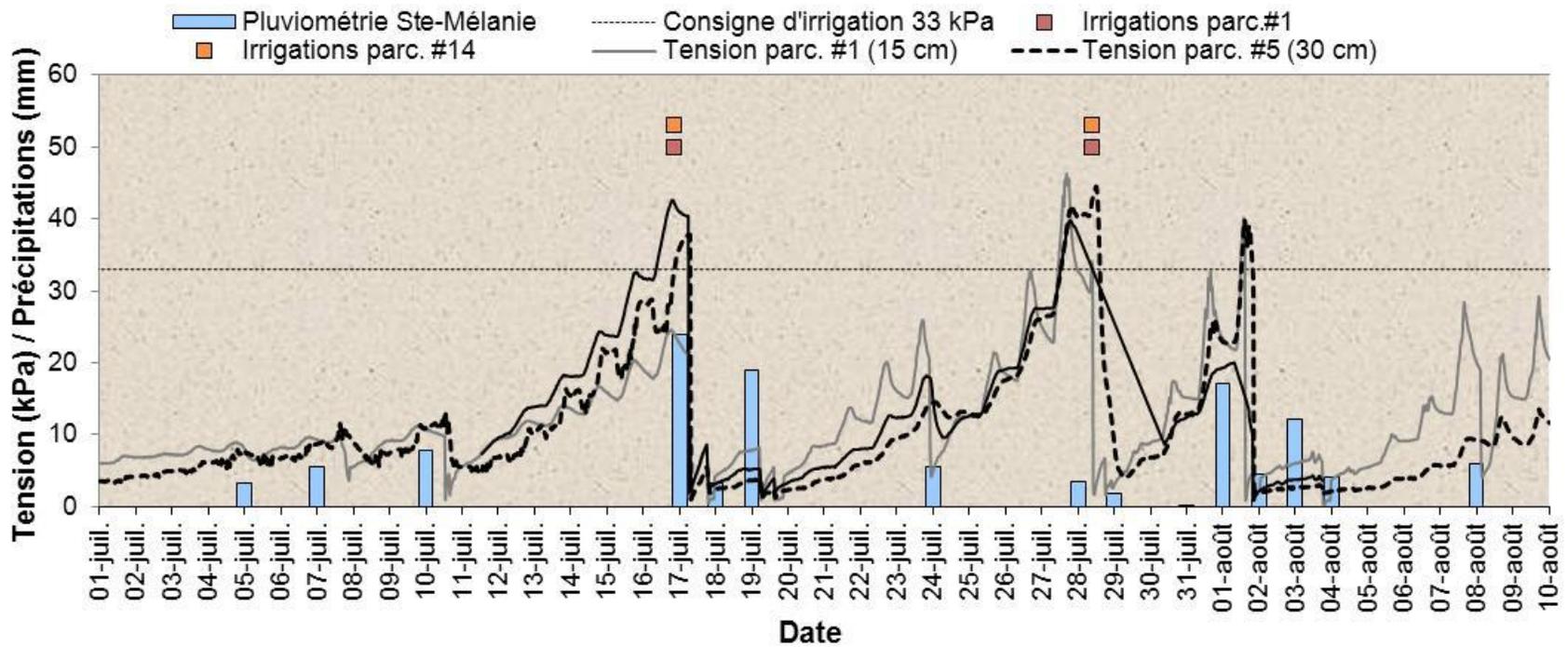


Figure 14. Suivi tensiométrique et dates d'irrigations fournies par le traitement tensiométrique au site de Ste-Mélanie, saison 2013.

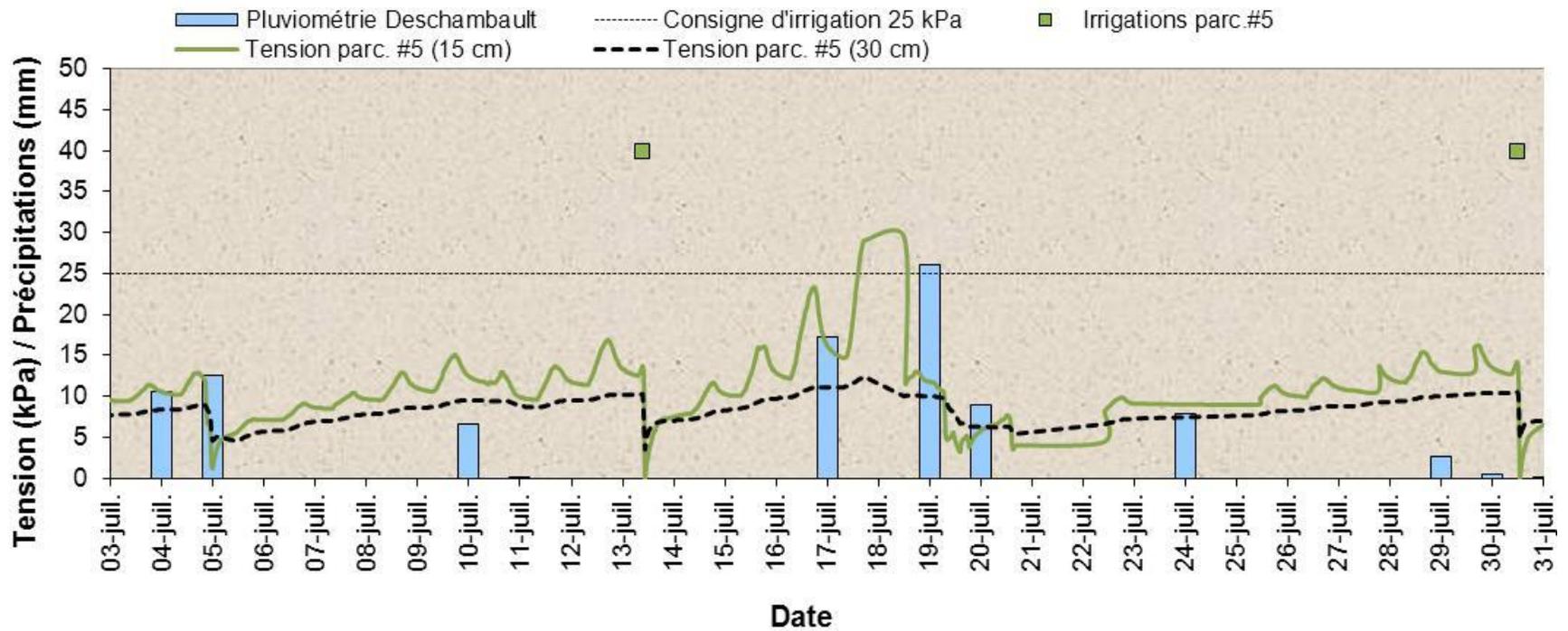


Figure 15. Suivi tensiométrique et dates d'irrigations fournies par le logiciel du bilan hydrique au site de Deschambault, saison 2013.

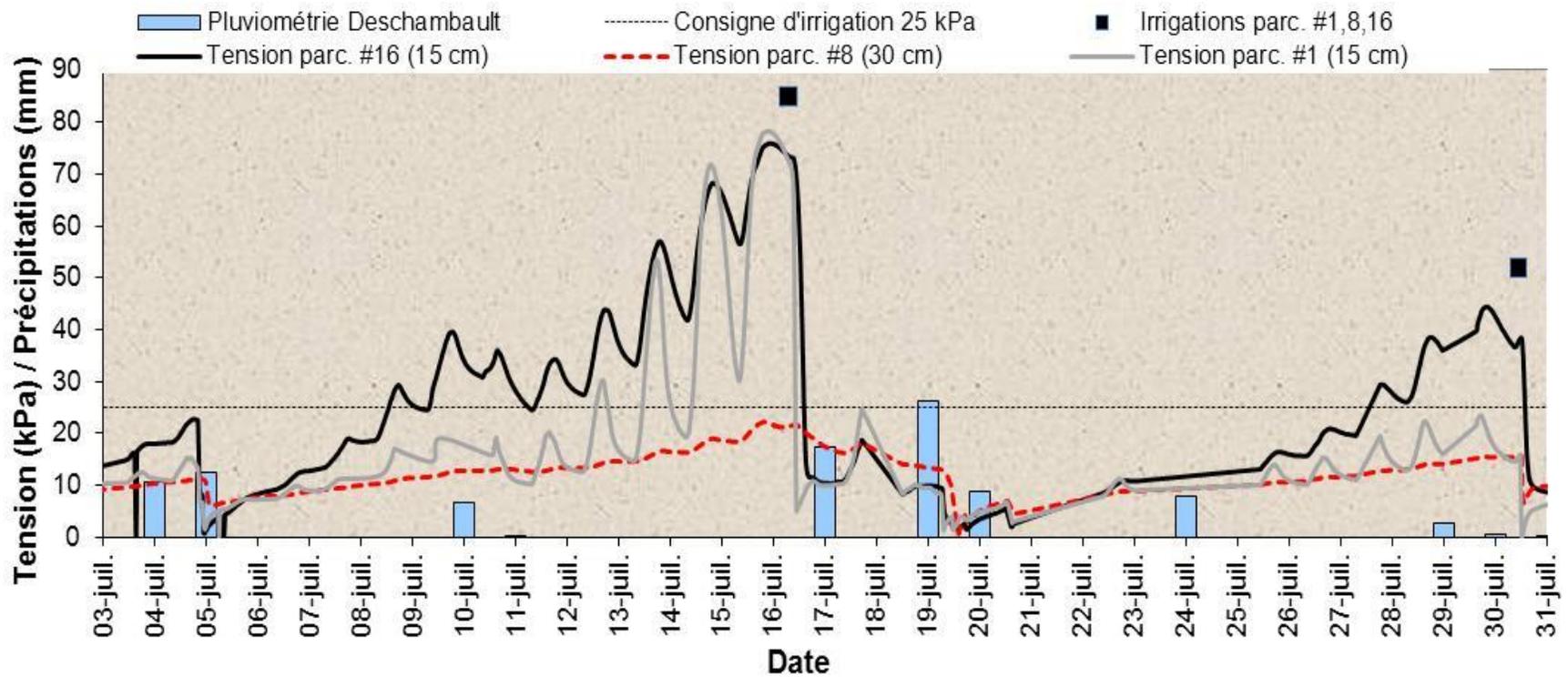


Figure 16. Suivi tensiométrique et dates d'irrigations fournies par le traitement tensiométrique au site de Deschambault, saison 2013.

4.1.6 Comparaison du volume des apports en eau par l'irrigation

Une gestion adéquate de l'irrigation vise généralement à recharger la réserve en eau d'un sol pour combler les pertes par évapotranspiration. Pour chacun des sites, un volume d'eau correspondant à la réserve en eau utile du sol a été déterminé à l'aide des courbes de désorption et des différentes particularités culturales. La durée d'irrigation a aussi été ajustée de manière à ce que la réserve utile en eau soit rechargée à chaque irrigation. Les volumes d'eau appliqués par les épisodes d'irrigation ainsi que les précipitations sont présentés au Tableau 2. Le volume appliqué en juillet a fluctué sensiblement d'un traitement à l'autre et d'une saison à l'autre. Effectivement, les apports d'eau ont varié proportionnellement selon le nombre d'épisodes d'irrigation. Les apports d'eau fournis par un épisode d'irrigation étaient constants et équivalaient à environ 22 mm au site de Deschambault, 16 mm à Ste-Mélanie et environ 20 mm à Lanoraie. Il faut toutefois noter ici qu'il s'agit d'une hauteur d'eau brute appliquée. La hauteur d'eau absorbée par le sol ne correspond qu'à une certaine proportion de l'eau appliquée, le reste s'étant évaporé lors de l'application. Cette proportion peut varier selon les conditions dans lesquelles l'apport a été effectué (vent, couverture végétale, température, humidité, etc.). En 2012, les volumes d'eau utilisés pour la régie de bilan hydrique bonifié à Deschambault ont été plus élevés de 20 % par rapport à la régie tensiométrique. En 2013, les volumes utilisés par le bilan hydrique sont quasi analogues à ceux du traitement tensiométrique, et ce, pour Ste-Mélanie et Deschambault. Pour le site de Lanoraie, les volumes d'eau utilisés en 2013 par le bilan hydrique ont été plus élevés de 16 % par rapport à ceux utilisés par la régie tensiométrique.

