

Rapport final

No projet : IA115429

Régie raisonnée de l'eau pour le bleuet nain cultivé dans un contexte de climat variable et en évolution

Carl Boivin, Gaétan Bourgeois, Jérémie Vallée, Paul Deschênes, Luc Belzile, Pierre-Olivier Martel et Daniel Bergeron

Responsable scientifique : Carl Boivin

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

22 juillet 2019

RÉSUMÉ

CONTEXTE

Le Québec est le principal producteur de bleuets nains au Canada, avec 35 % de la production. La production est transformée et commercialisée sur le marché canadien (15%) ou exportée (85 %). En 2012, la valeur des exportations en provenance des usines du Québec s'élevait à près de 90 M\$. Ce secteur subit d'importantes fluctuations de production en raison des dommages causés par le gel des fleurs et la sécheresse. Cette variabilité de la production et de l'offre à l'exportation rend la situation difficile. L'irrigation contre le gel des fleurs ou pour éviter un stress hydrique s'avère une solution potentielle pour stabiliser les rendements, mais son utilisation reste marginale au Québec compte tenu de l'ampleur des investissements et des volumes d'eau requis et du manque de connaissances sur sa mise en œuvre et sa rentabilité. Il s'avère donc important d'évaluer cette pratique en climat actuel, mais également en tenant compte des changements climatiques.

OBJECTIF

Développer une approche visant l'optimisation de la gestion de l'eau dans la production du bleuet nain cultivé et vérifier la robustesse de cette approche compte tenu de la variabilité et de l'évolution du climat.

DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE

- Développement de connaissances et d'outils pour raisonner l'irrigation en fonction du risque de gel des fleurs et du stress hydrique sur la base de données issue d'expérimentation dans des bleuetières et d'un modèle bioclimatique de développement phénologique du bleuet nain;
- Évaluation de l'impact des changements climatiques sur les risques de gel des fleurs et de stress hydrique dans les principales régions de production du Québec en combinant le modèle de phénologie et une approche par bilan hydrique à des scénarios climatiques à l'horizon 2050;
- Analyse de la rentabilité financière de scénarios et systèmes d'irrigation en climats actuels et futurs.

RÉSULTATS

L'analyse statistique des résultats n'a pas permis d'établir de relations significatives entre les quatre régimes hydriques à l'étude ou des conditions de stress hydriques et les rendements. La grande variabilité observée explique possiblement cette difficulté. Que les parcelles aient été ou non irriguées, le rendement mesuré dans ces dernières a pu se retrouver, tant aux limites supérieures, qu'inférieures. Des facteurs, autres que le régime hydrique, semblent expliquer cette variation de rendement. Dans le contexte étudié (climat et régie de culture) le risque que

la culture subisse un stress hydrique est faible. Toutefois, ce risque doit toujours être évalué pour chaque entreprise individuellement.

Le prélèvement en eau, mesuré en continu, suggère que le potentiel de rendement des bleuetières suivies est fort probablement plus élevé. Actuellement, le prélèvement quotidien est généralement de 50 % inférieur à la demande en évapotranspiration potentielle (ET_p). La plupart des cultures atteignent 100 % de l' ET_p à un moment ou un autre de la saison. Si cette hypothèse se vérifie, le risque de stress hydrique pourrait augmenter. En conditions actuelles (climat et prélèvement en eau), une réserve en eau du sol facilement utilisable par la culture (RFU) de 20 mm pourrait être épuisée de 4,6 à 9,0 jours par saison et en climat futur de 4,6 à 13,5 jours (scénario inférieur) et de 9,1 à 22,5 jours (scénario supérieur).

Dans le contexte actuel (coût de l'assurance-récolte, prix de vente du bleuet, coût des systèmes d'irrigation et climat), il semble que l'investissement dans un système d'irrigation n'est pas avantageux par rapport à l'assurance-récolte, si la finalité de ce système est essentiellement ou uniquement la gestion des risques climatiques.

En climat futur, le risque associé au synchronisme fleur-gel sera comparable à celui actuel, soit près de 1,0 à 1,9 jour où la température de l'air pourrait être inférieure à 0°C durant la floraison. En ce qui a trait à ces conditions lors de la maturation des fruits, le nombre de jours est de 0,0 à 0,9, peu importe la période ou le scénario.

SUITES RECOMMANDÉES OU RETOMBÉE POUR L'ADAPTATION

L'approche du « prélèvement en eau de la culture » comme un indice pour évaluer le potentiel de rendement d'une bleuetière démontre un potentiel intéressant. En identifiant des conditions environnementales, autres que la génétique des plants, qui sont favorables à un prélèvement en eau de la culture supérieur, des interventions pourraient être proposées pour augmenter le rendement des zones de champs plus faibles. Le potentiel de rendement augmenté, et par conséquent le risque de stress hydrique, la rentabilité de l'irrigation pourrait en être facilitée.

L'analyse économique pourrait être approfondie en étudiant selon différents marchés (ex. : transformation, frais, autocueillette) différentes combinaisons de système d'irrigation et de différents plans de couverture d'assurance-récolte. En effet, il existe probablement un optimum selon le type d'entreprises, ses rendements probables et ses superficies pour une combinaison d'irrigation et de produits d'assurance.

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction et contexte	14
2. Objectifs.....	15
3. Cadre théorique / compte-rendu de la revue de la littérature	16
4. Méthodologie / données	22
Volet 1. Développer des connaissances et des outils pour raisonner l'irrigation en fonction du stress hydrique et du risque de gel des fleurs	22
Sites expérimentaux.....	22
Matériel végétal, régie de culture et cycle de production.....	22
Traitements.....	23
Détermination des consignes d'irrigation.....	24
Dispositifs expérimentaux et analyses statistiques	27
Système d'irrigation et dimension des unités expérimentales	32
Collecte des données	34
Caractérisation des propriétés physiques du sol.....	34
Conditions météorologiques et évapotranspiration potentielle.....	34
Température de l'air dans le couvert végétal.....	35
Suivi statut hydrique du sol.....	35
Statut nutritionnel des feuilles	36
Nombre de bourgeons floraux.....	36
Récolte	36
Coefficients culturaux (K_c).....	37
Récapitulatif des principales étapes de réalisation des essais terrains	38
Volet 2. Impact d'un climat en évolution sur le synchronisme fleur-gel et le bilan hydrique.....	39
Amélioration des estimations de l' ET_p et intégration dans le calcul du bilan hydrique	39
Modèle bioclimatique pour le développement phénologique du bleuet nain	40
Modèle bioclimatique pour la prédiction du rendement potentiel du bleuet nain	41
Réserve en eau du sol facilement utilisable (RFU) et coefficient cultural (K_c).....	45
Volet 3. Analyser la rentabilité de l'irrigation en climat actuel et futur	46
Coûts de possession et d'opération.....	46
Seuil de rentabilité	47
Assurance-récolte	47
Systèmes d'irrigation retenus.....	47

5. Résultats.....	49
Volet 1. Développer des connaissances et des outils pour raisonner l'irrigation en fonction du stress hydrique et du risque de gel des fleurs	49
Conditions météorologiques.....	49
Nombre d'épisodes d'irrigation	50
Irrigation contre le gel des fleurs	55
Prélèvement en eau de la culture.....	57
Période d'activité de la culture durant une journée.....	57
Période prolongée sans précipitations	58
Statut hydrique du sol durant les essais	68
Variables mesurées.....	69
Cycle de production n° 1 – Champs 1	69
Cycle de production n° 1 – Champs 2	77
Cycle de production n° 2 – Champs 1	83
Prélèvement en eau et rendement.....	89
Le bilan hydrique comme outil d'aide à la décision.....	91
Volet 2. Impact d'un climat en évolution sur le synchronisme fleur-gel et le bilan hydrique.....	94
Amélioration des estimations de l'ET _p et intégration dans le calcul du bilan hydrique	94
Modèle bioclimatique pour le développement phénologique du bleuets nain	96
Modèle bioclimatique pour la prédiction du rendement potentiel du bleuets nain	98
Indices associés à la couverture de neige pour la culture du bleuets nain au Saguenay Lac-St-Jean en climat actuel (1981-2010) et futur (2041-2070).	101
Indices associés à la phénologie de la culture du bleuets nain au Saguenay Lac-St-Jean en climat actuel (1981-2010) et futur (2041-2070).	105
Indices associés aux risques de gel pour la culture du bleuets nain au Saguenay Lac-St-Jean en climat actuel (1981-2010) et futur (2041-2070).	109
Indices hydriques associés à l'année de production (période de la nouaison à la récolte) de la culture du bleuets nain au Saguenay Lac-St-Jean en climat actuel (1981-2010) et futur (2041-2070).	113
Indices hydriques associés à l'année de végétation (période de l'émergence des ramets au 31 octobre) de la culture du bleuets nain au Saguenay Lac-St-Jean en climat actuel (1981-2010) et futur (2041-2070).....	126
Volet 3. Analyser la rentabilité de l'irrigation en climat actuel et futur	139
Coûts de possession et d'opération.....	139
Seuil de rentabilité	140
Assurance-récolte	141

6. Analyse et discussion	146
Volet 1. Développer des connaissances et des outils pour raisonner l'irrigation en fonction du stress hydrique et du risque de gel des fleurs	146
Impact de l'irrigation sur les facteurs à l'étude	146
Y a-t-il eu des conditions propices au stress hydrique durant le projet ?	149
Autonomie d'un champ selon la RFU du sol	150
Est-ce que le prélèvement en eau pourrait être plus élevé?.....	150
Outils de gestion de l'irrigation.....	150
Volet 2. Impact d'un climat en évolution sur le synchronisme fleur-gel et le bilan hydrique.....	151
Modèles bioclimatiques pour prédire le développement phénologique du bleuet nain.....	151
Impact d'un climat en évolution sur le synchronisme fleur-gel	151
Impact d'un climat en évolution sur le bilan hydrique	152
Modèle bioclimatique pour estimer le rendement en fruits.....	152
Volet 3. Analyser la rentabilité de l'irrigation en climat actuel et futur	153
7. Conclusion et recommandations	154
8. Références	158
9. Annexes.....	162

Liste des tableaux

Tableau 1. Cycle de production (Végétation-Production) selon le site, le champ et la saison.....	23
Tableau 2. Description des consignes de déclenchement A, B et C, soit la valeur en kPa, la durée d'un apport (min.) et la hauteur d'eau appliquée (mm) par épisode selon le site et le no du champ.....	25
Tableau 3. Description des 16 traitements à l'étude.....	26
Tableau 4. Portée (m ²), débit (l/h) et hauteur d'eau appliquée (mm/h) du gicleur selon la pression d'opération (psi).....	32
Tableau 5. Date de la récolte des fruits selon l'année et le site.....	36
Tableau 6. Chronologie des principales étapes de réalisation de 2015 à 2016, selon le site.....	38
Tableau 7. Variables du modèle bioclimatique de rendement annuel potentiel de bleuets nains de l'année précédente (i-1) jusqu'à la récolte de l'année en cours (i).....	45
Tableau 8. Pluviométrie et ET _p (mm) mesurées selon l'année et la période – Saint-David-de-Falardeau.....	49
Tableau 9. Pluviométrie et ET _p (mm) mesurées selon l'année et la période – Ascension-de-Notre-Seigneur.....	49
Tableau 10. Nombre d'épisodes d'irrigation (contre le stress hydrique et contre le gel des fleurs) selon le traitement, le champ et l'année – Saint-David-de-Falardeau.....	51
Tableau 11. Nombre d'épisodes d'irrigation (contre le stress hydrique et contre le gel des fleurs) selon le traitement, le champ et l'année – Ascension-de-Notre-Seigneur.....	52
Tableau 12. Date des irrigations pour chacun des traitements selon l'année, le champ et le cycle (végétation et production) à ce moment - Saint-David-de-Falardeau.....	53
Tableau 13. Date des irrigations pour chacun des traitements selon l'année, le champ et le cycle (végétation et production) à ce moment - Ascension-de-Notre-Seigneur.....	54
Tableau 14. Température minimale de l'air (°C) mesurée au niveau du couvert végétal dans les zones du champ non protégées lors des épisodes d'irrigation pour protéger les fleurs du gel et température de l'air ambiant mesuré par la station météorologique au même moment selon l'année, la date et le site.....	56
Tableau 15. Valeurs moyennes du coefficient cultural (K _c) mesurées selon l'année et la période de celle-ci et le stade (Végétation ou Production) – Saint-David-de-Falardeau.....	62
Tableau 16. Valeurs moyennes du coefficient cultural (K _c) mesurées selon l'année et la période de celle-ci et le stade (végétation ou production) – Ascension-de-Notre-Seigneur.....	62
Tableau 17. Nombre de jours pour un traitement avec une consigne donnée (A, B et C) où le statut hydrique du sol était à une teneur en eau plus élevée que le témoin non irrigué (T) selon le champ et l'année - Saint-David-de-Falardeau.....	68
Tableau 18. Nombre de jours pour un traitement avec une consigne donnée (A, B et C) où le statut hydrique du sol était « plus humide » que le témoin non irrigué (T) selon le champ et l'année - Ascension-de-Notre-Seigneur.....	68
Tableau 19. Nombre moyen de bourgeons floraux et teneur en N des feuilles (Saison végétation 2015) et poids total en fruits, poids moyen/fruit, taux de matières sèches et degré Brix des fruits (Saison production 2016) selon le traitement - Champ 1 - Saint-David-de-Falardeau.....	71
Tableau 20. Nombre moyen de bourgeons floraux et teneur en N des feuilles (Saison végétation 2015) et poids total en fruits, poids moyen/fruit, taux de matières sèches et degré Brix des fruits (Saison production 2016) selon le traitement - Champ 1 - Ascension-de-Notre-Seigneur.....	72

Tableau 21. Poids moyen en fruits récoltés (g/2 m ²) pour un groupe de consignes donné, selon le champ et le site.....	73
Tableau 22. Contrastes effectués sur la moyenne du poids en fruits récoltés pour un groupe de consignes donné, selon le champ et le site.	74
Tableau 23. Nombre de bourgeons floraux moyen pour un groupe de consignes donné et contrastes effectués entre ces deux groupes, selon le site – Champ 1 – Saison de végétation 2015.	75
Tableau 24. Moyenne du poids total en fruits récoltés pour un groupe de consignes donné, selon le site - Champ 1 - Saison production 2016.	76
Tableau 25. Contrastes effectués sur la moyenne du poids total en fruits pour un groupe de consignes donné, selon le site - Champ 1 - Saison production 2016.	76
Tableau 26. Nombre moyen de bourgeons floraux et teneur en N des feuilles (Saison végétation 2016) et poids total en fruits, poids moyen/fruit, taux de matières sèches et degré Brix des fruits (Saison production 2017) selon le traitement - Champ 2 - Saint-David-de-Falardeau.	78
Tableau 27. Nombre moyen de bourgeons floraux et teneur en N des feuilles (Saison végétation 2016) et poids total en fruits, poids moyen/fruit, taux de matières sèches et degré Brix des fruits (Saison production 2017) selon le traitement - Champ 2 - Ascension-de-Notre-Seigneur.....	79
Tableau 28. Nombre moyen de bourgeons floraux pour un groupe de consignes donné, selon le site - Champ 2 - Saison végétation 2016.	80
Tableau 29. Contrastes effectués sur la moyenne du nombre de bourgeons floraux pour un groupe de consignes donné, selon le site - Champ 2 - Saison végétation 2016.	80
Tableau 30. Moyenne du poids total en fruits pour un groupe de consignes donné, selon le site - Champ 2 - Saison production 2017.	81
Tableau 31. Contrastes effectués sur la moyenne du poids total en fruits pour un groupe de consignes donné, selon le site - Champ 2 - Saison de production 2017.	82
Tableau 32. Nombre moyen de bourgeons floraux et teneur en N des feuilles (Saison végétation 2017) et teneur en N des feuilles, poids total en fruits, poids moyen/fruit, taux de matières sèches et degré Brix des fruits (Saison production 2018) selon le traitement - Champ 1 - Saint-David-de-Falardeau.....	84
Tableau 33. Nombre moyen de bourgeons floraux et teneur en N des feuilles (Saison végétation 2017) et teneur en N des feuilles, poids total en fruits, poids moyen/fruit, taux de matières sèches et degré Brix des fruits (Saison production 2018) selon le traitement - Champ 1 - Ascension-de-Notre-Seigneur.	85
Tableau 34. Nombre moyen de bourgeons floraux pour un groupe de consignes donné, selon le site - Champ 1 - Saison végétation 2017.	86
Tableau 35. Contrastes effectués sur la moyenne du nombre de bourgeons floraux pour un groupe de consignes donné, selon le site - Champ 1 - Saison végétation 2017.	86
Tableau 36. Moyenne du poids total en fruits pour un groupe de consignes donné, selon le site - Champ 1 - Saison production 2018.	87
Tableau 37. Contrastes effectués sur la moyenne du poids total en fruits pour un groupe de consignes donné, selon le site - Champ 1 - Saison de production 2018.	88
Tableau 38. Précipitations totales, mesurées du 5 juin au 16 septembre 2017 à L’Ascension-de-Notre-Seigneur et précipitations ayant un potentiel d’être valorisées.	92
Tableau 39. Bilan hydrique réalisé avec un sol dont la RFU est de 20 mm avec les K _c et l’ET _p estimés et les précipitations mesurées et valorisables du 5 au 30 juin 2017 - Champ 1 en Végétation - Ascension-de-Notre-Seigneur.	93
Tableau 40. Statistiques comparatives des différents modèles pour les mois principaux de production des cultures végétales (mai à septembre) par rapport à l’équation Penman-Monteith (PM-ASCE).	94

Tableau 41. Degrés-jours pour l'atteinte des différents seuils.....	96
Tableau 42. Statistiques comparatives pour les modèles de prédictions des stages phénologiques du bleuet nain.	97
Tableau 43. Indices associés à la couverture de neige pour la culture du bleuet nain au Saguenay-Lac-Saint-Jean en climat actuel (1981-2010) et futur (2041-2070).....	101
Tableau 44. Indices associés à la phénologie de la culture du bleuet nain au Saguenay Lac-St-Jean en climat actuel (1981-2010) et futur (2041-2070).	105
Tableau 45. Indices associés aux risques de gel pour la culture du bleuet nain au Saguenay Lac-St-Jean en climat actuel (1981-2010) et futur (2041-2070).	109
Tableau 46. Indices hydriques associés à l'année de production (période de la nouaison à la récolte) de la culture du bleuet nain au Saguenay Lac-St-Jean en climat actuel (1981-2010) et futur (2041-2070).	113
Tableau 47. Indices hydriques associés à l'année de végétation (période de l'émergence des ramets au 31 octobre) de la culture du bleuet nain au Saguenay Lac-St-Jean en climat actuel (1981-2010) et futur (2041-2070).....	126
Tableau 48. Coûts de possession et d'opération d'un système d'irrigation dans la production de bleuets nains cultivés.	139
Tableau 49. Seuil de rentabilité en termes de gain de rendement à obtenir annuellement pour rentabiliser l'irrigation sur une bleuetière de 10 ha.	140
Tableau 50. Seuil de rentabilité en termes de gain de rendement à obtenir annuellement pour rentabiliser l'irrigation sur une bleuetière de 20 ha.	140
Tableau 51. Seuil de rentabilité en termes de gain de rendement à obtenir pour rentabiliser l'irrigation sur une bleuetière de 40 ha.	141
Tableau 52. Bilan hydrique réalisé avec un sol dont la RFU est de 20 mm avec les K_c et ET_p estimés et les précipitations mesurées du 5 juin au 16 septembre 2017 au champ 1 en végétation au site de l'Ascension-de-Notre-Seigneur.	181
Tableau 53. Bilan hydrique réalisé avec un sol dont la RFU est de 40 mm avec les K_c et ET_p estimées et les précipitations mesurées du 5 juin au 16 septembre 2017 au champ 1 en végétation au site de l'Ascension-de-Notre-Seigneur.	185
Tableau 54. Seuils de rentabilité relatifs en fonction du coût d'acquisition du système d'irrigation, de la superficie de la bleuetière, du prix du bleuet et du rendement de base moyen	189

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Schéma du dispositif expérimental utilisé pour les deux cycles de production (2015-2016 et 2017-2018) - Champ 1 - Saint-David-de-Falardeau.	28
Figure 2. Schéma du dispositif expérimental utilisé pour les deux cycles de production (2015-2016 et 2017-2018) - Champ 1 – Ascension-de-Notre-Seigneur.	29
Figure 3. Schéma du dispositif expérimental utilisé pour les deux cycles de production (2016-2017) - Champ 2 - Saint-David-de-Falardeau.	30
Figure 4. Schéma du dispositif expérimental utilisé pour les deux cycles de production (2016-2017) - Champ 2 – Ascension-de-Notre-Seigneur.	31
Figure 5. Schéma de la distribution de l’uniformité d’application en eau du gicleur à 12 psi (hauteur d’eau en mm/20 minutes).	33
Figure 6. Portrait de l’hiver 2015-2016 au Saguenay-Lac-Saint-Jean.	43
Figure 7. Portrait de l’hiver 2012-2013 au Saguenay-Lac-Saint-Jean.	43
Figure 8. Température de l’air au niveau du couvert végétal et celle de l’air ambiant au même moment – Champ 2 - Ascension-de-Notre-Seigneur, 10 juin 2017.	55
Figure 9. Effet de l’irrigation sur la température de l’air au niveau du couvert végétal – Champ 2 - Ascension-de-Notre-Seigneur, 10 juin 2017.	56
Figure 10. Variation de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ de sol}$) durant 24 heures le 22 juin 2018 – Champ 1 – Production, Saint-David-de-Falardeau.	57
Figure 11. La plus longue période sans précipitations en 2018 (19 juin au 1 ^{er} juillet) et variations de la teneur en eau du sol, mesurées avec une sonde TDR, pour un témoin non irrigué - Champ 1 – Saison de production n° 2 (2018) – Saint-David-de-Falardeau.	58
Figure 12. Évapotranspiration potentielle et prélèvement en eau quotidiennement de la culture estimée avec une TDR du 19 juin au 1 juillet - Champ 1 – Saison de production n° 2 (2018) – Saint-David-de-Falardeau.	59
Figure 13. La plus longue période sans précipitations en 2018 (19 juin au 1 ^{er} juillet) et variations de la teneur en eau du sol, mesurées avec une sonde TDR, pour un témoin non irrigué - Champ 1 – Saison de production n° 2 (2018) – Ascension-de-Notre-Seigneur.	60
Figure 14. Évapotranspiration potentielle et prélèvement en eau quotidiennement de la culture estimée avec une TDR du 19 juin au 1 juillet - Champ 1 – Saison de production n° 2 (2018) – Ascension-de-Notre-Seigneur.	61
Figure 15. Relation entre le K_c moyen obtenu en saison de végétation et le K_c moyen obtenu en saison de production, pour un champ donné.	63
Figure 16. Évapotranspiration de la culture (ET_{c-TDR}) quotidienne (mm) - Champ 1 - Saison de végétation n° 1 (2015) - Saint-David-de-Falardeau.	65
Figure 17. Évapotranspiration de la culture (ET_{c-TDR}) quotidienne (mm) - Champ 1 - Saison de végétation n° 1 (2015) - Ascension-de-Notre-Seigneur.	66
Figure 18. Évapotranspiration de la culture (ET_{c-TDR}) quotidienne (mm) - Champ 2 - Saison de végétation n° 1 (2016) - Saint-David-de-Falardeau.	66
Figure 19. Évapotranspiration de la culture (ET_{c-TDR}) quotidienne (mm) - Champ 2 - Saison de végétation n° 1 (2016) - Ascension-de-Notre-Seigneur.	67
Figure 20. Évapotranspiration de la culture (ET_{c-TDR}) quotidienne (mm) - Champ 1 - Saison de végétation n° 2 (2017) - Saint-David-de-Falardeau.	67

Figure 21. Évapotranspiration de la culture (ET_{c-TDR}) quotidienne (mm) - Champ 1 - Saison de végétation n° 2 (2017) - Ascension-de-Notre-Seigneur, végétation.....	67
Figure 22. Relation entre le K_c moyen obtenu en saison de végétation et le poids en fruits récolté pour un champ donné.....	90
Figure 23. Relation entre le K_c moyen obtenu en saison de production et le poids en fruits récolté pour un champ donné.....	90
Figure 24. Performance de quatre modèles à estimer l' ET_p (L'Acadie, juin 2016) : Penman-Monteith (PM-ASCE), Baier-Robertson, Rochette et Baier-Robertson modifié (Hénault).....	95
Figure 25. Performance de quatre modèles à estimer l' ET_p (L'Acadie, juillet 2016) : Penman-Monteith (PM-ASCE), Baier-Robertson, Rochette et Baier-Robertson modifié (Hénault).....	95
Figure 26. Rendements observés et rendements prédits de bleuets nains au Saguenay-Lac-Saint-Jean de 1988 à 2018 par les modèles du début de floraison et de la nouaison.....	99
Figure 27. Rendements observés et rendements prédits de bleuets nains au Saguenay-Lac-Saint-Jean de 1988 à 2018 par le modèle final.....	100
Figure 28. Dates moyennes d'atteinte du dernier 10 cm de neige au printemps sur la période 1981-2010.....	102
Figure 29. Dates moyennes d'atteinte du dernier 10 cm de neige au printemps : Scénario de changement inférieur (2041-2070).....	103
Figure 30. Dates moyennes d'atteinte du dernier 10 cm de neige au printemps : Scénario de changement supérieur (2041-20170).....	104
Figure 31. Dates moyennes de la pleine floraison chez le bleuet nain basées sur la période 1981-2010.....	106
Figure 32. Dates moyennes de la pleine floraison chez le bleuet nain : Scénario de changement inférieur (2041-2070).....	107
Figure 33. Dates moyennes de la pleine floraison chez le bleuet nain : Scénario de changement supérieur (2041-2070).....	108
Figure 34. Dates moyennes du dernier gel printanier basées sur la période 1981-2010.....	110
Figure 35. Dates moyennes du dernier gel printanier : Scénario changement inférieur (2041-2070).....	111
Figure 36. Dates moyennes du dernier gel printanier : Scénario changement supérieur (2041-2070).....	112
Figure 37. Total des précipitations de la nouaison à la récolte chez le bleuet nain, basé sur la période 1981-2010.....	114
Figure 38. Total des précipitations de la nouaison à la récolte chez le bleuet nain : Scénario de changement inférieur (2041-2070).....	115
Figure 39. Total des précipitations de la nouaison à la récolte chez le bleuet nain : Scénario de changement supérieur (2041-2070).....	116
Figure 40. Évapotranspiration quotidienne moyenne chez le bleuet nain, de la nouaison à la récolte, basé sur la période 1981-2010.....	117
Figure 41. Évapotranspiration quotidienne moyenne chez le bleuet nain, de la nouaison à la récolte : Scénario de changement inférieur (2041-2070).....	118
Figure 42. Évapotranspiration quotidienne moyenne chez le bleuet nain, de la nouaison à la récolte : Scénario de changement supérieur (2041-2070).....	119
Figure 43. Bilan hydrique quotidien moyen chez le bleuet nain (RFU = 20 mm, k_c = 0,45), de la nouaison à la récolte, basé sur la période 1981-2010.....	120
Figure 44. Bilan hydrique quotidien moyen chez le bleuet nain (RFU = 20 mm, K_c = 0,45), de la nouaison à la récolte : Scénario de changement inférieur (2041-2070).....	121