Tableau 2. Apports moyens en eau d'irrigation selon le traitement en juillet et août 2012 et 2013.

Saison	Site	Sol	Traitement et précipitation	Apport d'eau cumulé		
				Nombre d'épisodes d'irrigation	Hauteur d'eau totale (mm)	Volume d'eau (l/ha)
2012	Deschambault*	Loam sableux	Bilan hydrique (par défaut)	7	150	1 500 000
			Bilan hydrique Bonifié *	6	128	1 280 000
			Tensiométrie	5	106	1 060 000
	Ste-Mélanie	Sable loameux	Bilan hydrique bonifié	n.d.	n.d.	n.d.
			Tensiométrie	6	97	970 000
	Lanoraie	Sable	Bilan hydrique bonifié	n.d.	n.d.	n.d.
Tensiométrie			9	183	1 830 000	
2013	Deschambault	Loam sableux	Bilan hydrique bonifié	2	42	420 000
			Tensiométrie	2	42	420 000
	Ste-Mélanie	Sable	Bilan hydrique bonifié	2	33	330 000
			Tensiométrie	2	28	280 000
	Lanoraie**	Sable	Bilan hydrique bonifié	7	142	1 420 000
			Tensiométrie	6	122	1 220 000

*juillet 2012 uniquement

**juillet 2013 uniquement

4.1.7 Rendements

Les rendements moyens des différentes cultures à l'étude ont été comparés par traitement (Tableau 3 à Tableau 5). De plus, le rendement a été décortiqué selon les différents calibres et catégories applicables dans les productions respectives de haricots extra-fins et de pommes de terre. Tel que mentionné précédemment, il n'y a pas eu de différence significative entre le traitement BH et le traitement tensiométrie en ce qui a trait aux consignes d'irrigation. Autrement dit, ces deux traitements ont été réalisés dans les mêmes conditions et ont reçu sensiblement les mêmes quantités d'eau.

Pour la culture du haricot extra-fin, la proportion de haricots ayant un calibre se situant entre 5 et 6,5 mm a été plus grande pour les traitements irrigués par rapport au témoin non irrigué pour les deux années du projet. En 2012, même si la récolte finale a été complétée à la même date, ces résultats indiquent que les traitements réalisés au cours de l'été ont probablement engendré un écart de maturité des haricots entre les traitements. Dans le haricot extra-fin, le moment de la récolte est déterminé quelques jours à l'avance selon le stade de maturité et seulement quelques jours suffisent à impacter négativement le calibre des gousses. Ainsi, pour améliorer la comparaison des rendements entre eux, différentes dates de récolte auraient possiblement dû être réalisées. Autrement dit, la date de récolte du traitement témoin aurait vraisemblablement dû être devancée de quelques jours afin de synchroniser les stades physiologiques. Néanmoins, les rendements moyens observés entre le traitement irrigué selon les tensiomètres et le témoin s'avèrent plus élevés. En effet, une augmentation de rendement de 38,2 % a été observée. En 2013, aucun écart de maturité n'a été observé entre les traitements.

Les rendements en pommes de terre à Deschambault pour la saison 2012 ont été très semblables d'un traitement à l'autre. Un écart d'environ 10 % sépare le rendement le plus faible (témoin) du meilleur rendement (sonde TDR). Au niveau du rendement vendable, il ne semble pas y avoir de différence notable entre les traitements puisque les rejets ont varié respectivement de 12,4 % à 14,5 % pour le traitement tensiomètre et témoin. En 2013, les rendements sont très similaires avec peu ou pas d'écart entre les traitements. De plus, les proportions de pommes de terre vendables sont aussi les mêmes entre les traitements.

À Lanoraie, en 2012, le rendement du témoin a été très légèrement supérieur au traitement tensiomètre. Toutefois, le rendement vendable a été plus important pour le traitement tensiomètre avec 82,6 % du rendement total comparativement à 69,7 % pour le témoin. Pour 2013, le bilan hydrique obtient le meilleur rendement total des trois traitements. Par contre, la proportion de pommes de terre vendables est nettement moins importante comparativement au traitement tensiomètre. Effectivement, le rendement vendable atteint 69,9 % du rendement total pour le traitement tensiométrique tandis que le traitement selon le bilan hydrique parvient à peine à passer les 50 %.

Il y a probablement plusieurs raisons qui pourraient expliquer les différences de rendements observées entre 2012 et 2013. Parmi les meilleures hypothèses, il a la différence marquée des conditions météorologiques. En 2012, la saison a été chaude et sèche tandis que 2013 fut marqué par un printemps froid et pluvieux. Ainsi, les conditions pluvieuses du printemps 2013 ont pu engendrer un lessivage de l'azote et un retard de croissance notable.

Tableau 3. Potentiel de rendements et qualité des haricots extra-fins selon le traitement et la saison, Ste-Mélanie.

Saison	Traitement	Rendement moyen (t/ha)	Calibre (%)			Ratio grains / gousse (%)	MS haricots (g)	MS plants (g)
			< 5 mm	5-6,5 mm	> 6,5 mm			
2012	BH	19,4	13,2	83	3,4	5,1	191	323,9
	Tensiomètre	19,6	12,2	82	4,6	4,1	188,7	339,4
	N-I (témoin)	12,1	19,6	72,9	6,5	6,9	149,8	256,9
2013	BH	9,6	3,6	63,	28,5	4,2	109,9	170,1
	Tensiomètre	10,4	3,4	62,4	31	5	123,6	177,3
	N-I (témoin)	10,2	2,1	52,3	41,5	4,7	115,1	158,5

Tableau 4. Potentiel de rendements et qualité des tubercules selon le traitement et la saison, Deschambault.

Saison	Traitement	Potentiel rendement moyen (t/ha)	Catégorie								Poids spécifique
			Canada # 1 moyenne		Canada # 1 grosse		Jumbo		Rejet (petite)		
			(t/ha)	(%)	(t/ha)	(%)	(t/ha)	(%)	(t/ha)	(%)	
2012	Bilan hydrique	41,9	34,2	81,4	1,8	4,3	0,2	0,5	5,7	13,5	1,0725
	Tensiomètre	41,9	34,9	83,3	1,5	3,6	0,2	0,5	5,2	12,4	1,0725
	Sonde TDR	42,7	34,8	81,2	1,9	4,5	0,0	0,0	6,0	14,1	1,0728
	Témoin N-I	38,9	30,8	79,0	2,0	5,2	0,4	1,0	5,7	14,5	1,0668
2013	Bilan hydrique	29,7	16,5	55,7	0	0	0	0	13,2	44,3	n.d.
	Tensiomètre	33,1	16,7	50,4	0	0	0	0	16,4	49,6	n.d.
	Sonde TDR	29,4	16,4	55,7	0	0	0	0	13,0	44,3	n.d.
	Témoin N-I	32,5	17,9	55,1	0	0	0	0	14,6	44,9	n.d.

Tableau 5. Potentiel de rendements et qualité des tubercules selon le traitement et la saison, Lanoraie.

Saison	Traitement	Potentiel rendement moyen (t/ha)	Catégorie						Poids spécifique
			Canada # 1 moyenne		Canada # 1 grosse		Rejet (petite)		
			(t/ha)	(%)	(t/ha)	(%)	(t/ha)	(%)	
2012	BH	49,3	42,4	85,9	0	0	6,9	14,1	1,0734
	Tensiomètre	43,9	36,3	82,6	0	0	7,6	17,4	1,0724
	Témoin N-I	44,3	30,9	69,7	0	0	13,4	30,3	1,0672
2013	BH	45,9	21,3	46,4	1,9	4,2	22,7	49,4	n.d.
	Tensiomètre	43,9	25,8	58,7	4,9	11,2	13,2	30,1	n.d.
	Témoin N-I	43,7	20,3	46,5	1,3	2,9	22,1	50,6	n.d.

4.1.8 Coefficients culturaux

Les coefficients culturaux (k_c) sont essentiels dans la méthode du bilan hydrique. Ils permettent d'ajuster la valeur d'évapotranspiration fournie par les stations météorologiques (qui est une valeur potentielle, ET_p) à la valeur d'évapotranspiration qui prend en compte différentes particularités des cultures (valeur réelle, ET_r). Les particularités qui modifient le k_c incluent notamment : la résistance à l'évaporation des feuilles, la hauteur de la culture, la rugosité les propriétés réfléchissantes du feuillage, le pourcentage de recouvrement du sol de la culture et le développement racinaire (Allen et coll., 1998). Il est à noter que la valeur ET_r fournie par le logiciel est une valeur d'évapotranspiration sous des conditions normales. C'est-à-dire que la culture doit se développer dans un environnement favorisant sa pleine productivité. Ainsi, l' ET_r n'est valide que lorsque les cultures sont en bonne santé, bien fertilisées et qu'elles poussent dans un sol dont le statut hydrique maximise leur productivité. De plus, les valeurs de k_c n'ont pas été validées dans un contexte de production québécois. L'utilisation à l'aveugle de ces valeurs peut devenir une source importante d'erreur dans le bilan hydrique. L'interface du logiciel de la C.-B. utilise des coefficients culturaux qui ne sont ajustables que mensuellement. Cette approche ne permet pas de bien exploiter la méthode du bilan hydrique. En effet, les paramètres affectant la valeur du k_c sont des paramètres physiques qui évoluent en fonction du stade de croissance. En modifiant le k_c du logiciel en fonction des stades de croissance de la culture, l'évapotranspiration de la culture peut se décaler par rapport à la situation « par défaut » (Figure 17). Ainsi, l'issue d'un k_c qui surestimerait la valeur d'évapotranspiration en début de saison amène une mauvaise estimation du statut hydrique du sol au point de départ de la simulation. De manière analogue, une surestimation de l'évapotranspiration en fin de saison pourrait engendrer des irrigations supplémentaires. La Figure 17 illustre parfaitement ce phénomène. Par exemple, au 15 juin,

l'écart entre la valeur par défaut et la valeur modifiée était d'environ 25 mm. Si la simulation du bilan hydrique avait été démarrée au tout début de la saison, ce 25 mm d'écart provoquerait peut-être une irrigation supplémentaire. Il est bon de rappeler que la méthode du bilan hydrique est une méthode cumulative. Alors, les écarts entre les valeurs, même petits, peuvent éventuellement occasionner une dérive importante du bilan. Modifier le k_c par un k_c prenant en considération le stade de croissance permettrait de bien considérer la variabilité des sites et des saisons. Un semis hâtif ou tardif, une culture courte ou tout changement affectant le stade de croissance de la culture à un moment donné prendrait tout son sens dans une interface pouvant en tenir compte.

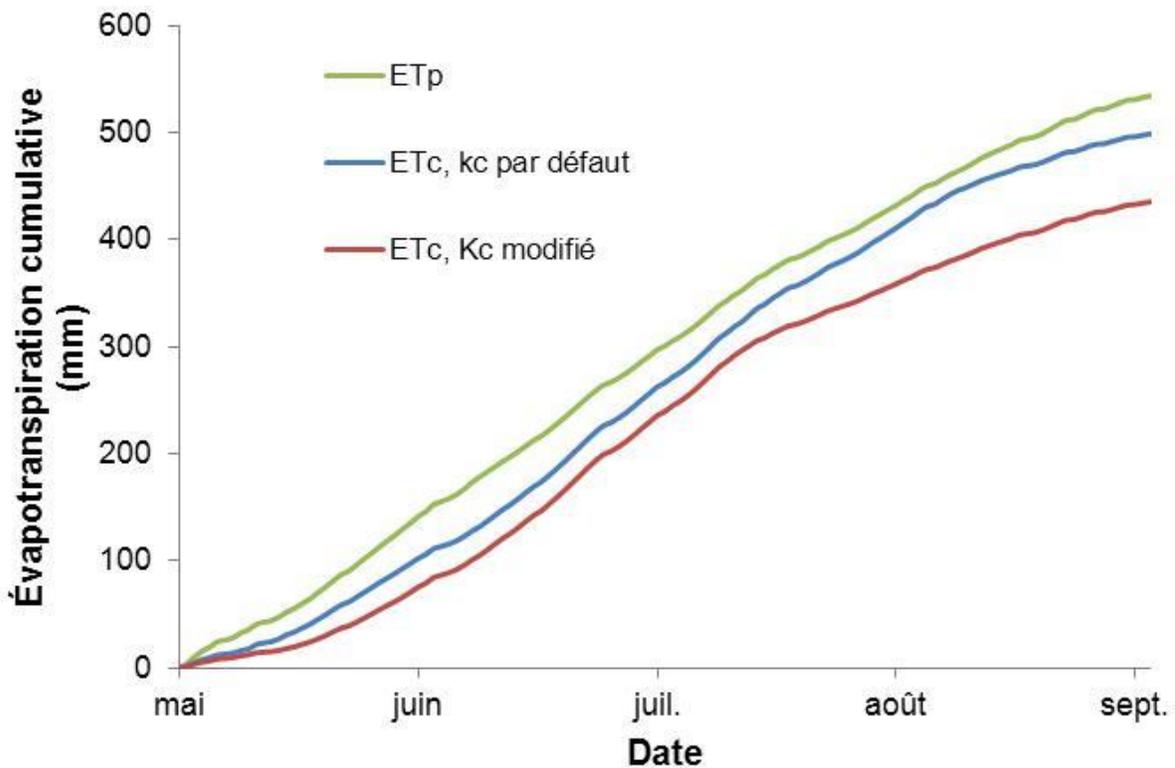


Figure 17. Influence du K_c sur l'évapotranspiration, Deschambault, saison 2012.

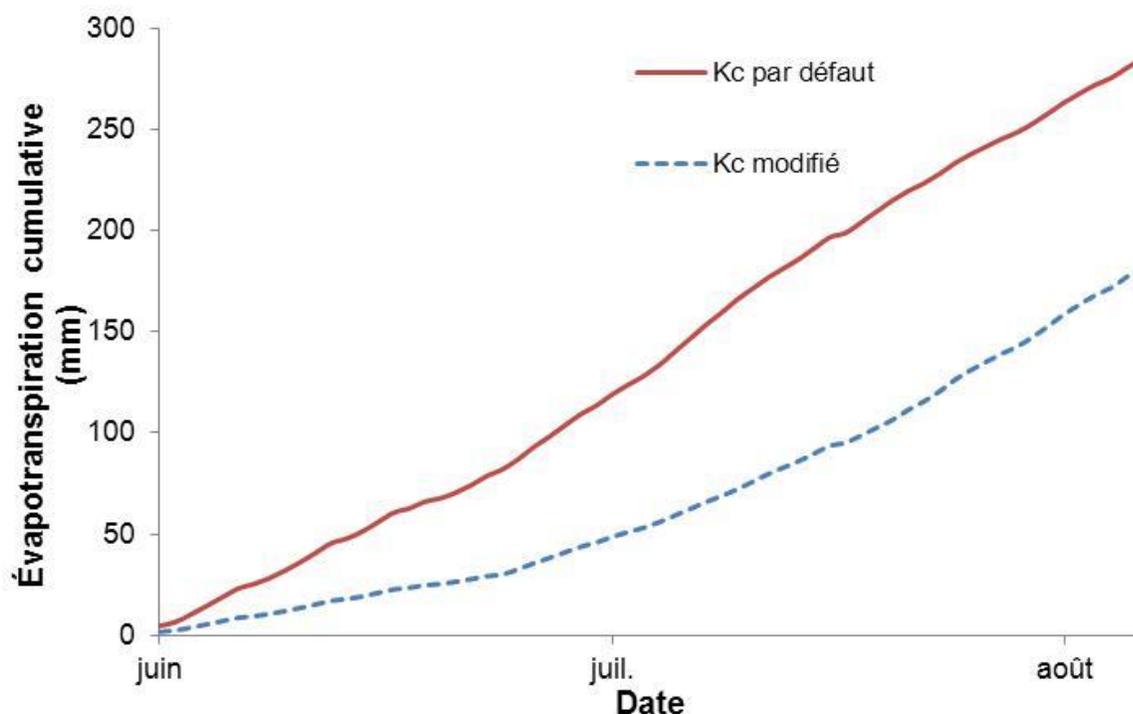


Figure 18. Évapotranspiration cumulative (mm) à Ste-Mélanie, saison 2013.

4.1.9 Stades phénologiques

Les outils de gestion de l'irrigation analysés et comparés dans le cadre de ce projet nécessitent tous une compréhension globale du stade de développement de la culture. Le stade de développement permet notamment d'évaluer la réserve en eau du sol facilement disponible à la plante, de par l'enracinement, et à déterminer le k_c à utiliser (dans le cas d'un k_c modifié). Des stades phénologiques spécifiques ont fait l'objet d'un suivi selon l'échelle BBCH pour les parcelles expérimentales d'haricots extra-fins seulement. Les différents stades phénologiques considérés (moment où la culture atteint celui-ci) sont la germination, le développement des feuilles, la floraison et la fructification. Les résultats de ces observations n'ont pu permettre de déceler des différences entre les traitements d'irrigation. Ces résultats sont présentés selon le nombre de jours après le semis (JAS).

Tableau 6. Évolution des stades phénologiques selon les traitements, Ste-Mélanie, saison 2012.

Saison	Cultivar	Sol	Date de semis	Traitement	2 feuilles étalées	1 ^{ère} foliole étalée	2 ^{ème} foliole et + étalée	Jours après semis (JAS)		
								Pleine floraison : 50 % fleurs ouvertes	1 ^{ères} gousses visibles	50 % gousses longueur finale
2012	<i>Denver</i>	Sable loameux	27 juin	BH	8	n.d.	22	45*	50	65
				Tensiomètre	8	n.d.	22	45*	50	58
				Témoin N-I	8	n.d.	22	42	50	58
2013	<i>Anger</i>	Sable	10 juin	BH	n.d.	22	30	39*	42	n.d.
				Tensiomètre	n.d.	22	30	39*	42	n.d.
				Témoin N-I	n.d.	22	30	39*	42	n.d.

* Valeur estimée

Pour la culture du haricot extra-fin, il existe une grande similitude des JAS entre les différents traitements. La seule différence notable est un retard de croissance de 7 jours pour le stade phénologique 50 % des gousses ayant atteint leur longueur finale pour le traitement BH par rapport aux autres traitements en 2012. Il demeure très difficile d'expliquer cette différence considérant que les plants soumis au traitement BH et celui tensiomètre ont sensiblement eu les mêmes conditions de croissance.

Pour le site de Deschambault, les stades phénologiques ont été déterminés à l'aide de photos prises hebdomadairement. L'observation n'a pas montré de différence significative entre les traitements. C'est pourquoi les résultats représentent les stades phénologiques observés pour l'ensemble des parcelles expérimentales (tous traitements confondus) (Tableau 7).

Tableau 7. Évolution des stades phénologiques de la *Goldrush* au site de Deschambault.

Saison	Cultivar	Sol	Date				
			Semis	100 % émergence	Renchaussage	Pleine floraison	Sénescence
2012	<i>Goldrush</i>	Loam sableux	15 mai	4 juin	19 juin	12 juillet	10 août
2013	<i>Goldrush</i>	Loam sableux	28 mai	25 juin	10 juillet	26 juillet*	19 août

*Date estimée

4.2 Comparer différents outils de gestion de l'irrigation

Il existe différents outils pour gérer l'irrigation. Certains outils effectuent des mesures directes tandis que d'autres relèvent des mesures indirectes. Les tensiomètres et les sondes réflectométriques, utilisés dans ce projet, effectuent des mesures directes dans le sol alors que le bilan hydrique évalue le statut hydrique du sol à partir des mesures indirectes. Les mesures indirectes du sol demeurent moins précises que les mesures directes, mais en élaborant le modèle hybride, combinant les deux méthodes, la précision pourrait être suffisante pour bien déterminer les événements d'irrigation souhaitables. Les outils de mesures directes serviront, dans un premier temps, de références pour valider le modèle hybride. Évidemment, chaque instrument a des avantages et inconvénients qui aident et handicapent simultanément le modèle hybride. L'utilisation des sondes réflectométriques n'est pas encore adaptée à la gestion de l'irrigation c'est pourquoi, les tensiomètres possèdent présentement le meilleur potentiel pour minimiser l'impact de cette problématique et d'assurer une évaluation optimale du statut hydrique du sol.

Mis en relation, les tensiomètres et les sondes réflectométriques deviennent des outils intéressants pour caractériser le phénomène de désorption en eau du sol (Figure 19 et Figure 20). Il est possible de remarquer une tendance similaire à la courbe de désorption obtenue en laboratoire avec un certain décalage au niveau des teneurs en eau. Le décalage des teneurs en eau pour les tensions données pourrait s'expliquer par un sol à texture plus grossière que celui analysé lors de l'échantillonnage. Autrement, une calibration a posteriori des sondes pourrait également régulariser la courbe de désorption pratique. De plus, étant donné que la lecture de la sonde réflectométrique n'est pas effectuée à la même profondeur, dû à des limites techniques de celle-ci, la relation entre les deux valeurs est à considérer avec retenue. Dans les limites actuelles de l'équipement, il est impossible de gérer adéquatement la gestion de l'irrigation avec une sonde réflectométrique à communication sans fil.

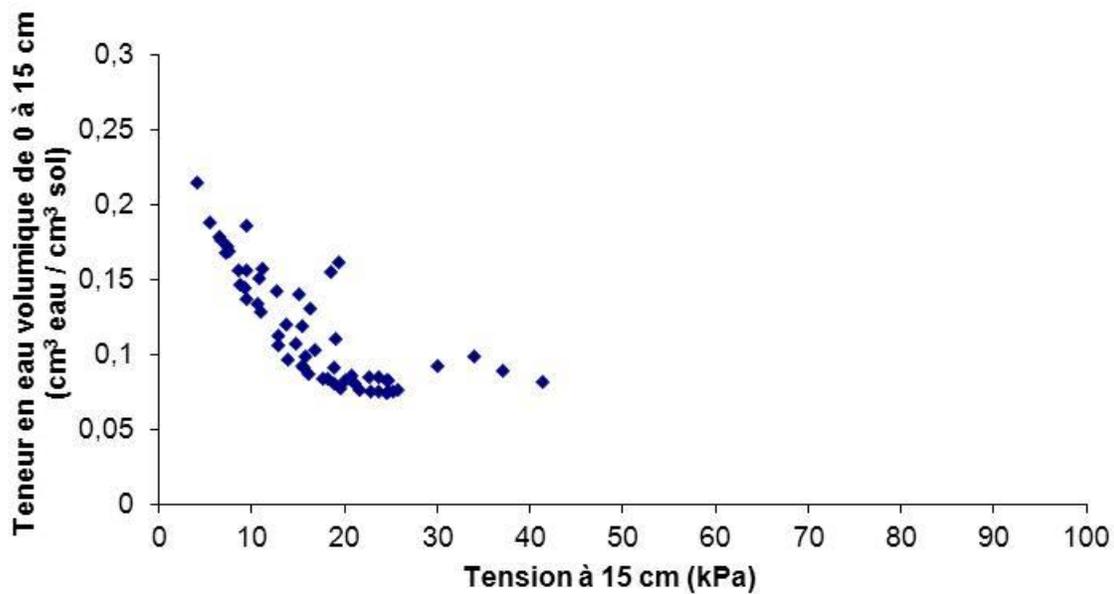


Figure 19. Courbe de désorption en eau du sol réalisée au champ, saison 2012.