Figure 45. Bilan hydrique quotidien moyen chez le bleuet nain (RFU = 20 mm, Kc = 0,45), de la nouaison à la récolte : Scénario de changement supérieur (2041-2070).....	122
Figure 46. Nombre de jours où le bilan hydrique est 0 chez le bleuet nain (RFU = 20 mm, Kc = 0,45), de la nouaison à la récolte, basé sur la période 1981-2010.	123
Figure 47. Nombre de jours où le bilan hydrique est 0 chez le bleuet nain (RFU = 20 mm, Kc = 0,45), de la nouaison à la récolte : Scénario de changement inférieur (2041-2070).....	124
Figure 48. Nombre de jours où le bilan hydrique est 0 chez le bleuet nain (RFU = 20 mm, Kc = 0,45), de la nouaison à la récolte : Scénario de changement supérieur (2041-2070).	125
Figure 49. Total des précipitations de l'émergence des ramets au 31 octobre chez le bleuet nain, basé sur la période 1981-2010.	127
Figure 50. Total des précipitations de l'émergence des ramets au 31 octobre chez le bleuet nain : Scénario de changement inférieur (2041-2070).....	128
Figure 51. Total des précipitations de l'émergence des ramets au 31 octobre chez le bleuet nain : Scénario de changement Supérieur (2041-2070).	129
Figure 52. Évapotranspiration quotidienne moyenne chez le bleuet nain, de l'émergence des ramets au 31 octobre, basée sur la période 1981-2010.	130
Figure 53. Évapotranspiration quotidienne chez le bleuet nain, de l'émergence des ramets au 31 octobre : Scénario de changement inférieur (2041-2070).	131
Figure 54. Évapotranspiration quotidienne chez le bleuet nain, de l'émergence des ramets au 31 octobre : Scénario de changement supérieur (2041-2070).....	132
Figure 55. Bilan hydrique quotidien moyen chez le bleuet nain (RFU = 20 mm, Kc = 0,45), de l'émergence des ramets au 31 octobre, basé sur la période 1981-2010.	133
Figure 56. Bilan hydrique quotidien moyen chez le bleuet nain (RFU = 20 mm, Kc = 0,45), de l'émergence des ramets au 31 octobre : Scénario de changement inférieur (2041-2070).....	134
Figure 57. Bilan hydrique quotidien moyen chez le bleuet nain (RFU = 20 mm, Kc = 0,45), de l'émergence des ramets au 31 octobre : Scénario de changement supérieur (2041-2070).	135
Figure 58. Nombre de jours où le bilan hydrique est 0 chez le bleuet nain (RFU = 20 mm, Kc = 0,45), de l'émergence des ramets au 31 octobre, basé sur la période 1981-2010.	136
Figure 59. Nombre de jours où le bilan hydrique est 0 chez le bleuet nain (RFU = 20 mm, Kc = 0,45), de l'émergence des ramets au 31 octobre : Scénario de changement inférieur (2041-2070).....	137
Figure 60. Nombre de jours où le bilan hydrique est 0 chez le bleuet nain (RFU = 20 mm, Kc = 0,45), de l'émergence des ramets au 31 octobre : Scénario de changement supérieur (2041-2070).	138
Figure 61. Indemnités versées (totales et \$/ha) au programme d'assurance-récolte individuelle du bleuet, Québec 2007-2018.	143
Figure 62. Niveau de cotisation (% de la valeur assurée et \$/ha) des clients à l'assurance-récolte individuelle du bleuet, Québec 2007-2018.....	144
Figure 63. Indemnités versées nettes [indemnités - cotisations (\$/ha)] et valeurs assurées à l'assurance-récolte de la production de bleuets.	145
Figure 64 : Dispositif expérimental (Champ 1), le 25 mai 2017 - Ascension-de-Notre-Seigneur.	163
Figure 65 : Gicleur Xcel-Wobbler® avec un régulateur de pression (12 psi) et une valve – Saint-David-de-Falardeau.	163
Figure 66 : Cylindre de PVC utilisé pour l'échantillonnage 0-15 cm (courbe de désorption en eau du sol).....	164
Figure 67 : Installation en laboratoire pour déterminer les courbes de désorption en eau du sol – Complexe scientifique de Québec.	165
Figure 68 : Station météorologique - Saint-David-de-Falardeau.	166

Figure 69 : Sondes de température installées à la hauteur et au-dessus des fleurs.	167
Figure 70. TX4 Web (Hortau) utilisé avec des sondes de température et des tensiomètres.	168
Figure 71 : Sonde TDR Campbell Scientific, CS625.	169
Figure 72 : Panier de type « patte d’ours » utilisé pour la récolte des fruits dans les parcelles.	169
Figure 73 : Évapotranspiration potentielle quotidienne et cumulative sur le site à l’Ascension-de-Notre-Seigneur du 5 juin au 18 septembre 2015.	170
Figure 74 : Précipitations quotidiennes et cumulatives sur le site à l’Ascension-de-Notre-Seigneur du 5 juin au 18 septembre 2016.	171
Figure 75 : Évapotranspiration potentielle quotidienne et cumulative sur le site à l’Ascension-de-Notre-Seigneur du 5 juin au 18 septembre 2016.	171
Figure 76 : Précipitations quotidiennes et cumulatives sur le site à l’Ascension-de-Notre-Seigneur du 5 juin au 18 septembre 2017.	172
Figure 77 : Évapotranspiration potentielle quotidienne et cumulative sur le site à l’Ascension-de-Notre-Seigneur du 5 juin au 18 septembre 2017.	172
Figure 78 : Précipitations quotidiennes et cumulatives sur le site à l’Ascension-de-Notre-Seigneur du 5 juin au 8 août 2018.	173
Figure 79 : Évapotranspiration potentielle quotidienne et cumulative sur le site à l’Ascension-de-Notre-Seigneur du 5 juin au 8 août 2018.	173
Figure 80 : Précipitations quotidiennes et cumulatives sur le site à Saint-David-de-Falardeau du 5 juin au 18 septembre 2015.	174
Figure 81 : Évapotranspiration potentielle quotidienne et cumulative sur le site à Saint-David-de-Falardeau du 5 juin au 18 septembre 2015.	174
Figure 82 : Précipitations quotidiennes et cumulatives sur le site à Saint-Davide-de-Falardeau du 5 juin au 18 septembre 2016.	175
Figure 83 : Évapotranspiration potentielle quotidienne et cumulative sur le site à Saint-David-de-Falardeau du 5 juin au 18 septembre 2016.	175
Figure 84 : Précipitations quotidiennes et cumulatives sur le site à Saint-Davide-de-Falardeau du 5 juin au 18 septembre 2017.	176
Figure 85 : Évapotranspiration potentielle quotidienne et cumulative sur le site à Saint-David-de-Falardeau du 5 juin au 18 septembre 2017.	176
Figure 86 : Précipitations quotidiennes et cumulatives sur le site à Saint-David-de-Falardeau du 5 juin au 21 août 2018.	177
Figure 87 : Évapotranspiration potentielle quotidienne et cumulative sur le site à Saint-David-de-Falardeau du 5 juin au 21 août 2018.	177
Figure 88. Précipitations cumulatives (mm) du 5 juin au 18 septembre au site de l’Ascension, 2015 à 2018.	178
Figure 89. Précipitations cumulatives (mm) du 5 juin au 18 septembre au site de Falardeau, 2015 à 2018.	179
Figure 90. Évapotranspiration potentielle (mm) du 5 juin au 18 septembre au site de l’Ascension, 2015 à 2018.	179
Figure 91. Évapotranspiration potentielle (mm) du 5 juin au 18 septembre au site de Falardeau, 2015 à 2018.	180

1. Introduction et contexte

La production commerciale de bleuets au Canada est un secteur économique très important qui est orienté vers l'exportation. En ce qui a trait aux bleuets nains, le Québec est le principal producteur au Canada avec 35 % de la production (MAPAQ, 2015). Le Saguenay-Lac-Saint-Jean est la région où sont concentrés 85 % des 30 000 ha aménagés dans la province. Viennent ensuite la Côte-Nord avec 12 % des superficies et l'Abitibi-Témiscamingue avec 3 %. Ces régions, de même que la Haute-Mauricie et la Gaspésie, possèdent un bon potentiel de développement futur.

Ce secteur subit d'importantes fluctuations de production qui sont entre autres causées par le gel des fleurs et possiblement par le stress hydrique. Par exemple, à la suite d'un important épisode de gel en 2010, seulement 6300 t ont été produites au Québec pour une valeur à la ferme, soit le prix reçu par le producteur, de 11,6 M\$. En 2016, la production annuelle a atteint un sommet avec 54 475 t récoltées (Statistique Canada, 2017). Cette variabilité de la production et de l'offre potentielle à l'exportation rend la situation difficile pour les entreprises et la mise en marché. Irriguer pour protéger les fleurs du gel ou pour éviter un stress hydrique à la culture pourraient s'avérer des solutions intéressantes pour stabiliser les rendements, voire les augmenter.

Les changements climatiques pourraient influencer le développement, la croissance et le rendement des végétaux. Une augmentation des températures automnales pourrait retarder l'endurcissement et offrir une moins grande protection contre le gel. Cependant, la formation des bourgeons pourrait être favorisée par ce réchauffement. Des températures plus élevées au printemps pourraient devancer le débourrement des végétaux et les rendre plus vulnérables à des gels printaniers tardifs (Rohde, 2009). Une plus faible couverture de neige augmenterait les risques d'exposition des plants à des froids extrêmes (Rochette et coll., 2004).

Actuellement, l'irrigation du bleuet nain demeure une pratique marginale, mais qui tend à prendre de l'essor. Le potentiel des superficies à couvrir est considérable tout comme les volumes d'eau en jeu. Une gestion raisonnée de l'irrigation est alors indispensable pour atteindre les objectifs de productivité et pour limiter les impacts négatifs pour l'environnement. Pour y parvenir, plusieurs facteurs, tous interreliés, doivent être connus et considérés. Parmi ceux-ci, il y a le sol, la culture, les ressources disponibles, les objectifs poursuivis par l'irrigation et les outils d'aide à la décision.

2. Objectifs

Développer une approche de régie raisonnée de l'eau pour la production de bleuets nains cultivés et vérifier la robustesse de celle-ci dans un contexte de climat variable et en évolution.

Sous-objectifs :

- Développer des connaissances et outils pour raisonner l'irrigation en fonction du stress hydrique et du risque de gel des fleurs;
- Évaluer l'impact d'un climat en évolution sur le synchronisme Fleur-Gel et le bilan hydrique;
- Analyser la rentabilité actuelle et future de systèmes d'irrigation.

3. Cadre théorique / compte-rendu de la revue de la littérature

Le Québec est le principal producteur de bleuets nains au Canada avec 35 % de la production (MAPAQ, 2015). Le Saguenay-Lac-Saint-Jean est la région où sont concentrés 85 % des superficies présentes dans la province. Viennent ensuite la Côte-Nord avec 12 % des superficies et l'Abitibi-Témiscamingue avec 3 %. Ces régions, de même que la Haute-Mauricie et la Gaspésie, possèdent un bon potentiel de développement futur. Plus de 95 % de la production est transformée et commercialisée, en partie sur le marché canadien (15 %), mais surtout pour l'exportation (85 %). En 2012, la valeur des exportations en provenance des usines du Québec s'élevait à près de 90 M\$ (Lavoie, 2014a).

Ce secteur subit d'importantes fluctuations de production en raison des dommages causés par le gel des fleurs et possiblement le stress hydrique. Des températures froides et gélives survenant durant la floraison peuvent être responsables de baisses de rendement et un été chaud et sec peut être responsable de baisses de 50 % (AAC, 2012). En 2013-14, avec une production de 14,5 M kg, les exportations étaient à la baisse, tandis qu'en 2014, avec 35,6 M kg, il faudra battre le niveau record des exportations de 2011-12 (24,9 M kg) afin d'éviter un refoulement sur les marchés et un accroissement des inventaires (Forest Lavoie, 2014a). Cette variabilité de la production et de l'offre à l'exportation rend la situation difficile pour ce secteur. D'ailleurs, la régularisation des approvisionnements aux acheteurs est ressortie comme un défi à surmonter dans la planification stratégique 2014-18 (Forest Lavoie, 2014b). Irriguer contre le gel ou pour éviter un stress hydrique s'avèrent des solutions potentielles pour stabiliser les rendements.

Avec l'ampleur des investissements requis, les volumes d'eau en jeu et le manque de connaissance sur la pratique, l'irrigation du bleuets nain demeure marginale (1,8 % des superficies) (MAPAQ, 2015). De plus, de tels apports en eau pourraient occasionner une pression à la hausse sur le risque de lessivage de l'azote (Boivin et Landry, 2011). C'est pourquoi la régie d'irrigation se doit d'être raisonnée. Un bulletin technique produit dans l'état du Maine, aux États-Unis, identifie le seuil de la rentabilité de l'irrigation à 2050 kg/ha (Dalton et coll., 2002), mais ce dernier a été publié en 2002. Au Québec, la rentabilité de l'irrigation pour le bleuets nain cultivé reste à démontrer, tout comme les conditions dans lesquelles elle pourrait s'exprimer.