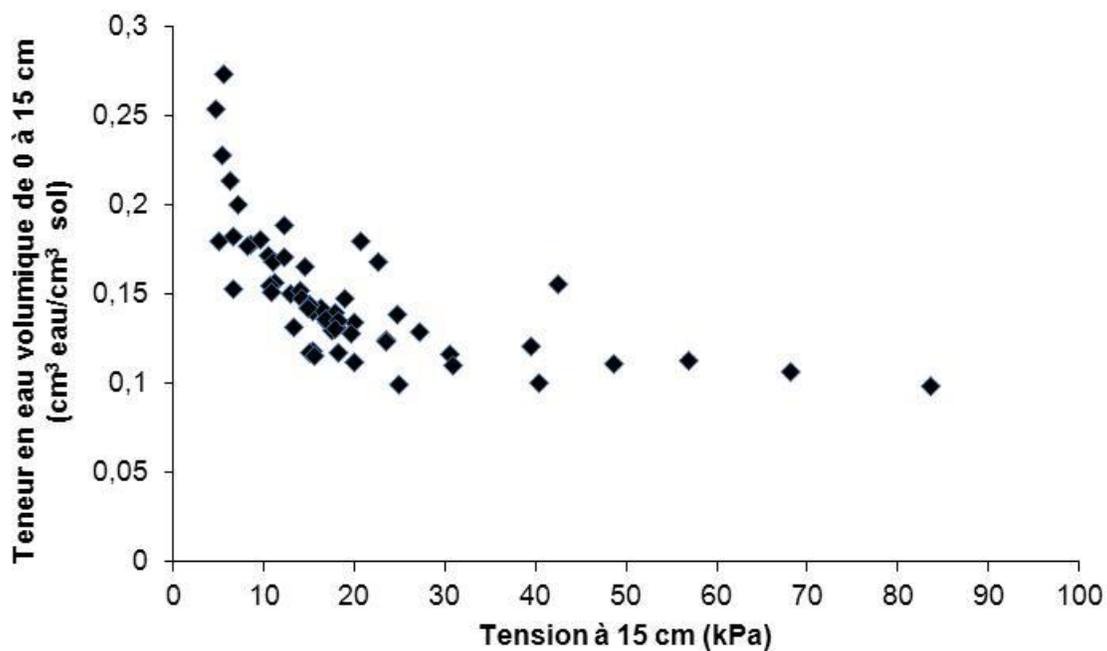


Figure 20. Courbe de désorption en eau du sol réalisée au champ, saison 2013.

Le bilan hydrique est un outil « grand public » qui a l'avantage d'être simple et convivial. S'ajustant à tous les types de sols minéraux, il est facile d'utiliser des valeurs par défaut ou de passer à des valeurs personnalisées. L'interface intègre aussi les prévisions météorologiques afin de prévoir les irrigations à venir au cours des prochains jours. Ceci constitue un avantage certain sur les autres outils de gestions qui ne possèdent pas cette fonction. Toutefois, la précision de la méthode telle que présentée n'est pas aussi grande qu'avec les autres outils de gestion de l'irrigation. La version à l'essai n'enregistre pas toujours les paramètres personnalisés. Ainsi, il faut à chaque simulation, recommencer le processus. Il est clair que ce ne sont que des petits désagréments qui pourront éventuellement être corrigés. Autre point à mentionner est que l'interface ne possède pas d'historique des événements d'irrigation ou du statut hydrique du sol à un moment donné. Ceci pourrait être fortement utile pour voir les grandes tendances du statut hydrique du sol. Les particularités des autres outils de gestion sont présentées au Tableau 8.

Tableau 8. Comparaison de différents outils de gestion de l'irrigation.

Outils de gestion	Avantages	Inconvénients	Coûts	Applications
Bilan hydrique (Interface C.-B.)	<ul style="list-style-type: none"> • Simple d'utilisation • Disponible pour de nombreuses cultures • Intègre des prévisions météorologiques • Gestion « extensive » 	<ul style="list-style-type: none"> • Précision par défaut à travailler • Certains bogues informatiques • Aucun historique annuel • Accessibilité à une station météo 	\$	Gestion de l'irrigation à l'échelle d'un champ
Tensiomètres	<ul style="list-style-type: none"> • Valeurs fiables • Peut mesurer un mouvement horizontal et vertical de l'eau • Acquisition de données possible 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite plusieurs appareils pour évaluer le statut hydrique d'un champ • Pas approprié aux sols lourds • Fragile • Matériel peut nuire aux opérations culturales 	\$ à \$\$\$	Gestion de l'irrigation à l'échelle d'une parcelle ou d'un champ
Sondes réflectométriques	<ul style="list-style-type: none"> • Valeurs fiables • Conception robuste • Fiabilité à long terme du matériel 	<ul style="list-style-type: none"> • Calibration complexe et fastidieuse • Nécessite beaucoup d'équipements connexes pour son bon fonctionnement • Matériel peut nuire aux opérations culturales • Pas adapté à la gestion de l'irrigation 	\$\$\$	Recherche

4.3 Évaluer une approche hybride de gestion de l'irrigation (bilan hydrique et appareils de mesure en temps réel)

L'intérêt d'une approche hybride combinant les avantages de la méthode du bilan hydrique et de celle considérant des mesures directes du statut hydrique du sol réside dans son efficacité à gérer les apports en eau par l'irrigation. Comme discuté précédemment, hormis pour la tensiométrie, il est impossible de vérifier avec les résultats obtenus si les différents outils de gestion auraient porté préjudice aux rendements des cultures à l'étude. Toutefois, comme la tensiométrie se base sur des mesures quantitatives et en temps réel du statut hydrique du sol, cette méthode demeure celle de référence. Ainsi, une différence de rendement entre les différents outils serait attribuable à une consigne de déclenchement de l'irrigation différente, donc à l'incapacité à estimer correctement l'atteinte du 50 % RU. En effet, comme la consigne est la même peu importe l'outil considéré, les épisodes d'irrigation devraient être déclenchés simultanément, peu importe le traitement. L'analyse à posteriori de la méthode du bilan hydrique et la démonstration théorique des dates d'irrigation démontrent que le seuil du 50 % RU n'est pas atteint simultanément entre les traitements. Toutefois, les résultats démontrent aussi qu'une fois la méthode du bilan hydrique bien calibrée, il est possible de s'approcher de la méthode de référence.

Au-delà d'un certain laps de temps, la méthode du bilan hydrique accumule de nombreuses petites erreurs qui peuvent occasionner un écart majeur entre le statut hydrique théorique et réel du sol. Le tensiomètre serait alors utile pour corriger l'estimation du statut hydrique du sol. Plusieurs facteurs interviennent dans la formation de ces écarts. Le k_c , la profondeur racinaire à maturité, la réserve utile en eau du sol, le coefficient de disponibilité de l'eau d'irrigation et de la pluie à la culture, la teneur en eau du sol au départ de la simulation et les erreurs associés à la méthode du calcul de ET_p sont autant de sources d'erreur. Comme mentionnés précédemment, en ce qui a trait aux k_c établis par le logiciel, ces derniers le sont selon le mois. Le stade de développement de la culture n'est alors que pris indirectement en compte. Il est certes possible de modifier la valeur du k_c en fonction des observations au champ, mais davantage de précision devrait être possible. Cette précision passerait par la possibilité de faire varier le k_c , indépendamment du mois. Ainsi, davantage de précision serait possible, surtout pour les cultures qui atteignent rapidement leur maturité comme le haricot extra-fin.

4.4 Anticipation des besoins en eau des cultures

Dans le cadre d'une gestion intégrée de l'irrigation, l'anticipation des besoins en eau des cultures est importante afin de bien planifier les opérations au champ. Les outils de gestion de l'irrigation deviennent alors une source d'information importante pour anticiper les besoins en eau des cultures.

À ce titre, dans la mesure où il est possible de compter sur la précision de la méthode du bilan hydrique, l'utilisation de l'interface pour anticiper les besoins en eau des cultures est sans pareil. En utilisant les valeurs d'évapotranspirations actuelles, la réserve en eau utile du sol et les prévisions météorologiques des prochains jours, l'interface évalue dans combien de jours surviendra la prochaine irrigation (Figure 21).

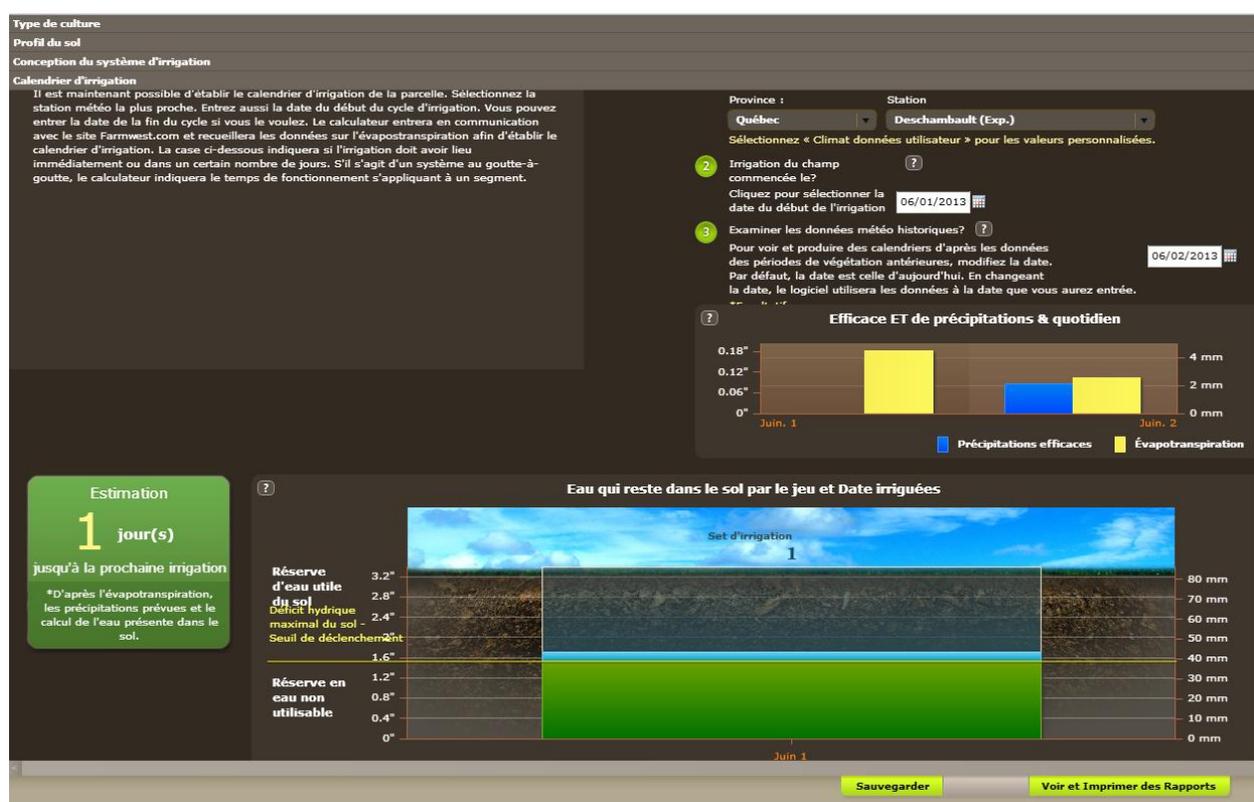


Figure 21. Anticipation du nombre de jours jusqu'à la prochaine irrigation par l'interface du bilan hydrique.

Cette fonctionnalité de l'interface demeure l'une de ses grandes forces puisque d'un coup d'œil, l'utilisateur peut anticiper les irrigations qu'il devra effectuer prochainement. Évidemment, il est nécessaire de faire cette démarche jour après jour afin de confirmer ou d'infirmer les prévisions météorologiques de s'assurer que l'anticipation du nombre de jours avant la prochaine irrigation soit encore valide.

La grande force de l'interface à bien anticiper les besoins en eau des prochains jours constitue un avantage marqué dans le cadre de cultures extensives utilisant des systèmes d'irrigation par aspersion de grande envergure (ex : rampe, canon). De tels systèmes sont utilisés pour couvrir une partie des superficies irriguées à la fois. Ainsi, ils nécessitent une bonne planification pour coordonner l'apport en eau avec les besoins des cultures. Le bilan hydrique devient un outil de planification intéressant qui peut allier les considérations pratiques des équipements et les besoins réels des cultures.

Du côté de la régie tensiométrique, il est aussi possible d'anticiper le besoin en eau des cultures, mais la démarche demande davantage de temps et d'expérience de la part de l'utilisateur. Grâce à l'historique du statut hydrique des derniers jours, il est possible d'évaluer dans combien de temps il sera nécessaire d'irriguer les cultures. Cette démarche peut être illustrée par le suivi tensiométrique à Ste-Mélanie en 2013 (Figure 22). Au 10 juillet, la pluie a occasionné une chute importante de la valeur lue par le tensiomètre à 15 cm (valeur près de 0 indique un état de saturation) et une légère baisse de la tension à 30 cm. Il est donc considéré que le sol était à la capacité au champ (CC) ou près de celle-ci, 24 heures après cet événement, soit le 12 juillet. Ensuite, l'irrigation est survenue le 17 juillet, soit au 5^e jour suivant la capacité au champ. Dans cette situation, il n'y a pas eu de précipitations entre la date de capacité au champ et la date d'irrigation, ce qui a évidemment facilité l'estimation. Qu'en est-il de la validité de cette démarche lorsque de petites précipitations se présentent entre la CC et la consigne d'irrigation? La date de la prochaine irrigation (le 28 juillet) est intéressante à analyser pour répondre à cette question. Irriguée le 17 juillet, la parcelle a ressuyé quelques pluies pour être à CC le 20 ou le 21 juillet. Utilisé bêtement, le nombre de jours entre la capacité au champ et la consigne d'irrigation établie précédemment aurait prédit une irrigation au 25 ou 26 juillet. Cependant, à ces dates, le statut hydrique du sol n'exigeait pas d'intervenir et d'irriguer. La pluie du 24 juillet, bien que légère, a étiré le délai de 5 jours. Afin de prendre en considération l'effet de la pluie sur l'anticipation des besoins en eau de la culture, il faut regarder le statut hydrique du sol au 26 juillet et de rechercher un statut hydrique équivalent dans l'historique. Une valeur assez similaire est celle du 15 juillet. Il est possible de recalculer le délai entre le 15 et le 17 juillet. L'estimation serait donc corrigée à environ 2 jours avant la prochaine irrigation. Effectivement, la prochaine irrigation s'est produite au 28 juillet (2 jours après le 26 juillet).

Anticiper les besoins en eau avec la méthode tensiométrique demande beaucoup d'expérience et d'observation. Tout comme le bilan hydrique, elle doit également être vérifiée et recalculée chaque jour. Il est clair que les estimations fournies par cette méthode constituent des approximations dans les conditions actuelles de croissance. C'est-à-dire que tout facteur affectant la demande en évapotranspiration des cultures peut modifier substantiellement les prévisions établies. Ainsi, ces prévisions sont temporaires et doivent faire l'objet du suivi rigoureux. De plus, sans archives tensiométriques d'un même champ et d'une même culture, il est impossible d'extrapoler et d'anticiper la première irrigation de la saison.

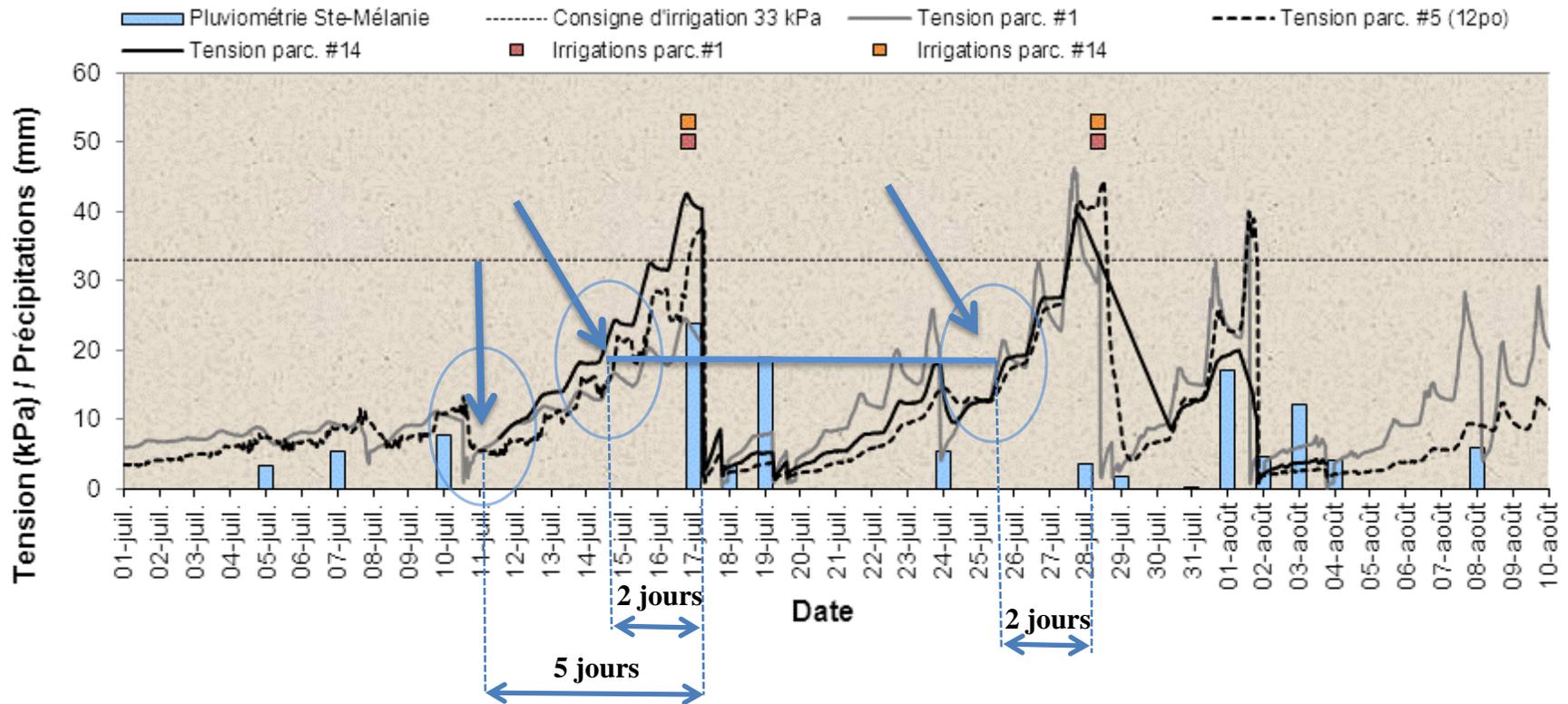


Figure 22. Anticipation du nombre de jours entre les irrigations avec la régie tensiométrique au site de Ste-Mélanie, saison 2013.

4.5 Évaluation économique des différentes méthodes de gestion

À des fins de comparaison, voici différents outils de gestion de l'irrigation ainsi que les frais liés à leur acquisition (Tableau 9). Les marques et les modèles détaillés ne constituent pas une référence en soi, mais plutôt une image des principaux équipements utilisés lors de ce projet ainsi que des équipements populaires vendus chez les détaillants spécialisés. Les stations météorologiques présentées possèdent toutes des modules de communication sans fil permettant de recevoir l'information de la station à distance. Pour la gestion tensiométrique, 3 modèles ont été retenus dont 1 à communication sans fil (Hortau TX3 web) et les autres à lectures manuelles (Soilmoisture et Irrrometer).

Tableau 9. Liste des prix des équipements nécessaire à la gestion de l'irrigation

Méthode / équipement	Marque/modèle ⁶	Description	Prix ⁷ (\$ CAN)
Bilan hydrique / Station météo	WatchDog [®] 2900ET	Modules et équipements de mesure	1 925
		Logiciel	343
		Système de communication	1300
		Hébergement des données (contrat 1 an)	457
		Base de fixation	116
		Total	4 141
	HOBO [®]	Modules et équipements de mesure	2 973
		Logiciel	111
		Système de communication	Inclus
		Hébergement des données (contrat 2 an)	370
		Base de fixation	393
		Total	3 847
	Hortau [®]	Modules et équipements de mesure	4 790
		Logiciel	Inclus
		Système de communication	6 715
Hébergement des données (contrat 1 an)		765	
Base de fixation		395	
Total		12 665⁸	
Tensiométrie / Tensiomètre	Hortau [®] TX3 web	Module	3 129
		Sondes (2)	1 190
		Hébergement des données (contrat 1 an)	765
	Total	5 084	
	Soilmoisture [®] JetFill	Tensiomètre 30 cm	194
	Irrometer [®]	Tensiomètre 30 cm	133

⁶ WatchDog[®] est une marque enregistrée par la compagnie Spectrum Technologies Inc., HOBO[®] est une marque enregistrée par la compagnie Onset Computer Corporation, Hortau[®] est une marque enregistrée par la compagnie Hortau Inc., Soilmoisture est un marque enregistrée de Soilmoisture Equipment corp.

⁷ Prix de janvier 2014 sans taxes, ni installation, ni transport.

⁸ Prix de 2012.

5 Conclusion

L'approche de gestion de l'irrigation basée sur le bilan hydrique n'est certes pas nouvelle, mais le logiciel évalué dans ce projet permet une « prise en charge » intéressante de l'utilisateur. Ce dernier doit cependant être familier avec les informations ayant trait aux caractéristiques physiques des sols, tant celles qui alimentent le logiciel que celles qui sont générées par ce dernier. Quoique l'approche basée sur le bilan hydrique ne soit pas aussi précise que celle ayant recourt aux tensiomètres, le faible coût de revient en fait une option incontournable pour les grandes superficies en culture irriguée. La précision en question est plus faible lorsque les conditions météorologiques sont davantage favorables aux stress conséquents à un déficit hydrique. En effet, l'approche surestimerait d'environ 20 % le nombre d'épisodes d'irrigation nécessaires pour maintenir le statut hydrique du sol à une valeur cible lors d'un été plus sec. Néanmoins, la méthode du bilan hydrique a permis d'anticiper les événements d'irrigation et de cibler des dates d'irrigation similaires à l'approche tensiométrique avec une précision de quelques jours avant le moment opportun. De plus, la méthode du bilan hydrique constitue un gain d'efficacité par rapport aux méthodes subjectives comme le toucher du sol ou la règle du pouce d'eau par semaine pour estimer le statut hydrique du sol. Peu importe la méthode utilisée pour gérer les apports en eau par l'irrigation, une caractérisation des propriétés physiques du sol est essentielle. Maintenant, pourquoi ne pas tirer profit des avantages du bilan hydrique et de la gestion tensiométrique? Une approche hybride où une validation des données générées par le bilan hydrique, avec quelques lectures directes réalisées avec des tensiomètres, serait un compromis avantageux entre le coût de revient et la précision obtenue. Appuyé par cette démarche quantitative, le jugement de l'utilisateur prendra ainsi tout son sens...

6 Améliorations du logiciel proposées

6.1 L'enregistrement

L'enregistrement des valeurs saisies des projets est à revoir. En effet, et ce à plusieurs reprises, l'interface n'enregistre pas les valeurs saisies. Donc, à chaque simulation, il faut vérifier chaque paramètre et saisir à nouveau les valeurs désirées.

6.2 Réinitialisation de la réserve utile

L'interface pourrait également se bonifier en intégrant un nouveau bouton pour « réinitialiser » la réserve utile en eau du sol. Ainsi, l'utilisateur pourrait remettre à zéro le bilan sans pour autant avoir à faire des irrigations à des dates fictives pour arriver à remplir à pleine capacité la réserve en eau du sol. Ce bouton serait grandement utile dans une approche hybride où les équipements à mesures directes du sol suggèreraient une remise à zéro du bilan.