SYSTÈME CULTURAL

Le cycle de production du bleuets nain cultivé est généralement réparti sur deux ans. La 1^{re} année étant celle de la croissance végétative et où les bourgeons floraux se forment. L'année suivante est celle de la production des fruits et où ces derniers seront récoltés. À la suite de la récolte, le couvert végétal est fauché et le cycle recommence. Le contrôle des mauvaises herbes, la fertilisation et l'introduction de pollinisateurs ont permis d'augmenter la productivité des bleuetières (Ismail et coll., 1981; Hepler et Ismail, 1985; Yarborough et Bhowmik, 1988). Ces facteurs sont encore des enjeux d'actualité, tout comme la gestion phytosanitaire (AAC, 2012).

IRRIGATION

Des travaux réalisés dans l'état du Maine aux États-Unis ont démontré que les rendements en fruits ont été 43 % plus élevés avec l'irrigation, comparativement à des conditions où les apports en eau se limitaient aux précipitations (Seymour et coll., 2004). De plus, le pic de récolte, en situation irriguée, arrivait plus tardivement. La régie d'irrigation était basée sur les conclusions d'une étude où les besoins hebdomadaires en eau du bleuets nain ont été évalués à 25,4 mm (Trevett, 1967 cité dans Seymour et coll., 2004). Ainsi, en année de croissance végétative, l'irrigation venait combler à 25,4 mm, au besoin, la hauteur d'eau provenant des précipitations. En année de production, la décision d'irriguer était prise le lundi et le vendredi à raison de 13 mm d'eau par épisode afin que la culture ait reçu 25,4 mm d'eau durant la période de 7 jours.

Le rendement en fruits obtenu entre des plants de bleuets ayant eu des apports en eau provenant des précipitations et des plants en ayant été privée à l'aide d'abris mobiles a été comparé lors d'un projet réalisé en 2000 en Nouvelle-Écosse (Percival et coll., 2003). Les plants qui ont été privés de précipitations ont produit jusqu'à 22 % moins de rendement. Des essais ont été réalisés en 1998-99 en Nouvelle-Écosse, où des parcelles de bleuets étaient irriguées à raison de 20 mm tous les lundis, sans égard aux précipitations (Glass et coll., 2005). Ces parcelles ont été comparées à d'autres où un abri mobile était installé au-dessus des plants afin de les protéger des précipitations. Les conclusions rapportent que le poids par fruit était comparable d'un traitement à l'autre, mais le nombre de fruits était plus élevé en conditions irriguées. Toujours en Nouvelle-Écosse, Farooque et coll. (2012) rapportent des observations complémentaires à celles déjà mentionnées. Les apports d'eau par irrigation, de manière à recharger la réserve utile en eau, comparativement à une régie de production sans irrigation, permettent une augmentation des rendements en fruits mûrs de 21 %. D'autres paramètres peuvent être améliorés à la suite de la pratique de l'irrigation, dont une hausse de la capacité d'échange cationique (CEC) du sol et de la quantité de magnésium (Mg) dans les tissus foliaires de la culture. De plus, les interactions des apports de fertilisants et de la pratique de l'irrigation permettent d'augmenter dans les tissus foliaires la quantité de plusieurs nutriments, tels l'azote (N), le calcium (Ca), le manganèse (Mn), le zinc (Zn) et le cuivre (Cu). Ces résultats sont directement liés à l'augmentation des prélèvements en eau de la culture occasionnés par la pratique de l'irrigation (Farooque et coll., 2012).

Des essais réalisés sur la Côte-Nord au Québec concluent que, lors de saisons sèches, l'irrigation contre le stress hydrique augmente les rendements de 400 kg/ha, alors que l'augmentation de rendement est plutôt attribuable à l'irrigation contre le gel lors de saison froide et humide (280 kg/ha) (Desjardins, 2012). La consigne pour déclencher les irrigations était fixée à 20-30 kPa (Brinen et coll., 1986 cité dans Desjardins, 2012).

Au Saguenay-Lac-Saint-Jean en 1993, durant une période allant du 20 juin jusqu'au 16 août, trois conditions de teneur en eau du sol dans une bleuetière en année de production ont été comparées (Bergeron, 1995). Ces conditions étaient : 1) Précipitations; 2) Déclenchement à 30-40 kPa (abri contre l'irrigation de l'autre traitement); et 3) Déclenchement à 60-70 kPa (avec

abri). Au terme de ces deux mois d'essais, aucune différence entre les traitements n'a été observée au moment de la récolte.

BILAN HYDRIQUE

Plusieurs formules ont vu le jour afin d'estimer l'évaporation et la transpiration, mais la formule la plus utilisée pour calculer l'évapotranspiration potentielle (ET_p) est la formule standardisée de Penman-Monteith (ASCE, 1990) lorsque les données météo requises (température, humidité relative, précipitation, radiation solaire et vitesse du vent) sont disponibles idéalement toutes les heures. L' ET_p est définie comme la valeur d'évapotranspiration maximale d'une culture de gazon hypothétique, lorsque l'eau n'est pas un facteur limitant pour satisfaire la demande en évaporation de l'atmosphère (Allen et coll., 1998). Pour adapter les valeurs d' ET_p à la culture du bleuet nain, il est nécessaire d'utiliser des coefficients culturaux (K_c) appropriés. Le coefficient cultural est un rapport adimensionnel de l'évapotranspiration réelle d'une culture donnée et de l' ET_p .

Il y a peu d'études sur la détermination des K_c pour la culture du bleuet nain. Il y en a une où des moyennes combinées de K_c ont été déterminées pour des sites irrigués, entre 0,61 et 0,74 de mai à septembre (moyenne cumulative de 0,69) (Hunt et coll., 2008). Cependant, ces sites étant situés près de la côte maritime, le brouillard et la rosée ont influencé ces mesures. Il n'y a pas eu de différence sur le K_c selon l'année du cycle de production.

Dans un contexte de changements climatiques, la projection de l'évapotranspiration potentielle (ET_p) avec l'équation de Penman-Montheith devient impossible, car certains paramètres qui la composent ne peuvent être simulés (ex. rayonnement solaire). Toutefois, l'utilisation d'équations se basant sur la température, telle que celle de Baier et Robertson peut être envisagée dans une perspective d'utilisation des sorties de modèles climatiques (Baier et Robertson, 1965). De plus, cette équation a été validée et utilisée pour l'Atlas agroclimatique du Québec (<http://www.agrometeo.org/atlas>).

PHÉNOLOGIE, RENDEMENT ET GEL DES FLEURS DU BLEUET NAIN

Dans le but d'effectuer des études historiques des risques associés aux températures gélives de l'hiver et du printemps, les modèles bioclimatiques permettant la prédiction de l'évolution phénologique d'une culture à partir des mesures de températures deviennent des outils forts intéressants. Des modèles phénologiques de nombreuses cultures sont déjà intégrés dans le logiciel CIPRA (Plouffe et coll., 2014). Toutefois, aucun modèle n'a été développé pour les bleuets nains cultivés au Québec. Récemment, un modèle basé sur l'approche des cumuls thermiques (degrés-jours) a été proposé pour les bleuets nains produits en Nouvelle-Écosse (White et coll., 2012). Pour l'année de production végétative, ce modèle permet de prédire, en utilisant une température de base de 0°C, l'émergence des tiges latérales (rameaux) et l'avortement des bourgeons apicaux (stade fil noir). Pour l'année de production de fruits, le modèle permet de prédire la période de floraison. Afin d'utiliser un tel modèle pour les

conditions climatiques du Québec, une évaluation des prédictions phénologiques s'impose avec des données recueillies dans les zones de production du bleuet nain.

Le rendement du bleuet nain est très variable d'une année à l'autre à cause des aléas climatiques (Agrinova et coll., 2016). Un modèle bioclimatique qui prédirait le rendement annuel potentiel du bleuet nain en bleuetières au Saguenay-Lac-Saint-Jean serait utile afin d'anticiper les rendements annuellement et de projeter ceux-ci dans le futur à l'aide de scénarios de changements climatiques. Une étude réalisée par Hall et coll. (1982) n'a montré aucune corrélation significative entre la production de bleuets nains au Québec et des variables météorologiques à un seuil de confiance de 95 % avec 27 ans de données.

Plusieurs facteurs météorologiques peuvent influencer le rendement, comme les épisodes de gel qui peuvent causer une diminution significative du rendement (Kinsman, 1993; Olson et coll., 2001; Rochette et coll., 2004; Rowland et coll., 2008). La sévérité des dommages causés par des températures gélives varie principalement selon l'intensité du gel et le stade phénologique (Hicklenton et coll., 2002). Il y a trois périodes de gel qui peuvent affecter le rendement en bleuets : le gel hivernal, le gel printanier tardif et le gel automnal hâtif. Une gelée avant la récolte peut accélérer l'abscission des bleuets mûrs et augmenter la proportion de fruits verts à la récolte (Desjardins, 2014). Un ramollissement et une déshydratation du bleuet peuvent aussi avoir lieu (Agrinova et coll., 2016). Avant les premières neiges, les bourgeons peuvent subir des dommages si les plants ne sont pas encore complètement endurcis contre le froid (Rowland et coll., 2008). Le seuil de tolérance du bleuetier au gel hivernal entre décembre et mars est de -25°C (Agrinova et coll., 2016). Certains génotypes peuvent résister à des températures allant jusqu'à -28°C (Ehlenfeldt et coll., 2012). Sous ces températures, des dommages peuvent être causés aux bourgeons, aux tiges et aux rhizomes si les bleuetiers ne sont pas recouverts de neige (Agrinova et coll., 2016). Les dommages causés par le gel printanier ont lieu lorsque la dormance est levée et que les bleuetiers perdent leur résistance au froid (Ehlenfeldt et coll., 2012; Zapa, 2017). Au Saguenay-Lac-Saint-Jean, ce gel peut se produire durant la floraison (Zapa, 2017). Pour une durée d'exposition des fleurs au gel entre deux heures et six heures, il n'y a pas d'impact significatif sur la nouaison. Toutefois, à $-3,5^{\circ}\text{C}$, l'ouverture des fleurs fermées est inversement proportionnelle à la durée d'exposition. Le gel des fleurs fermées réduit le potentiel qu'elles ouvrent et donc de la mise à fruit. Les fleurs exposées à une température sous $-3,5^{\circ}\text{C}$ ne produisent pas de fruits. (Hicklenton et coll., 2002) Les fleurs ouvertes peuvent tolérer des températures jusqu'à $-2,2^{\circ}\text{C}$ (Yarborough, 2015).

Lorsque le bleuetier n'est pas couvert entièrement par la neige et que le sol est gelé, les tiges peuvent mourir déshydratées à cause de l'assèchement causé par le vent. La neige isole et protège les plants contre le froid, le vent et la pluie hivernale (Kinsman, 1993; Girona, 2017; Fortin et coll., sans date). La survie des bourgeons apicaux à des températures inférieures à la température minimale de survie est attribuable à la couverture de neige (Kinsman, 1993; Cappiello et coll., 1994).

Les précipitations peuvent aussi avoir un effet sur le rendement du bleuet nain. Lorsque la disponibilité de l'eau du sol est limitée, la croissance végétative est favorisée au détriment de la

croissance reproductive (Glass et coll., 2005). Un été chaud et sec peut diminuer le rendement jusqu'à 50% (AAC, 2017). Un stress hydrique pendant le mois qui précède la récolte fait en sorte que les bleuets sont plus petits qu'à la normale (Hicklenton et coll., 2000; Desjardins, 2014). Le bleuet nain possède toutefois une bonne tolérance au stress hydrique grâce à sa régulation stomatique, à sa redistribution de l'eau à travers le rhizome et son réseau racinaire profond (Hicklenton et coll., 2000; Percival et coll., 2003; Glass et coll., 2005). Une pluie prolongée durant la floraison peut affecter négativement la pollinisation et augmenter la sévérité des maladies fongiques (Hall et coll., 1982).

Au Saguenay et au Lac-Saint-Jean, des notes techniques ont été recueillies par Joseph Savard du MAPAQ (Pierre-Olivier Martel, communication personnelle) permettant d'identifier la productivité des bleuets de 1986 à 2005, incluant aussi les causes probables associées aux dommages ou pertes de rendement :

- par des gels hivernaux
 - dommages importants : 1996 et 2003;
 - dommages partiels : 1987 à 1990, 1992, 1994 et 2001.
- des gels printaniers tardifs
 - perte totale : 1986 et 1998;
 - perte partielle : 1990, 1992, 2000 et 2003.
- des gels pendant la production des fruits
 - dommages partiels : 1987, 1999, 2000 et 2002.
- de la sécheresse
 - dommages importants : 1996 et 2003;
 - dommages partiels : 1988 à 1992, 1995, 1999 et 2005.
- d'autres facteurs biotiques (pollinisation et insectes ravageurs).

En résumé, le gel hivernal (45 % des années) et la sécheresse (40 % des années) sont les deux facteurs qui ont occasionné des pertes considérables pendant cette période de 20 saisons de croissance. Toutefois, le gel des fleurs, malgré une fréquence de 30 % des années, est le seul facteur qui a causé des pertes totales pour deux saisons (1986 et 1998).

D'autres facteurs peuvent aussi influencer le rendement comme la pollinisation, la fertilisation, l'irrigation, le taillage, la présence de mauvaises herbes, maladies et insectes ravageurs (Kinsman, 1993; Gauthier et Kaiser, 2013; Agrinova et coll., 2016; AAC, 2017).

CLIMAT EN ÉVOLUTION

La méthode pour quantifier les projections futures des variables du système climatique s'appuie sur la modélisation. La modélisation climatique consiste à numériser les équations différentielles régissant le système climatique (dynamique de l'atmosphère, échanges thermodynamiques, etc.). Ces équations sont distribuées sur une grille couvrant le globe terrestre (dans le cas des modèles de circulation générale) ou une partie restreinte du globe (dans le cas des modèles régionaux climatiques).

Les modèles climatiques à base physique offrent deux avantages principaux : 1) ce sont les seuls outils pouvant fournir un signal de changement climatique cohérent dans l'espace et le temps puisqu'ils répondent à un ensemble complexe de processus qui déterminent les changements futurs (Murphy et coll., 2004) et; 2) des ensembles de simulations et de projections climatiques sont maintenant disponibles ce qui permet d'apprécier les incertitudes associées à chaque indice, information essentielle dans le processus d'évaluation des impacts et de prise de décision. Ces modèles fournissent des signaux de changement pour différentes variables avec un degré de certitude qui diffère pour chacune d'entre elles. D'après ces modèles, les changements climatiques vont se traduire par des modifications au régime thermique et hydrique, induisant des changements des valeurs moyennes de certaines variables climatiques et de leur distribution, notamment pour certaines valeurs extrêmes (GIEC, 2013). Ceci concerne l'ensemble de la planète avec toutefois des disparités à l'échelle régionale.

D'une façon générale, le climat se réchauffera sur l'ensemble du territoire québécois et de façon plus marquée en hiver qu'en été. Ainsi au sud du Québec (zone située au sud du 50° parallèle), les températures annuelles projetées avec un scénario de fortes émissions de gaz à effet de serre, augmentent d'environ 2 à 4 °C pour la période 2041-2070. Au nord du Québec, les hausses projetées sont d'environ 3 à 6 °C pour 2041-2070 (Ouranos, 2014). D'ores et déjà, on observe une tendance à la hausse des températures depuis 1950, un allongement de la saison de croissance et une augmentation du nombre de degrés jours pour toutes les régions du Québec (Ouranos, 2014). Les résultats concernant le régime hydrique sont toutefois moins robustes et présentent une variabilité spatiale plus importante que pour la température. Néanmoins, les modèles climatiques s'accordent sur des hausses hivernales et printanières des cumuls de précipitations partout au Québec. Ces mêmes modèles ne mettent pas en évidence de changement significatif des précipitations durant la période estivale dans le sud du Québec (zone située au sud du 50° parallèle), ce qui pourrait occasionner une augmentation du risque de déficit hydrique durant cette période du fait de l'augmentation de l'évapotranspiration occasionnée par les températures plus élevées (Ouranos, 2014).

4. Méthodologie / données

Volet 1. Développer des connaissances et des outils pour raisonner l'irrigation en fonction du stress hydrique et du risque de gel des fleurs

Sites expérimentaux

À terme, six dispositifs expérimentaux ont été mis en place chez deux entreprises spécialisées dans la production commerciale de bleuets nains. Ces dernières, soit La Ferme Forestière Paul Grenon & Fils inc. (48° 38.780'N, 71° 9.087'O) et la bleuetière 9223-7346 Québec inc. (48° 43.799'N, 71° 39.801'O), sont respectivement situées à Saint-David-de-Falardeau et à l'Ascension-de-Notre-Seigneur dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean (Figure 64, annexe)

Matériel végétal, régie de culture et cycle de production

L'établissement typique d'une bleuetière consiste à confirmer le potentiel d'un site et à le déboiser. Rapidement et naturellement, la croissance du bleuet sera observée et favorisée par différentes pratiques culturales.

Sur les sites où ont été réalisés les essais, les producteurs suivent le cahier de charge de la certification *Bleuets sauvages boréals*. Cette certification apporte, entre autres, des limitations en ce qui a trait aux pratiques culturales utilisées au champ. Spécifiquement, la méthode interdit l'application de produits de synthèse (produits phytosanitaires et engrais) au cours des 12 mois précédents la récolte des fruits.

La bleuetière située à l'Ascension-de-Notre-Seigneur a obtenu la certification biologique au cours de la réalisation du projet. D'autres changements ont alors été apportés au niveau de la régie de culture tels que la régie de fertilisation, la lutte contre les mauvaises herbes, les maladies et les insectes qui nécessitent des moyens de lutte alternatifs et homologués.

Le cycle de production du bleuet nain s'échelonne habituellement sur deux ans. La première année est celle dédiée à la production du matériel végétal (année de végétation) tandis que la production sera effectuée en 2^e année du cycle (année de production). À la suite de la récolte, la partie végétative est détruite par fauchage ou par brûlis pour amorcer un nouveau cycle de production.

En ce qui a trait à la pollinisation des fleurs, le ratio recommandé de 0,8 à 1 ruche/acre (0,3 à 0,4 ruche /ha) a été respecté.

Traitements

Les traitements ont été élaborés en considérant le cycle de production de la bleuetière. Six cycles de production (Végétation-Production) ont été complétés durant le projet et ces derniers sont présentés au Tableau 1 selon le site, le champ et l'année.

En 2015, un champ en année de végétation (C1-Végétation n° 1) a été sélectionné sur chacun des deux sites. Le champ 1 au site de Saint-David-de-Falardeau est aménagé pour la production commerciale depuis 2003, alors que celui au site de l'Ascension-de-Notre-Seigneur l'est depuis 2007. Les essais réalisés en 2015, l'ont été dans le cadre d'un projet financé par le programme d'appui au développement de l'agriculture et de l'agroalimentaire en région (PADDAR), projet n° 1516-4073-046QC. Un rapport a été produit pour ce projet et les résultats ont aussi été inclus dans le présent projet.

En 2016, un nouveau champ (C2-Végétation n° 1) a été sélectionné sur chacun des sites. Ces champs sont aménagés pour la production commerciale depuis 1998, pour le site de Saint-David-de-Falardeau et depuis 2007, pour le site de l'Ascension-de-Notre-Seigneur. Parallèlement, les deux champs qui étaient en végétation en 2015, sont maintenant en production (C1-Production n° 1).

En 2017, un premier cycle de production a été complété avec les Champs 1 (Végétation n° 1 et Production n° 1). Un deuxième cycle de production a alors été amorcé sur les mêmes champs (Végétation n° 2 et Production n° 2). Les champs n° 2 qui étaient en végétation en 2016, sont maintenant en production.

En 2018, les champs qui étaient en végétation en 2017 sont alors en production (C1-Production n° 2).

Tableau 1. Cycle de production (Végétation-Production) selon le site, le champ et la saison.

Site	N° champ	Année			
		2015*	2016	2017	2018
Ascension-de- Notre-Seigneur	C 1	Végétation n° 1	Production n° 1	Végétation n° 2	Production n° 2
	C 2		Végétation n° 1	Production n° 1	
Saint-David- de-Falardeau	C 1	Végétation n° 1	Production no. 1	Végétation n° 2	Production n° 2
	C 2		Végétation n° 1	Production n° 1	

* Projet PADAAR n° 1516-4073-046QC (Boivin et coll., 2016).

Détermination des consignes d'irrigation

Les trois consignes de déclenchement du système d'irrigation contre le stress hydrique (A, B et C) ont été déterminées à partir d'une courbe de désorption en eau du sol, et ce, pour chacun des sites. Pour ce faire, des échantillons de sols non perturbés ont été prélevés au milieu de l'horizon 0-30 cm avec des cylindres de polychlorure de vinyle (PVC) qui mesurent 10 cm de diamètre et 10 cm de hauteur (Figure 66, annexe). La couche superficielle, où la matière organique s'accumule, n'a pas été caractérisée. En laboratoire (Figure 67, annexe), les échantillons ont ensuite été saturés en eau pendant 24 heures. Immédiatement après la saturation la masse de l'échantillon a été mesurée avec une balance précise au 0,01 g (Shimadzu, Tx4202L) pour déterminer la teneur en eau volumique du sol à la saturation. Un tensiomètre (Hortau, Tx-80, petite céramique) a été inséré au centre de l'échantillon (à 5 cm de profondeur) pour mesurer le potentiel matriciel en continu. Quotidiennement, la masse de l'échantillon a été mesurée à l'aide de la balance électronique (Shimadzu, Tx4202L). Cette procédure s'est poursuivie jusqu'à ce que le tensiomètre se décharge (environ 80 kPa). Le sol de l'échantillon a ensuite été séché à l'étuve à 105 °C, pendant 48 heures, pour déterminer le poids du sol sec. Finalement, la relation entre la teneur en eau volumique et le potentiel matriciel a été obtenue en associant les mesures réalisées.

Les consignes d'irrigation et la hauteur d'eau d'irrigation sont présentées au Tableau 2. La consigne A, qui a été utilisée pour le Champ n° 1 au site de Saint-David-de-Falardeau, implique de déclencher l'irrigation lors que le tensiomètre indique 15 kPa. À cette consigne, la culture aura prélevé 13 mm d'eau dans le sol. La durée de l'épisode a été déterminée afin de rétablir le statut hydrique du sol près de la capacité au champ. La consigne B, intervient lorsque 23 mm ont été prélevés. Hormis le Témoin non irrigué, la consigne C, est celle qui laisse davantage le sol s'assécher et intervient lorsque 29 mm ont été prélevés. Plusieurs jours sans ou avec très peu de précipitations sont nécessaires pour atteindre cette consigne. Pour le champ n° 2, les consignes d'irrigations ainsi que les temps d'irrigation ont été ajustés selon la caractérisation du sol et sont légèrement différents au champ n° 1.

Au site de l'Ascension-de-Notre-Seigneur, les deux champs étaient situés à proximité l'un de l'autre. La caractérisation physique des sols et les courbes de désorption en eau ont révélé une grande similitude entre les deux champs. C'est pourquoi les consignes d'irrigation et les temps d'irrigation ont été les mêmes.

Tableau 2. Description des consignes de déclenchement A, B et C, soit la valeur en kPa, la durée d'un apport (min.) et la hauteur d'eau appliquée (mm) par épisode selon le site et le no du champ.

Site	N° champ		Consigne (kPa)			Durée d'un épisode d'irrigation (min)			Hauteur d'eau appliquée (mm)		
			A	B	C	A	B	C	A	B	C
Ascension-de-Notre-Seigneur	C1	et	10	18	35	122	174	235	14	20	27
Saint-David-de-Falardeau	C1		15	25	35	113	200	252	13	23	29
	C2		11	21	35	122	183	274	14	21	31

Un total de 16 traitements a été à l'étude dans ce projet. Ces traitements ont d'abord été élaborés pour déterminer un seuil d'intervention (consignes A, B et C) avec l'irrigation pour éviter un stress hydrique à la culture. Ils ont aussi été élaborés afin de pouvoir mesurer l'impact d'un stress hydrique, s'il survient :

- en végétation seulement;
- en végétation et en production.

Ces traitements sont présentés au Tableau 3. Par exemple, il n'est pas permis d'intervenir avec l'irrigation en saison de végétation pour le traitement n° 2, il faut attendre en saison de production. Le traitement n° 6 a la même consigne de déclenchement que le n° 2, mais contrairement à ce dernier, il est permis d'intervenir avec l'irrigation tant en végétation qu'en production avec le n° 6. Aussi, ces deux traitements font intervenir l'irrigation si la température de l'air au niveau du couvert végétal atteint - 2 °C durant la période de la floraison.

Tableau 3. Description des 16 traitements à l'étude.

N° traitement	Consigne	Saison végétation	Saison production		
		Irrigation lorsque la consigne est atteinte	Irrigation contre le gel des fleurs	Irrigation lorsque la consigne est atteinte	
1	T	Aucune irrigation possible	Irrigation lorsque la température de l'air au niveau du couvert végétal (en floraison) atteint -2°C	Aucune irrigation possible	
2	A				
3	B				
4	C				
5	T	Aucune irrigation possible			Aucune irrigation possible
6	A				
7	B				
8	C				
9	T	Aucune irrigation possible	Aucune protection contre le gel des fleurs avec l'irrigation	Aucune irrigation possible	
10	A				
11	B				
12	C				
13	T	Aucune irrigation possible			Aucune irrigation possible
14	A				
15	B				
16	C				

Dispositifs expérimentaux et analyses statistiques

Un modèle d'analyse de variance à un facteur fixe a été ajusté pour les données de rendements et l'indice de Brix, pour les années de production et végétation des deux sites séparément. Comme le dispositif expérimental est un plan entièrement aléatoire (16 traitements et 4 répétitions), il n'y a pas d'effet aléatoire autre que l'erreur résiduelle dans le modèle.

La procédure PROC MIXED de SAS (version 9.4) a été utilisée pour cette analyse de variance. Les tests de F permettent d'établir si l'effet de traitement est significatif. Les moyennes des traitements et des groupes de traitements d'intérêt ont été calculées et comparées à l'aide de contrastes et de test de t.

Pour chacun des dispositifs expérimentaux implantés, un schéma est présenté à la Figure 1 (2015-2016 et 2017-2018, Champ 1 – Saint-David-de-Falardeau*), à la Figure 2 (2015-2016 et 2017-2018, Champ 1 – Ascension-de-Notre-Seigneur), à la Figure 3 (2016-2017 - Champ 2), et à la Figure 4 (2016-2017 – Champ 2).

*Ce dispositif expérimental est composé de 54 unités expérimentales.