6.3 Données météorologiques de l'utilisateur

La modification des valeurs d'évapotranspiration fournies par la station météorologique est une fonctionnalité intéressante, mais nettement négligée dans l'interface actuelle. Pour utiliser cette fonctionnalité, il faut entrer de nouvelles valeurs d'évapotranspiration et de précipitations pour les dates voulues. Comme il a démontré dans les sections précédentes, la variabilité des valeurs d'évapotranspiration des stations météorologiques avoisinantes l'une de l'autre est négligeable. De plus, ces valeurs d'évapotranspiration ont été soumises à un suivi de qualité afin d'assurer leur fiabilité. Par contre, la précipitation est un paramètre qui est beaucoup plus variable. Les précipitations locales peuvent ainsi passer très facilement inaperçues. Le pluviomètre est un équipement que plusieurs agriculteurs possèdent déjà. Or, il deviendrait intéressant d'utiliser uniquement les valeurs de précipitations à la ferme en combinaison avec les valeurs d'évapotranspiration de la station météorologique voisine. Pour arriver à cette fin, il suffirait de séparer les paramètres d'évapotranspiration et de précipitations dans la fonctionnalité « données climatologiques de l'utilisateur ».

6.4 Calendrier d'irrigation

Lorsqu'il y a simulation, il faut indiquer la date de la dernière irrigation. L'heure n'est ainsi pas prise en compte dans cette étape. La manière dont le logiciel utilise cette information est insidieuse et peut conduire à des erreurs. En fait, le logiciel va additionner l'effet de l'irrigation au bilan hydrique et soustraire l'évapotranspiration de la journée. Si, par exemple, l'irrigation a été faite en fin de journée, la réserve utile du sol devrait être à sa pleine capacité le lendemain. Or, il n'en est rien. Pour contourner ce problème, il suffirait d'utiliser l'heure à laquelle la dernière irrigation a eu lieu pour modifier le calcul s'il y a lieu.

6.5 Réserve facilement disponible à la plante

Dans les situations où la date d'irrigation a dépassé le moment idéal, l'interface du bilan hydrique crée un biais important dans le calcul du statut hydrique du sol. Voici un exemple concret : un sol x possède une réserve utile (RU) de 40 mm. À une consigne d'irrigation de 50 % de la RU, la réserve en eau du sol équivaut à 20 mm. L'interface soustrait l'évapotranspiration et additionne les précipitations effectives de la journée à la réserve utile de la plante. Lorsque 50 % de la réserve en eau utile du sol est épuisée, la plante est considérée en stress hydrique et son évapotranspiration réelle n'est plus la même que celle avancée par la station météorologique. Rappel : la valeur d'évapotranspiration fournie par la station météorologique est une valeur théorique lorsque la culture est dans un sol à la capacité au champ. L'interface continue de soustraire l'évapotranspiration à la RU. En réalité, lorsque la plante devient en stress hydrique, l'évapotranspiration diminue. Pour corriger ce problème, il faudrait ajouter un nouveau coefficient pour ajuster l'évapotranspiration. Or, il existe bel et bien un coefficient K_s qui permet d'ajuster l'évapotranspiration dans les situations de stress hydrique (Allen et coll., 1998). Autrement, à des fins de simplification, l'interface pourrait considérer les aspects suivants :

- Une irrigation fournissant un volume équivalent à la consigne d'irrigation recharge entièrement la RU du sol et ce, peu importe le statut hydrique du sol calculé par le bilan.
- L'interface arrête de soustraire des valeurs d'évapotranspiration lorsque la consigne d'irrigation est dépassée.

6.6 Coefficients culturaux

Présentement, l'interface utilise des coefficients culturaux mensuels. Tel que discuté dans la section 4.1.8, les coefficients devraient tenir compte du stade phénologique et du pourcentage de recouvrement au sol de la culture qui sont des facteurs prépondérants dans l'attribution du coefficient cultural. Aussi, il serait possible d'améliorer la précision du modèle en utilisant des coefficients qui varient progressivement plutôt que par palier.

6.7 Paillis et couverts végétaux

L'interface ne prend pas en considération les cultures sous paillis ou couverts végétaux. Il serait avantageux d'intégrer cette fonctionnalité puisque de nombreuses cultures utilisent ces techniques. En parallèle avec cette modification, il faudrait ajouter un coefficient d'efficacité de la pluie ajustable qui est un élément très important à prendre en considération dans le cas des cultures sous paillis.

6.8 Historique

Une gestion raisonnée de l'irrigation comporte également une analyse des dates d'irrigation et des volumes d'eau utilisés au cours de la saison de croissance. L'ajout d'un module « historique » permettrait d'archiver les données à des fins de comparaison entre les saisons. De plus, un archivage judicieusement conçu deviendrait un outil intéressant à consulter.

6.9 Mise à jour des stations météorologiques

Finalement, la date et l'heure de la dernière mise à jour entre le logiciel et la station météorologique à laquelle il se réfère pourraient s'afficher lors des simulations. Cette information est essentielle dans un processus décisionnel et pourtant absent jusqu'à présent.

6.10 Révision de la version française de l'interface web

Il persiste encore certaines erreurs de nomenclature dans l'interface. Une révision en profondeur serait nécessaire afin que la version française soit du même niveau que celle de la version originale anglaise.

7 Diffusion des résultats

- Site Internet de l'IRDA <http://www.irda.qc.ca>, depuis avril 2011.
- Journée d'information « Gestion de l'eau en horticulture » organisée par le MAPAQ-DRCN et le RLIO le 27 février 2013 à Ste-Famille, I.-O.
- Journée d'information « La nutrition hydrique et minérale de la pomme de terre : une gestion unifiée pour augmenter la productivité! » organisée par l'IRDA le 29 novembre 2013, à Québec.

8 Bibliographie

Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). 2002. *Le système canadien de classification des sols*, 3^e édition, Presses scientifiques du CNRC, Ottawa, Canada, 196 p.

Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes et M. Smith. 1998. *Crop Evapotranspiration – Guidelines for computing crop Requirements*. FAO Irrigation and drainage no. 56, Food and Agriculture organization, Rome 333 p.

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

American Society of Civil Engineering (ASCE), 2005. *The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation*. Report of ASCE Standardization of Reference Evapotranspiration Task Committee, American Society of Civil Engineering, 59 p.

Baier, W. et G. W. Robertson. 1965. *Evaluation of latent evaporation from simple weather observations*. Canadian Journal of Plant Sciences 45: p. 276-284.

Bergeron, D. 2012. *L'irrigation de la pomme de terre au Québec : état de la situation et tendances*. Présenté lors du colloque sur la pomme de terre, 23 novembre 2012, Lévis, Québec.

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. (CDAQ n° 6163).

Boivin, C. et C. Landry. 2011. *Impact du pilotage raisonné de l'irrigation sur l'efficacité fertilisante azotée et le rendement en pommes de terre*. Rapport final déposé au CDAQ (n° 6374). IRDA. 71 p.

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. (CDAQ n° 5218).

BPR. 2003. *Analyse des questions d'approvisionnement en eau pour le secteur de l'agriculture, Programme national d'approvisionnement en eau, Province de Québec*, Rapport final. 68 p.

Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2010. *Références économiques, Pommes de terre de table, Budget variétés tardives.* AGDEX 258/821h, mars.

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

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

Giroux, I. et B. Sarrasin. 2011. *Pesticides et nitrates dans l'eau souterraine près de cultures de pommes de terre - Échantillonnage dans quelques régions du Québec en 2008 et 2009,* ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Direction du suivi de l'état de l'environnement, Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, ISBN 978-2-550-61396-1, 31 p. et 5 annexes.

http://www.mddep.gouv.qc.ca/pesticides/pomme_terre/index.htm

McGill, W.B. et C.T. Figueiredo. 1993. *Total nitrogen,* M.R. Carter (ed.) *Soil Sampling and Methods of Analysis,* Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, p. 201-211.

Otrysko, B., G. Banville et A. Asselin. 1984 *Anastomosis-group identification of Rhizoctonia solani isolates obtained from sclerotia occurring on potato tubers.,* presented at the annual meeting of the Canadian Phytopathological Society University of Guelph, Guelph, Ontario 12-16 August 1984.

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.

Tran, T.S. et R.R. Simard. 1993. *Mehlich III-extractable nutrients,* M. R. Carter, ed. *Soil sampling and methods of analysis,* Lewis Publishers, London, UK, p. 43-50.

Zadoks, J.C., T.T. Chang et C.F. Konzak. 1974. *A decimal code for the growth stages of cereals.* *Weed Research* 14 (6), p. 415-421.

9 Annexe

9.1 Équation Penman-Montheith

$$ET_p = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} V_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d V_2)}$$

Équation 1. Équation de Penman-Montheith (ASCE, 2005)

Où

ET_p : évapotranspiration potentielle [mm jour⁻¹],

R_n : radiation solaire nette à la surface de la culture [MJ m⁻² jour⁻¹],

G : flux de chaleur au sol [MJ m⁻² jour⁻¹],

T : température moyenne journalière à une hauteur de 2 m [°C],

V_2 : vitesse du vent à une hauteur de 2m [m s⁻¹],

C_n : constante changeant selon la taille des cultures (900 petites; 1600 grandes)

C_d : constante changeant selon la taille des cultures

e_s : pression moyenne de vapeur saturée [kPa],

e_a : pression de vapeur actuelle [kPa],

$e_s - e_a$: déficit de pression de vapeur saturée [kPa],

Δ : pente de la pression de vapeur saturée à la température moyenne de l'air [kPa °C⁻¹],

γ : constante psychrométrique [kPa °C⁻¹].

9.2 Équation Baier-Robertson

$$ET_p = -5,39 + 0,157 T_{max} + (T_{max} - T_{min}) + 0.00457R_a$$

Équation 2. Équation de Baier-Robertson (Baier et Robertson, 1965)

Où

ET_p : évapotranspiration potentielle [mm jour⁻¹],

T_{max} : température journalière maximale de l'air [°C],

T_{min} : température journalière minimale de l'air [°C],

R_a : radiation extraterrestre [cal/cm²j].

9.3 Paramètres utilisés dans l'interface du bilan hydrique

Le Tableau 10 présente les différents paramètres proposés par l'interface et ceux utilisés dans le cadre du « scénario bonifié » pour le site de Deschambault.

Tableau 10. Paramètres du bilan hydrique par défaut et modifiés.

Paramètre	Par défaut	Scénario bonifié
Culture	Pomme de terre	Pomme de terre
Profondeur d'enracinement à maturité	0,61 m	n.d.
Coefficient de disponibilité	0,35	0,5 ⁹
Coefficients culturaux	Mai	0,5
	Juin	0,8
	Juillet	1,1
	Août	1,1
	Septembre	0,75
	« Off Season »	0,5
Réserve utile en eau	73,2 mm ¹⁰	86 mm ¹¹
Taux maximal d'application	3,35 mm/h	21,8 mm/h
Déficit hydrique maximal du sol	25,6 mm	43 mm

⁹ Équivalent de la consigne 50 % de la RU

¹⁰ Selon une profondeur racinaire de 60, 1 cm

¹¹ Selon une gestion de la profondeur racinaire à 30 cm

9.4 Photographies



Photographie 1. Station météorologique complète.



Photographie 2. Tensiomètre de marque Hortau (modèle TX-3).