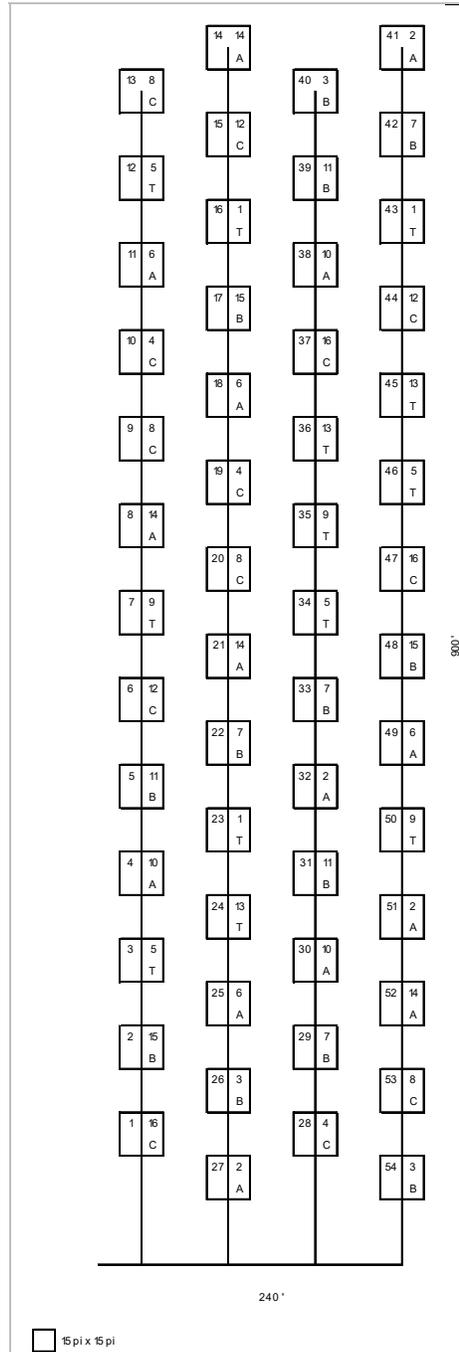


Figure 1. Schéma du dispositif expérimental utilisé pour les deux cycles de production (2015-2016 et 2017-2018) - Champ 1 - Saint-David-de-Falardeau.

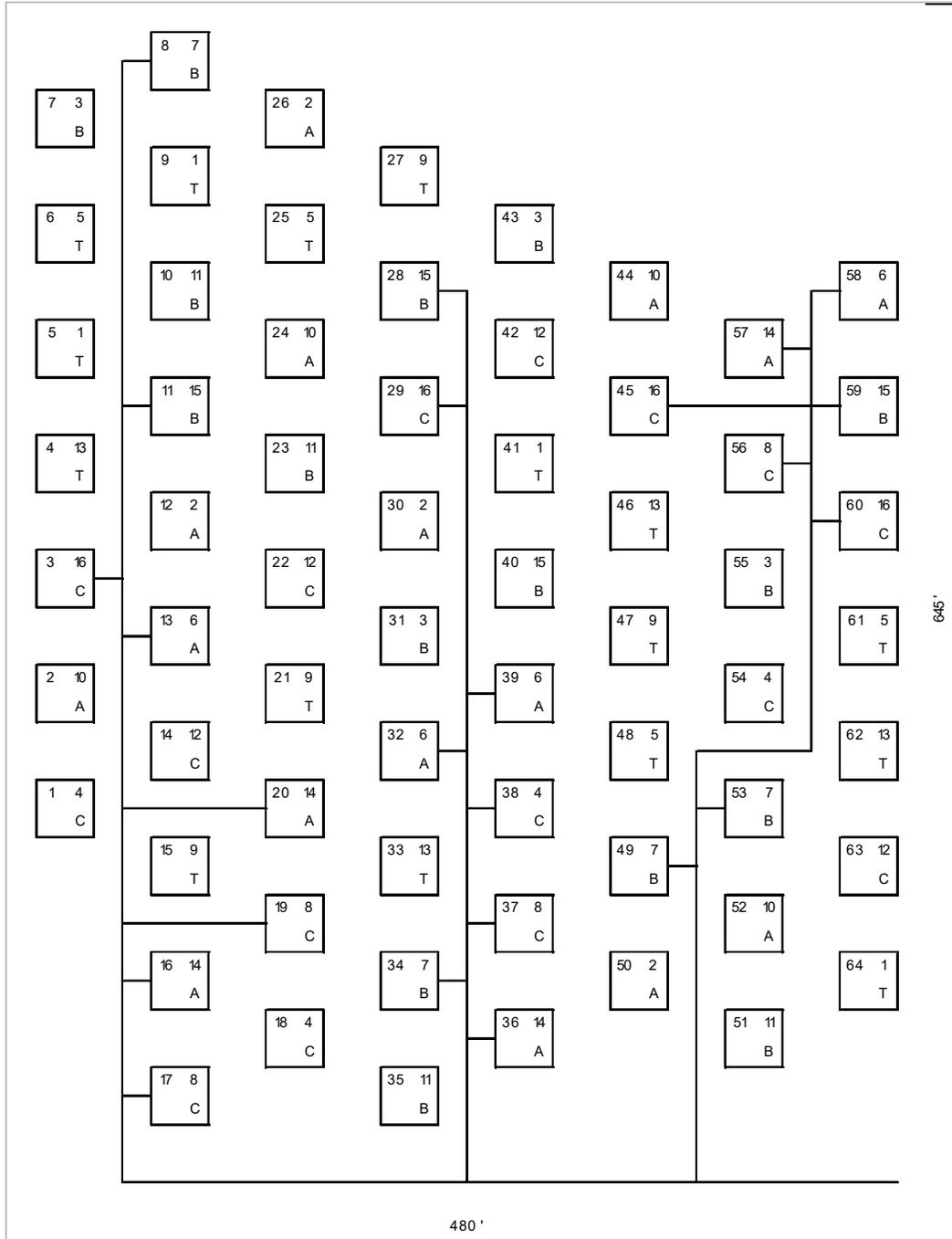


Figure 2. Schéma du dispositif expérimental utilisé pour les deux cycles de production (2015-2016 et 2017-2018) - Champ 1 – Ascension-de-Notre-Seigneur.

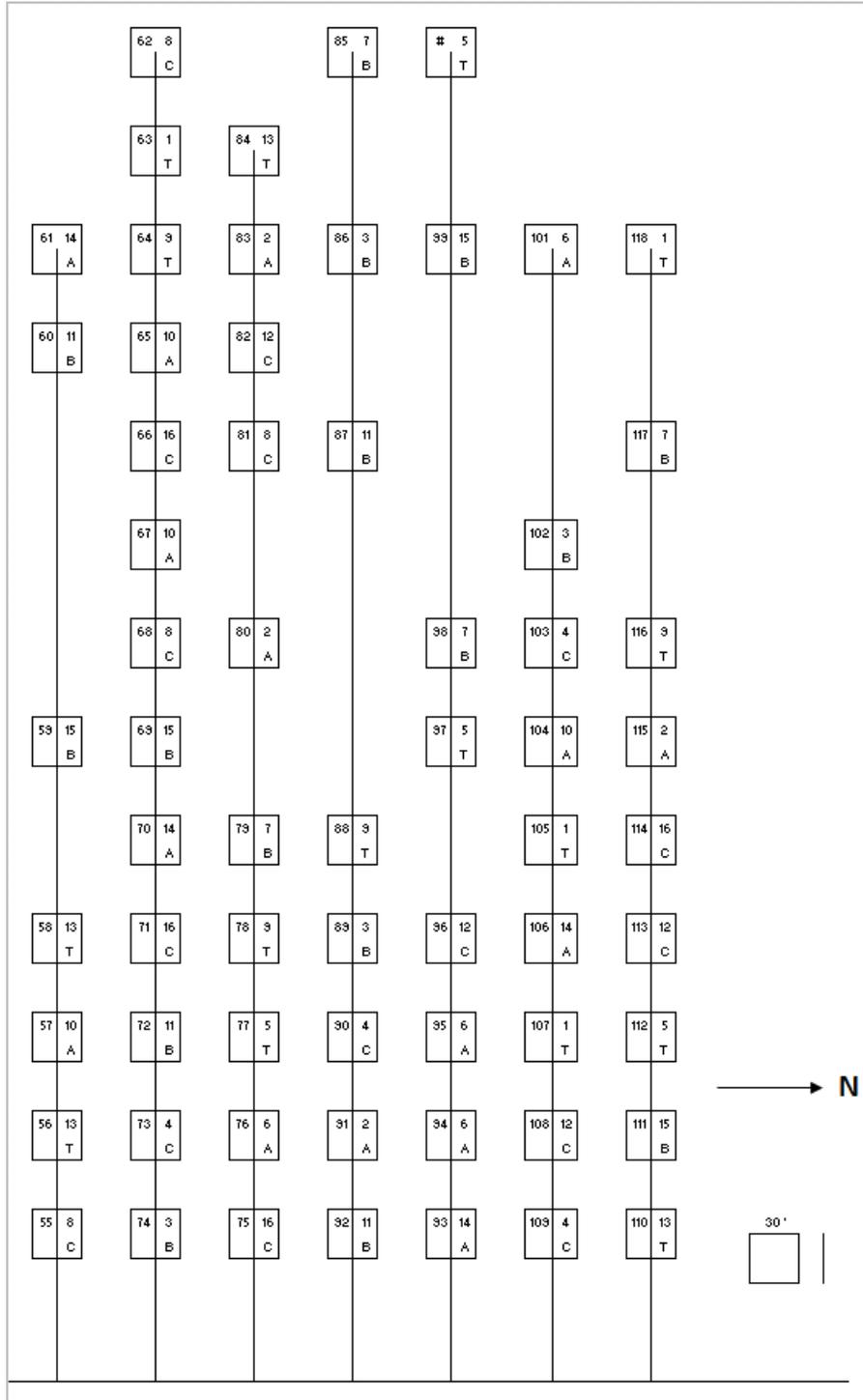


Figure 3. Schéma du dispositif expérimental utilisé pour les deux cycles de production (2016-2017) - Champ 2 - Saint-David-de-Falardeau.

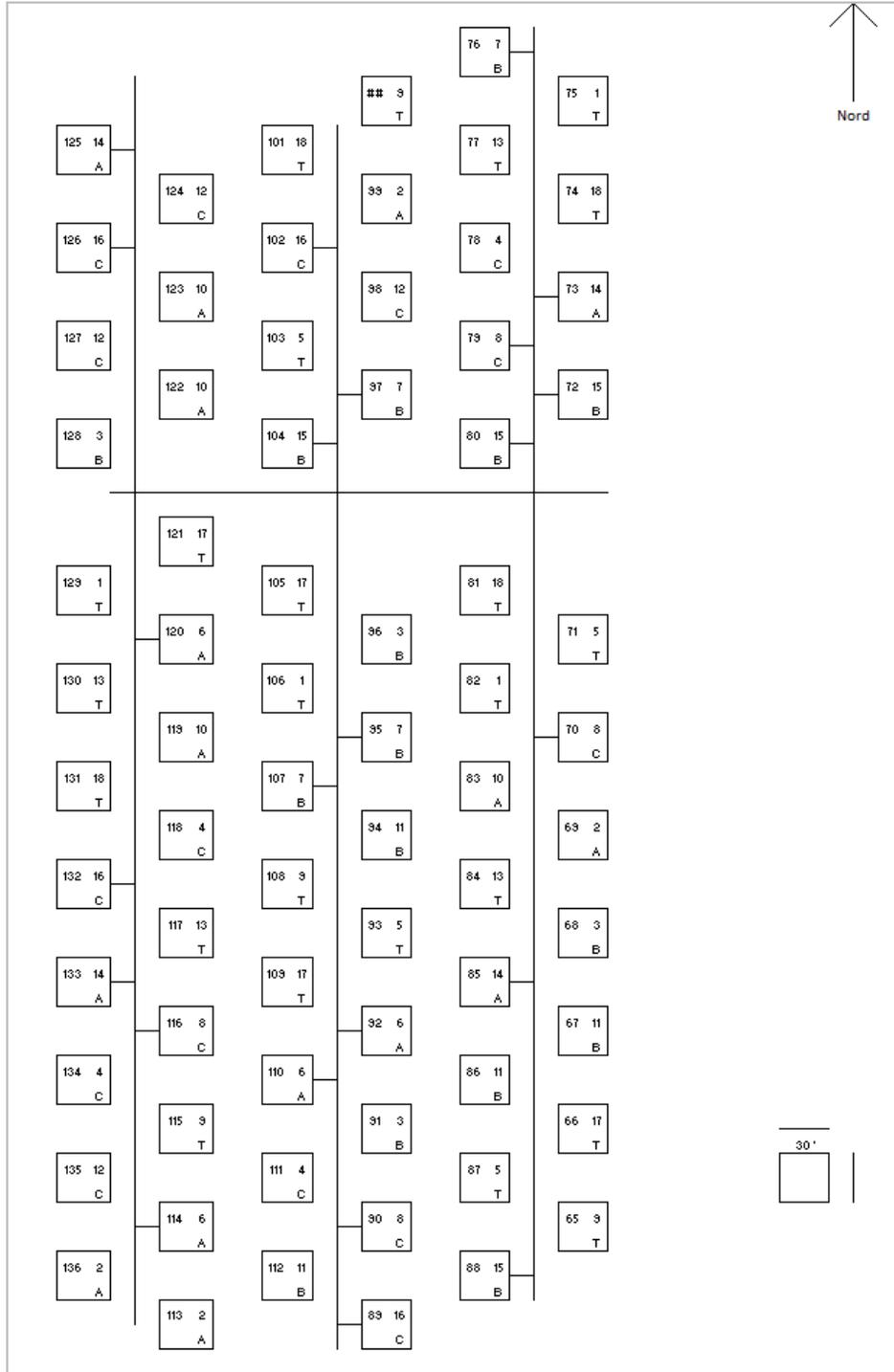


Figure 4. Schéma du dispositif expérimental utilisé pour les deux cycles de production (2016-2017) - Champ 2 – Ascension-de-Notre-Seigneur.

Système d'irrigation et dimension des unités expérimentales

Le gicleur retenu pour les essais a été le Xcel-Wobbler® buse #12 rouge à angle moyen de la compagnie Senninger Irrigation Inc. Étant donné qu'un seul gicleur par parcelle est utilisé, ce dernier a fait l'objet d'une évaluation afin de déterminer l'uniformité d'application et la hauteur d'eau appliquée selon la durée et la pression d'opération. Habituellement, la portée des gicleurs doit se « recouper » l'une l'autre selon un design précis afin d'assurer une bonne efficacité. La couverture du gicleur, le débit et la hauteur d'eau moyenne ont été mesurés à quatre pressions d'opération (8, 10, 12 et 15 psi) et les résultats sont présentés au Tableau 4.

Tableau 4. Portée (m²), débit (l/h) et hauteur d'eau appliquée (mm/h) du gicleur selon la pression d'opération (psi).

Pression (psi)	Portée (aire m ²)	Débit (l/h)	Hauteur d'eau moyenne (mm/h)
8	87	708	8,1
10	108	804	7,4
12	125*	846	6,8
15	133	936	7,0

*Diamètre de 13 m.

L'uniformité d'application a aussi été évaluée à ces quatre pressions d'opération. Pour évaluer cette uniformité, 44 pluviomètres ont été répartis selon le schéma de la Figure 5 où le « O » représente le gicleur et les chiffres (0 et +), la hauteur d'eau mesurée par les 44 pluviomètres durant les 20 minutes de l'essai (par pression). Les résultats présentés à la Figure 5 ont été obtenus à 12 psi, car à la suite des essais, c'est cette pression d'opération qui a été retenue. Ainsi, le gicleur, qui fait office de centre de la parcelle, a une portée d'action de 13 m de diamètre et couvre une superficie de 125 m².

La zone où l'uniformité de l'irrigation a été jugée la plus grande débute au 2^e mètre à partir du gicleur, et ce, jusqu'au 4^e mètre. Il y a donc un « beigne » d'une largeur de deux mètres autour du gicleur qui a été considéré comme la zone où effectuer l'échantillonnage des feuilles, le dénombrement des bourgeons floraux et la récolte des fruits. Maintenant, comme ce beigne peut être affecté par la direction et la vitesse du vent lors d'un épisode d'irrigation, il a été subdivisé en 4 zones couvrant chacune 90°, soit 25 % du cercle. Ces dernières sont orientées vers chacun des points cardinaux (nord, sud, est et ouest).

Par ailleurs, chacun des gicleurs était muni d'un régulateur de pression à 12 psi (Senninger, PRL12) et était contrôlé individuellement et manuellement via une valve (Figure 65, annexe).

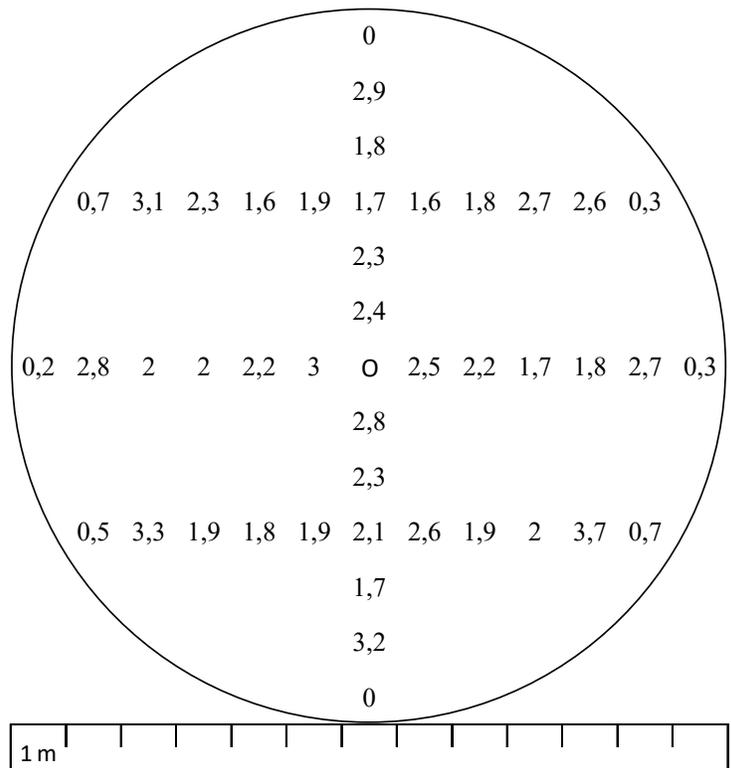


Figure 5. Schéma de la distribution de l'uniformité d'application en eau du gicleur à 12 psi (hauteur d'eau en mm/20 minutes).

Collecte des données

Caractérisation des propriétés physiques du sol

La caractérisation du sol des sites expérimentaux a été effectuée pour l'horizon 0 à 15 cm (surface) et 15 à 30 cm (profondeur) au printemps 2015. Le « 0 » cm débute au sol minéral, ce qui exclut la couche où s'accumule la matière organique. Le pH_{eau} a été mesuré dans un rapport sol/eau 1:1 (CPVQ, 1988). La granulométrie a été déterminée par la méthode de l'hydromètre en six points, suivie d'un tamisage des sables (Gee et Bauder, 1986). Le contenu en matière organique totale a été calculé selon le contenu en C_{tot} , déterminé au LECO, avec un facteur de conversion de 1,724.

Conditions météorologiques et évapotranspiration potentielle

Des stations météorologiques (Figure 68, annexe) situées à chacun des sites, soit à Saint-David-de-Falardeau (48.646003°, -71.151466°) et à l'Ascension-de-Notre-Seigneur (48.730387°, -71.663629°) ont mesurées la température et l'humidité relative de l'air (Rotronic, HC-S3), la radiation solaire (Apogee Instruments, CS300), la vitesse et la direction du vent (R.M. Young, 05103), ainsi que la pluviométrie (Onset computer corporation, HOBO RG3-M). Les données ont été enregistrées avec un acquiiseur de données (Campbell Scientific, CR206X) relié à un modem cellulaire (Microhard Systems, IPn3Gb). Les données pouvaient ainsi être consultées à distance. Les équipements présents sur ces stations ont permis de calculer l'évapotranspiration (moment présent) à l'aide de la formule standardisée courte de Penman-Montheith (ASCE, 2005) (Équation 1).

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

Équation 1. Équation de Penman-Montheith

ET_p : évapotranspiration potentielle [mm/jour],

R_n : radiation solaire nette à la surface de la culture [MJ/m²/jour],

G : flux de chaleur au sol [MJ/m²/jour],

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

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

C_n : constante changeant selon la taille des cultures (petites : 900),

C_d : constante changeant selon la taille des cultures (petites : 0,24,

e_s : pression moyenne de vapeur saturée à une hauteur de 1,5 à 2,5 m [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],

γ : constante psychrométrique [kPa/°C].

Température de l'air dans le couvert végétal

Le suivi de la température de l'air dans le feuillage a été réalisé au moyen de sondes de température installées à hauteur des fleurs (Figure 69, annexe), soit à une hauteur d'environ 25 cm du sol (Hortau, TX4web). Les sondes étaient connectées à un système d'acquisition de données pouvant être consulté à distance (Hortau, Irrolis web). Une alarme (Hortau, Irrolis web) a été configurée (2 °C) pour que l'équipe terrain soit avertie lorsque la température se rapproche de la consigne (-2 °C). De plus, un suivi de la température de l'air au niveau du feuillage a été réalisé en continu avec d'autres sondes de température à la même hauteur par rapport à la surface du sol (Campbell Scientific, 109). Comme il s'agit d'un suivi dirigé vers la mesure des températures minimales de l'air, les sondes n'étaient pas protégées des rayons du soleil avec un écran prévu à cette fin. Ces sondes étaient connectées à un acquiiseur de données CR200X (Campbell Scientific).

Suivis statut hydrique du sol

Le suivi quotidien du statut hydrique du sol s'est effectué au moyen de tensiomètres (Hortau, TX-80 et TX4web) (Figure 70, annexe). Les tensiomètres ont été installés à une profondeur de lecture de 18 cm. Cette profondeur correspond à la densité maximale d'enracinement de la culture, observée avec des profils de sol. Selon le site et le stade phénologique du champ en question, les mesures de certains équipements étaient accessibles à distance, tandis que les autres étaient seulement accessibles sur place. Il y avait trois moyens d'accéder aux données à distance, soit avec l'outil Irrolis web disponible en ligne, soit avec des acquiiseurs de données (Campbell Scientific, CR206X) communiquant par ondes radio à un autre acquiiseur de données du même modèle connecté à un modem cellulaire (Microhard Systems, IPn3Gb) ou soit en communiquant avec un ordinateur à distance sur lequel les mesures des tensiomètres à transmission par onde radio (TX-80) étaient enregistrées. De cette manière, il était possible de consulter à distance et à tout moment, le statut hydrique du sol pour chacun des champs à l'étude et pour chaque consigne d'irrigation.

Le suivi du statut hydrique du sol a également fait l'objet d'un suivi à l'aide de sondes TDR (Campbell Scientific, CS625). Les sondes TDR (Figure 71, en annexe), d'une longueur de 30 cm, ont été insérées en diagonale dans le sol afin de mesurer les 20 premiers cm de sol minéral. De nombreuses parcelles tant en saison de végétation qu'en saison de production ont été instrumentées. En plus de suivre le statut hydrique du sol, les sondes TDR ont permis d'évaluer l'évapotranspiration de la culture (ET_c) et d'estimer des coefficients culturaux (K_c).

Statut nutritionnel des feuilles

En 2015 et 2016, l'échantillonnage des feuilles a été réalisé au moment de l'arrêt de la croissance végétative (entre le 23 et le 29 août). Dans chacune des parcelles, 15 tiges dont l'extrémité présente la pointe noire, ont été sélectionnées aléatoirement dans le « beigne » du gicleur. Les feuilles ont été dégrafées de la tige, du bas vers le haut. Les feuilles ont ensuite été emballées dans un sac de plastique et le tout a été conservé dans une glacière. À partir de 2017, l'échantillonnage des feuilles des parcelles en production a aussi été réalisé au moment de la récolte des fruits.

Une fois au laboratoire de l'IRDA, les feuilles ont été séchées et broyées à 100 mesh pour former un échantillon composite. Le N total a été déterminé par combustion au LECO.

Nombre de bourgeons floraux

À l'intérieur de chacune des unités expérimentales, les bourgeons floraux ont été dénombrés sur 10 tiges en 2015, 2016 et 2017. Le dénombrement entre le 4 et le 21 novembre. Les tiges ont été sélectionnées à raison de 10 par zone identifiée (nord, sud, est et ouest) à l'aide d'un cadre qui a été lancé dans le couvert végétal. Le cadre avait 25,4 cm de côté, pour une surface de 645,2 cm².

Récolte

Les récoltes en fruits ont été effectuées en 2016, 2017 et 2018. Les dates des récoltes sont présentées au Tableau 5. Le rendement en fruits a été mesuré sur une superficie de 2 m² (2 mesures répétées avec un quadrat de 1 m²) avec des peignes manuels (Figure 72, annexe). Le poids frais a été mesuré directement au champ à l'aide d'une balance électronique (Shimadzu, Tx4202L). Par la suite, les fruits ont été conservés dans une glacière. En laboratoire, le poids moyen d'un fruit a été déterminé en pesant un sous-échantillon constitué de 100 fruits. L'indice de Brix a aussi fait l'objet de mesure au moyen d'un réfractomètre (Hanna Instruments, Hi 96801). Ainsi, le jus du sous-échantillon de 100 fruits été recueilli et analysé, individuellement, pour déterminer sa teneur en saccharose.

Tableau 5. Date de la récolte des fruits selon l'année et le site.

Année	Site	
	Ascension-de-Notre-Seigneur	Saint-David-de-Falardeau
2016	24 août	23 août
2017	18 août	17 août
2018	21 août	20 août

Coefficients culturaux (K_c)

La variation quotidienne de la teneur en eau volumique dans les 20 premiers cm du sol, mesurée avec les sondes TDR, a été rapportée en mm d'eau. La valeur obtenue a pu être utilisée pour évaluer l'évapotranspiration de la culture (ET_{c-TDR}). Pour y parvenir, la valeur mesurée à 5 h a été soustraite de la valeur mesurée à 20 h, et ce, pour chacune des sondes TDR installées. Les valeurs issues de journées où il y a eu des précipitations et celles au lendemain de celles-ci ont été éliminées. Par la suite, ces prélèvements (ET_{c-TDR}) ont été mis en relation avec l'évapotranspiration potentielle quotidienne pour déterminer un coefficient cultural estimé (k_c) tel que décrit par Allen et coll. (1998).

$$k_c = \frac{ET_{c-TDR}}{ET_p}$$

Récapitulatif des principales étapes de réalisation des essais terrains

Les principales étapes de réalisation sont rapportées au Tableau 6 selon le site et la date où ces évènements ont été réalisés.

Tableau 6. Chronologie des principales étapes de réalisation de 2015 à 2016, selon le site.