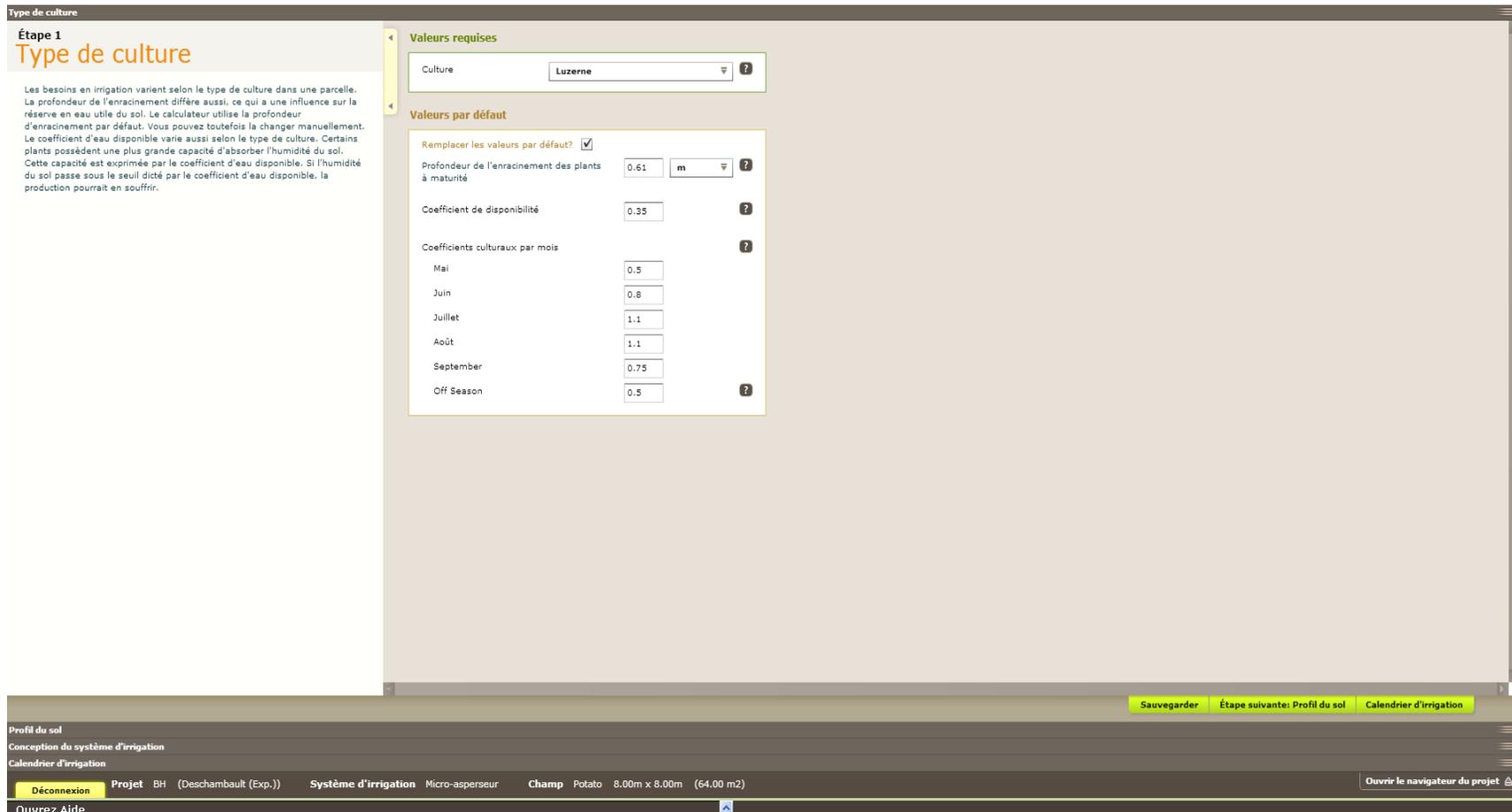
Photographie 3. Sonde TDR à communication sans fil (à titre indicatif seulement).



Photographie 4. Image de recouvrement avant traitement .



Photographie 5. Image de recouvrement après traitement (analyse du rang central).



Photographie 6. Étape 1 de l'interface: type de culture, coefficient de disponibilité et coefficients culturaux.

Type de culture
Profil du sol

Étape 2

Profil du sol

La rétention d'eau varie selon la texture du sol. L'irrigation permet de refaire la réserve d'eau du sol. En sachant quelle est la texture du sol, on peut irriguer correctement sans gaspiller l'eau. La plupart des champs n'ont pas qu'un type de sol suivant les couches. Entrez chaque couche de terrain et le logiciel calculera la réserve d'eau utile. Le déficit hydrique maximal sera aussi calculé en fonction du type de culture que vous avez sélectionné précédemment. Il s'agit de la réserve d'eau utile pour la croissance des plants.

Étape précédente: Type de culture

Valeurs requises

Texture du sol suivant la profondeur: MM

Profondeur de la couche de sol	Type de sol	Réserve d'eau utile du sol
1000 cm	Loam sableux	12 cm/m

Ajoutez la couche de sol.

Couverture de gazon de placage

Valeurs par défaut

Remplacer les valeurs par défaut?

Réserve totale d'eau utile: 76.2 MM

Taux maximal d'application: 6.35 mm/h

Déficit hydrique maximal du sol: 26.67 MM

Sauvegarder Étape suivante: Conception du système d'irrigation Calendrier d'irrigation

Conception du système d'irrigation
Calendrier d'irrigation

Déconnexion Projet BH (Deschambault (Exp.)) Système d'irrigation Micro-asperseur Champ Potato 8.00m x 8.00m (64.00 m2) Ouvrir le navigateur du projet

Ouvrez Aide

Photographie 7. Étape 2 de l'interface : détermination de la réserve en eau du sol.

Type de culture
Profil du sol
Conception du système d'irrigation

0.00

Conception du système d'irrigation

La zone irriguée par chaque asperseur est déterminée par l'espacement des asperseurs et de la rampe. La taille de la buse et la pression déterminent le débit de chaque asperseur. Ces valeurs servent au calcul du taux d'application du système d'irrigation. La durée de l'arrosage détermine la hauteur d'eau apportée par l'irrigation. Le calculateur utilise l'efficacité par défaut de l'application pour établir la quantité nette d'eau appliquée sur le sol. Le nombre de portions sert à calculer l'intervalle d'irrigation.

Étape précédente: Profil du sol

Valeurs requises

Espacement des asperseurs: 8 m

Espacement latéral: 8 m

Nombre de portions: 1

Durée de l'irrigation: 10 hrs

Sprinkler Size

Nominale (en)	Decimal (en)	Métrique (mm)
-	0.040	1.02
-	0.045	1.14
-	0.050	1.27
-	0.055	1.40
-	0.060	1.52
1/16	0.063	1.59

Water Pressure: lb/po2, kPa, Bar

Valeurs par défaut

Remplacer les valeurs par défaut?

Nombre de portions par jour: 24

Débit: 22.63 l/m

Efficacité d'application de l'eau: 75 %

Valeurs calculées

Taux d'application: 21.34 mm/h

Avis : Demande de taux trop élevé

Le taux d'application de ce système d'irrigation est supérieure au taux de demande maximale pour la couche de sol sous-jacent. Modifier les paramètres de cet écran pour abaisser le taux d'application pour corriger.

Quantité d'eau appliquée: 213.36 MM

Quantité nette d'eau appliquée: 160.02 MM

Sauvegarder Étape suivante: Calendrier d'irrigation

Calendrier d'irrigation

Déconnexion Projet BH (Deschambault (Exp.)) Système d'irrigation Micro-asperseur Champ Potato 8.00m x 8.00m (64.00 m2) Ouvrir le navigateur du projet

Ouvrez Aide

Photographie 8. Étape 3 de l'interface : conception du système d'irrigation.

Type de culture
 Profil du sol
 Conception du système d'irrigation
 Calendrier d'irrigation

Étape 4
Calendrier d'irrigation

Il est maintenant possible d'établir le calendrier d'irrigation de la parcelle. Sélectionnez la station météo la plus proche. Entrez aussi la date du début du cycle d'irrigation. Vous pouvez entrer la date de la fin du cycle si vous le voulez. Le calculateur entrera en communication avec le site Farmwest.com et recueillera les données sur l'évapotranspiration afin d'établir le calendrier d'irrigation. La case ci-dessous indiquera si l'irrigation doit avoir lieu immédiatement ou dans un certain nombre de jours. S'il s'agit d'un système au goutte-à-goutte, le calculateur indiquera le temps de fonctionnement s'appliquant à un segment.

Étape précédente: Calendrier d'irrigation

- Station météo la plus proche ?
 Province : Québec Station : Deschambault (Exp.)
 Sélectionnez « Climat données utilisateur » pour les valeurs personnalisées.
- Irrigation du champ commencée le? ?
 Cliquez pour sélectionner la date du début de l'irrigation 08/01/2013
- Examiner les données météo historiques? ?
 Pour voir et produire des calendriers d'après les données des périodes de végétation antérieures, modifiez la date. Par défaut, la date est celle d'aujourd'hui. En changeant la date, le logiciel utilisera les données à la date que vous aurez entrée. 08/02/2013

Efficace ET de précipitations & quotidien

Date	Précipitations efficaces	Évapotranspiration
08/01/2013	~0.08	~0.16
08/02/2013	~0.08	~0.16

Estimation
1 jour(s)
 jusqu'à la prochaine irrigation

*D'après l'évapotranspiration, les précipitations prévues et le calcul de l'eau présente dans le sol.

Eau qui reste dans le sol par le jeu et Date irriguées

Réserve d'eau utile du sol
 District hydrique maximal du sol - Seuil de déclenchement

Réserve en eau non utilisable

Set d'irrigation 1

08/01 08/02 08/03 08/04 08/05 08/06 08/07 08/08 08/09 08/10

08/01 Date de l'estimation

Sauvegarder Voir et Imprimer des Rapports

Déconnexion Projet BH (Deschambault (Exp.)) Système d'irrigation Micro-asperseur Champ Potato 8.00m x 8.00m (64.00 m2) Ouvrir le navigateur du projet

Photographie 9. Étape 4 de l'interface : données météorologiques et calendrier d'irrigation.



Photographie 10. Travail du sol précédant la plantation au site de Deschambault le 15 mai 2012.



Photographie 11. Plantation des parcelles au site de Deschambault le 15 mai 2012.



Photographie 12. Parcelles expérimentales au site de Deschambault le 13 juin 2012.



Photographie 13. Parcelles expérimentales au site de Deschambault le 4 juin 2012.



Photographie 14. Parcelles expérimentales au site de Deschambault le 26 juillet 2012.



Photographie 15. Gicleurs en action au site de Deschambault, été 2012.



Photographie 16. Stations météorologiques au site de Deschambault, été 2012.



Photographie 17. Sénescence des plants au site de Deschambault le 20 août 2012.

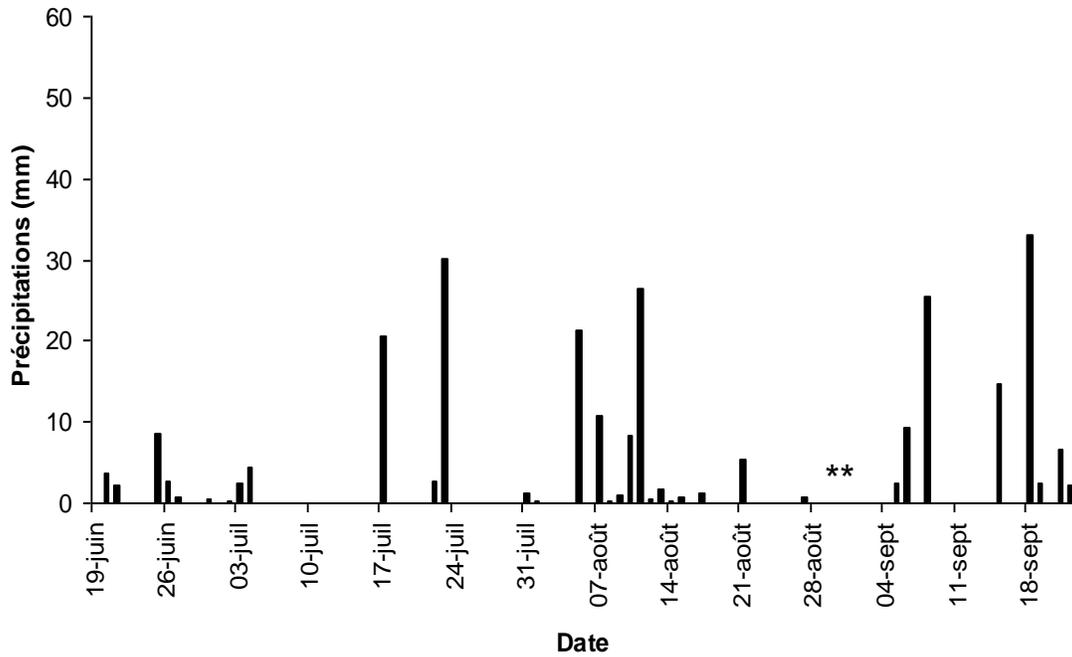


Photographie 18. Récolte au site de Lanoraie le 5 octobre 2012.



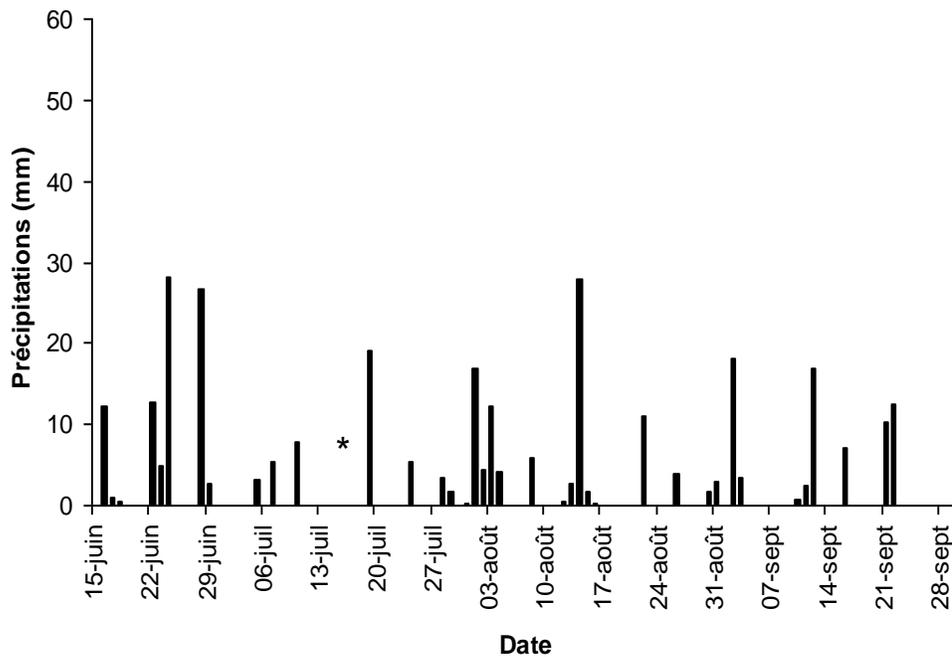
Photographie 19. Champ de haricots extra-fins au site de Ste-Mélanie le 31 août 2012.

9.5 Pluviométrie



** Données manquantes au 31 août et au 1^e septembre

Figure 23. Précipitations (mm) mesurées au site de Ste-Mélanie, saison 2012.



*Donnée manquante au 18 juillet

Figure 24. Précipitations (mm) mesurées au site de Ste-Mélanie, saison 2013.

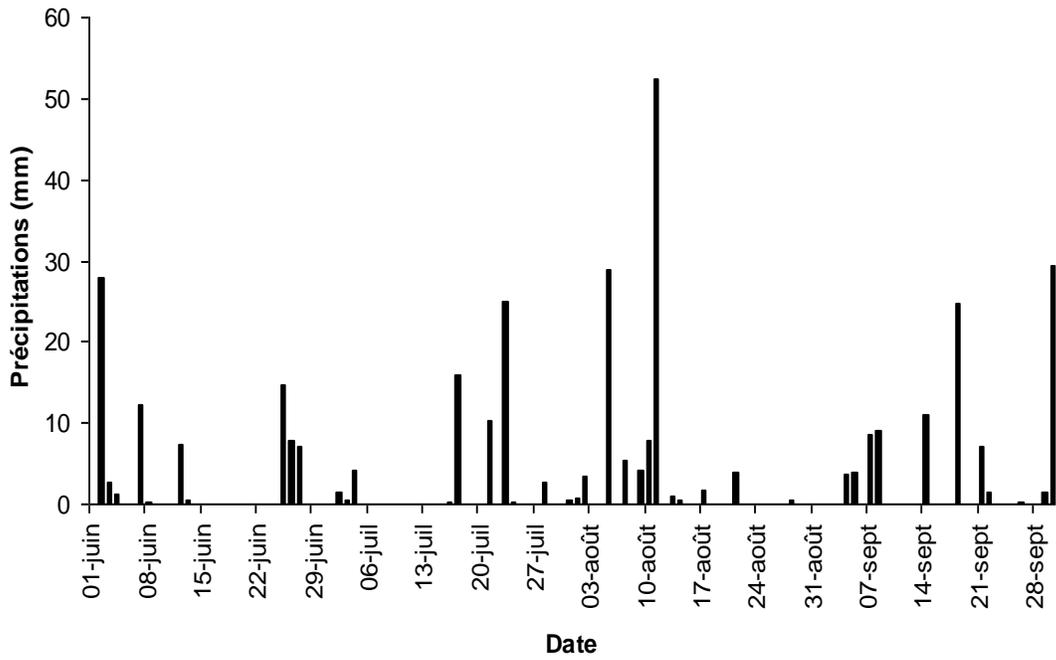


Figure 25. Précipitations (mm) mesurées au site de Lanoraie, saison 2012.

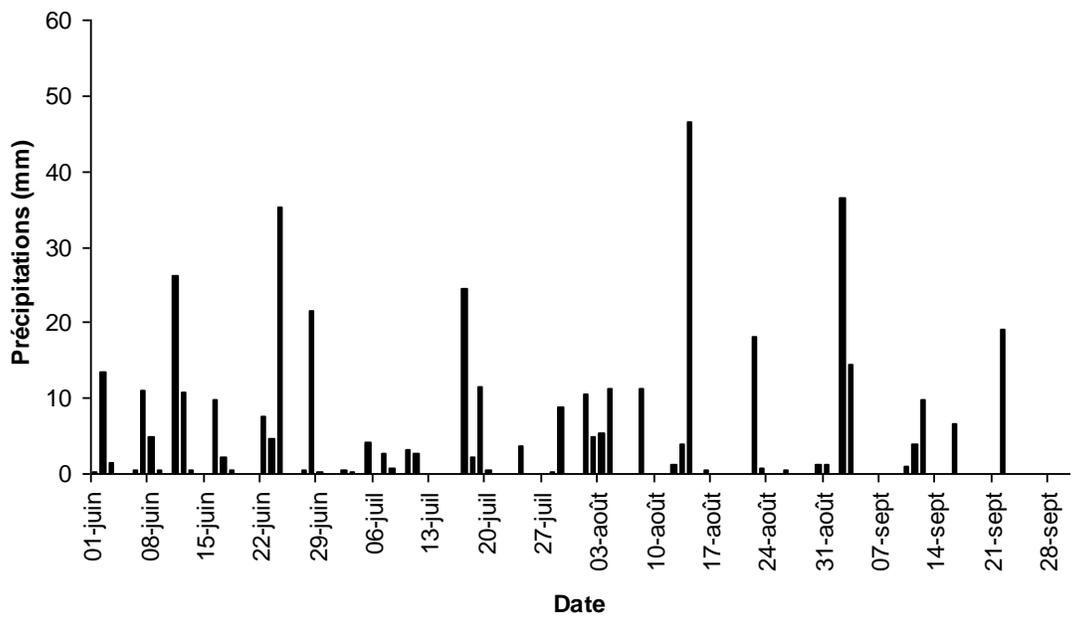


Figure 26. Précipitations (mm) mesurées au site de Lanoraie, saison 2013.

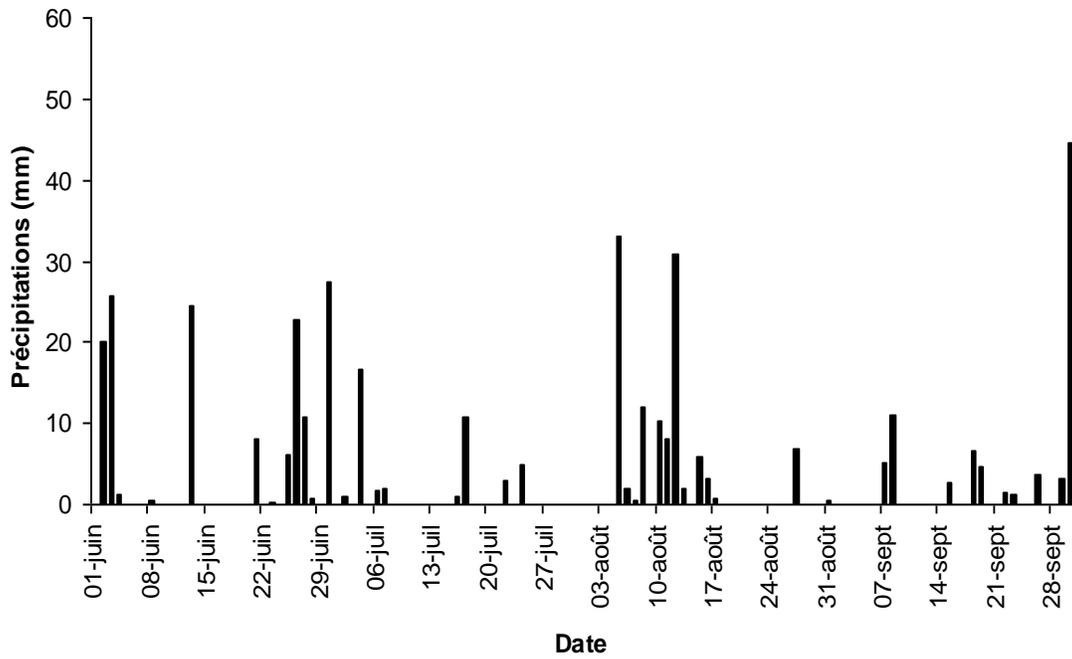


Figure 27. Précipitations (mm) mesurées au site de Deschambault, saison 2012.

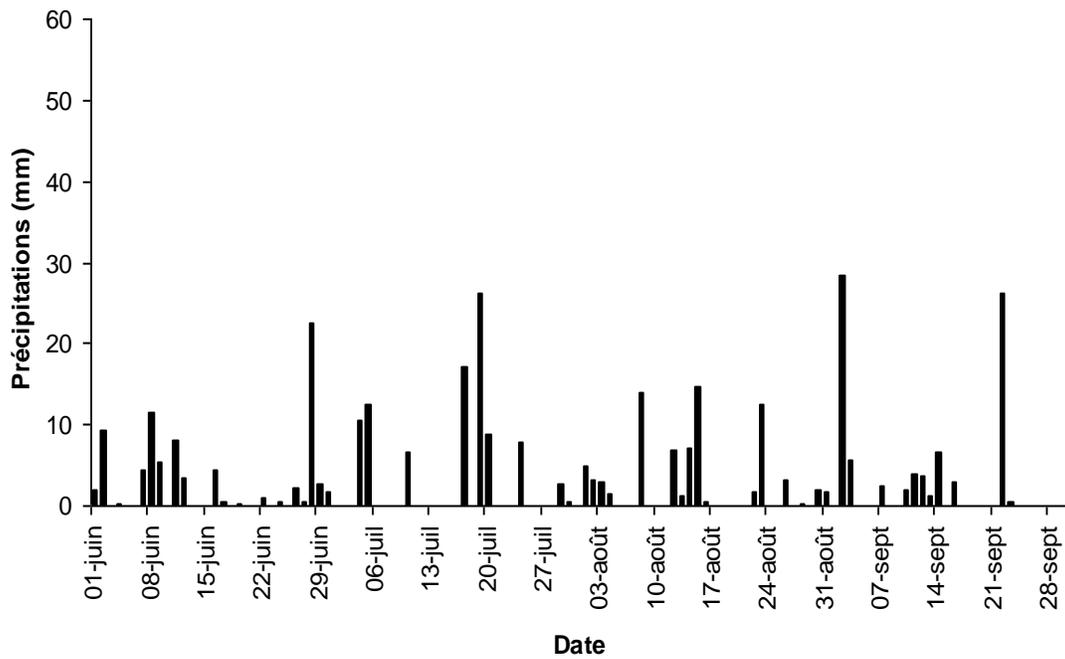


Figure 28. Précipitations (mm) mesurées au site de Deschambault, saison 2013.