Évènement	Ascension-de-Notre-Seigneur				Saint-David-de-Falardeau			
	2015	2016	2017	2018	2015	2016	2017	2018
	Production	Champ 1	Champ 2	Champ 1	Champ 1	Champ 2	Champ 1	Champ 1
Végétation	Champ 1	Champ 2	Champ 1		Champ 1	Champ 2	Champ 1	
Préparation terrain (piquetage)	7 mai	12 mai	5 mai	-	7 mai	12 mai	5 mai	-
Prélèvement des échantillons de sol	7 mai	12 mai	5 mai	-	7 mai	12 mai	5 mai	-
Courbes de désorption en eau du sol (en laboratoire)	Juin	Juin	-	-	Juin	Juin	-	-
Installation des stations météorologiques	3 juin	Mai	5 mai	16 mai	4 juin	Mai	5 mai	16 mai
Installation des sondes TDR, sondes de température et tensiomètres	3 juin	Mai	25 mai	16 mai	4 juin	Mai	25 mai	16 mai
Installation des systèmes d'irrigation	2 juil.	Fin mai	25 mai	16 mai	3 juil.	Fin mai	25 mai	16 mai
Irrigation protection contre le gel	-	31 mai au 14 juin			-	31 mai au 14 juin		
Irrigation contre le stress hydrique	Voir Tableau 12				Voir Tableau 13			
Récolte des fruits (champs en production)	-	24 août	18 août	21 août	-	23 août	17 août	20 août
Prélèvement des échantillons de feuilles	7 août	24 août	18 août	21 août	7 août	23 août	17 août	20 août
Désinstallation des systèmes d'irrigation et autres équipements	15 oct.	24 nov.	21 sept	13 sept	16 oct.	24 nov.	22 sept	13 sept
Dénombrement des bourgeons floraux (champs en végétation)	4 nov.	Nov.	9 nov.	-	4 nov.	Nov.	9 nov.	-

Volet 2. Impact d'un climat en évolution sur le synchronisme fleur-gel et le bilan hydrique

Amélioration des estimations de l'ET_p et intégration dans le calcul du bilan hydrique

Pour permettre d'utiliser des estimations quotidiennes d'ET_p qui sont calculées à partir de données météo quotidiennes (Tmax, Tmin et Précip), ce que l'équation de référence Penman-Monteith ne permet pas, les équations proposées par Baier et Robertson (1965) et par Rochette et coll. (2004) ont été mises à jour. Afin d'améliorer les estimations de l'ET_p, plus spécifiquement lors des journées de pluie, huit stations météorologiques enregistrant des données horaires ont été sélectionnées pour représenter plusieurs régions du Québec, soit Ottawa, L'Assomption, L'Acadie, Lennoxville, Québec, Normandin, Rivière-du-Loup et New-Carlisle. Les valeurs de température maximales, minimales et de précipitations, ont été obtenues de ces stations météo du mois de mars à octobre des années 2012 à 2016. La radiation solaire a été estimée grâce à un module disponible dans le logiciel CIPRA qui intègre les données de température de l'air et des précipitations quotidiennes. Les valeurs de l'ET_p de référence sur une base horaire ont été estimées à partir des équations tirées du document produit par l'ASCE (Penman-Monteith). Ce module est aussi disponible dans le logiciel CIPRA et permet d'intégrer les mesures de température, d'humidité relative, de précipitations, de radiation solaire et de vitesse du vent, pour estimer l'ET_p.

Les nouveaux modèles pour le calcul de l'ET_p développés utilisent la même forme de base que celle de Baier et Robertson (1965), soit avec comme variables explicatives la température quotidienne maximale, l'amplitude de température durant la journée et la radiation solaire. L'estimation de la radiation solaire représente l'élément nouveau par rapport à l'approche préconisée par Baier et Robertson (1965). Une première équation pour l'ensemble des mois, soit de mars à octobre a été créée. Puis, pour chaque mois, une équation unique a été créée. Ces équations ont été générées à l'aide du logiciel statistique XLStat. Il est donc possible d'utiliser uniquement le modèle pour l'ensemble des mois ou d'utiliser les modèles disponibles pour chacun des mois de l'année, ces derniers étant légèrement plus précis que le modèle unique pour tous les mois. Les variables explicatives sont les mêmes pour chacun des neuf modèles d'estimation de l'ET_p quotidienne, mais les coefficients sont différents dans chacun de ceux-ci. Théoriquement, vu que des sites météo de plusieurs années et régions du Québec ont été utilisés pour l'estimation des coefficients, les valeurs d'ET_p quotidienne produites devraient être valables pour l'ensemble du Québec.

Modèle bioclimatique pour le développement phénologique du bleuet nain

Les présentes analyses font suite à un travail effectué sur la culture du bleuet nain au Québec, soit le développement d'un modèle de prédiction phénologique basé sur le cumul des degrés-jours. Les degrés-jours pour le modèle créé à l'été 2016 étaient cumulés par convention à partir du premier mars. Or, en 2016, le couvert de neige n'est disparu que le 5 mai dans les régions du Saguenay Lac-Saint-Jean. Il a été décidé d'intégrer l'impact du couvert de neige sur le cumul des degrés-jours.

Les données phénologiques utilisées ont été recueillies dans les rapports du réseau d'avertissement phytosanitaire (RAP) émis sur le bleuet nain entre 2009 et 2016. Les valeurs numériques attribuées aux différents stades par l'échelle phénologique universelle BBCH a permis le traitement informatique des données phénologiques. L'échelle phénologique BBCH disponible pour le groseillier, ainsi que les suivis effectués à l'été 2016 dans des bleuetières du Saguenay Lac-Saint-Jean ont permis de faire ces conversions (Meier, 2001).

Afin de faciliter les analyses, les différents sites du RAP ont été regroupés par région. En tout, 13 régions ont été désignées : 6 au Lac-St-Jean (2 Domaine-du-Roy, 2 Maria-Chapdelaine et 2 Lac-St-Jean Est), Saguenay, Mauricie, Laurentides et Côte-Nord (Minganie, Manicouagan, Sept-Rivières et Haute-Côte-Nord). Une station météorologique du réseau Agrométéo Québec a été attribuée à chaque région et les données météo proviennent des mesures effectuées sur chacune de ces stations. Le couvert de neige pour les différents sites d'observation a été estimé au moyen du modèle de prévision du couvert de neige disponible dans le logiciel CIPRA.

Afin de valider l'impact de la couverture de neige sur le développement du bleuet nain, trois niveaux de couverture de neige ont été testés. Les couverts de neige retenus sont 0, 5 et 10 cm. Des modèles de degrés-jours ont été créés pour chacun des trois niveaux de neige au sol. Le modèle d'estimation du couvert de neige de CIPRA a permis de déterminer le niveau de neige au sol quotidiennement pour chacune des stations météo. La dernière date où le seuil de neige de 10 cm atteint est déterminé au moyen de ce modèle. Les seuils 0 et 5 cm de neige n'ont pas été intégrés aux analyses subséquentes, puisque dans les analyses de 2017, il ne semblait pas y avoir de différence entre les différentes épaisseurs du couvert de neige. Afin d'intégrer la couverture de neige au modèle de développement des bleuets nains, cette date a été utilisée pour initier le cumul des degrés-jours pour chaque station, puis elle a été intégrée aux fichiers d'informations biologiques déjà existants. Afin de s'assurer de comparer les modèles sur une même base, la date du 1 mars a aussi été attribuée au premier jour de calcul.

Les degrés-jours sont calculés à partir de la date d'initiation du cumul des degrés-jours (dernière date avec 10 cm neige au sol ou 1^{er} mars) afin de qualifier l'impact de la couverture de neige. Les degrés-jours pour chaque stade ont été calculés selon la méthode de calcul des degrés-jours sinus simple. Une température de base de 0°C et une température optimale de 28°C ont été utilisées pour le calcul des degrés-jours. Finalement, afin d'évaluer l'impact du couvert de neige, des statistiques comparatives ont été effectuées. Ainsi, les modèles intégrant

le couvert de neige ont été comparés avec le modèle ne tenant pas compte de la couverture de neige, soit une date de départ à partir du 1^{er} mars.

Modèle bioclimatique pour la prédiction du rendement potentiel du bleuet nain

Pour construire le modèle de rendement, des données de rendement (kg/ha) de bleuetières aménagées au Saguenay-Lac-Saint-Jean de 1988 à 2018 ont été utilisées. Elles proviennent pour la plupart d'estimations réalisées à partir de données sur le Québec tirées de sources variées. La production de 1988 à 2018 a été déterminée à partir de données de production de bleuets nains du Québec fournies par le MAPAQ. Des données de production réelles au Saguenay-Lac-Saint-Jean provenant du Syndicat des producteurs de bleuets du Québec (2016) ont été utilisées pour les années 2000, 2002 à 2013 et 2017. Les superficies cultivées ont été estimées à 45,5% des superficies totales, c'est-à-dire en végétation et en production. Des données de superficies totales au Québec de 1993 à 2001 tirées du Recueil statistique de l'industrie canadienne et québécoise du bleuet ont été utilisées. À partir de ces informations, une superficie totale au Québec de 9950 ha a été choisie aléatoirement pour les années de 1988 à 1992. De 2002 à 2018, des données de superficies totales au Québec provenant du MAPAQ ont été utilisées pour faire les estimations pour le Saguenay-Lac-Saint-Jean. Étant donné les changements dans la régie du bleuet nain, les rendements ont été normalisés pour pouvoir comparer les années entre elles. Les années 1988 à 1998 et 1999 à 2018 ont été regroupées en deux périodes puisqu'elles avaient des données similaires. Les rendements ont été ajustés par rapport au rendement moyen de la période la plus actuelle.

Les données météorologiques utilisées pour les années 1988 à 2017 proviennent de jeux de données météorologiques à une résolution de 10 km qui ont été préparés pour l'ensemble du Canada par Ressource naturelle Canada, adaptés par l'équipe de recherche en bioclimatologie et modélisation d'AAC, afin que ceux-ci puissent être importés dans le logiciel CIBIOG. Il y a 39 points de grille qui ont été sélectionnés en traçant un polygone regroupant les principales bleuetières aménagées de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean. Les données de l'année 2018 proviennent de sept stations météorologiques disponibles sur Agrométéo Québec et se trouvant dans la région délimitée auparavant. Il s'agit de Normandin, Saint-Eugène-d'Argentenay, Sainte-Jeanne-d'Arc, Chute du Diable, Saint-Cœur-de-Marie, Mistook et Saint-Ambroise. Les moyennes des températures minimum, maximum et des précipitations ont été effectuées pour avoir la météo de l'ensemble de la région. Les données de 1987 à 2018 ont ensuite été importées dans le logiciel CIPRA en passant d'abord dans un logiciel de conversion de données météo quotidiennes à horaires. Les rapports de données quotidiennes ont été générés pour chaque année. Pour les analyses subséquentes, visant à établir le lien entre le rendement et les données météo, les variables suivantes ont été choisies : les températures minimum, maximum et moyenne, les précipitations, l'évapotranspiration potentielle, l'épaisseur de neige estimée et la température du sol estimée à 5 cm de profondeur. Des prédictions des stades phénologiques ont aussi été employées en relation avec des variables météorologiques. Elles ont été extraites de CIPRA en laissant le logiciel estimer la date du dernier 10 cm de neige au sol. Des graphiques dressant la dynamique hivernale de certaines variables ont été effectués. La Figure 6 illustre un hiver avec une couverture de neige élevée et peu de gel printanier et

correspond à une année ayant un rendement très élevé. À la figure Figure 7, on peut remarquer qu'il y a deux jours où la température avoisinait 0°C durant la période de floraison. D'ailleurs, le rendement était très faible.

Il y a 26 variables qui ont été mises en relation avec le rendement. Il s'agit de nombres du nombre de jours de gel réel ($T. \text{ min. air} \leq 0^{\circ}\text{C}$) et potentiel ($0^{\circ}\text{C} < T. \text{ min. air} \leq 2,5^{\circ}\text{C}$) à différents moments de l'année et stades phénologiques, ainsi que des variables basées sur les précipitations, températures, épaisseurs de neige et bilan hydrique du sol. Chaque saison est représentée par au moins une variable pour que le modèle puisse prendre en compte l'évolution annuelle du rendement potentiel. Ce sont les variables les plus significatives de chaque saison qui ont été retenues pour créer le modèle. Il y a neuf variables qui ont été conservées. Ce sont l'épaisseur de neige maximale au mois de mars (XNEIG3), le nombre de jours de gel total (gel réel et potentiel) durant la période de floraison (PFL-T2.5T) et avant le débourrement (PAD-T2.5T), le nombre de jours de gel réel du débourrement à la floraison (PDF-T0), le cumul de températures pondérées durant la période de floraison (DFF-CT0), les précipitations moyennes durant la floraison (FL-PPT), le bilan hydrique du sol durant la période de formation des fruits (NFR-BH), le bilan hydrique du sol de l'année précédente à la période qui correspondrait à la formation des fruits (NFR-BH (i -1)) et le nombre de jours de gel avec moins de 10 cm de neige au sol à l'automne avant que la température du sol se stabilise (A-GN<10). C'est la température du sol estimée à 5 cm qui a été prise pour calculer A-GN<10. La température du sol est considérée stable après au minimum cinq jours consécutifs ayant une température identique. La variable PDF-T0 a été ajoutée pour couvrir la période entre le débourrement et la floraison. Pour les variables PFL-T2.5T et DFF-CT0, la période de floraison s'étend de l'émergence des boutons floraux jusqu'à la fin de la floraison, tandis que FL-PPT comprend les stades boutons floraux jusqu'à fin de la floraison. NFR-BH est la moyenne des hauteurs d'eau valorisable quotidiennes, calculée avec une réserve facilement utilisable de 40 mm d'eau et un coefficient cultural de 0,45 de la nouaison jusqu'à la maturité des fruits. La variable DFF-CT0 est la somme des températures de gel, quand la température minimum de l'air est inférieure ou égale à 0°C, pondérée en fonction du stade phénologique du débourrement jusqu'à la fin de la floraison. La pondération varie de 1 à 6 en suivant l'ordre des stades phénologiques du bleuetier, car plus le développement est avancé, moins il est résistant à des températures sous 0°C. Le seuil de tolérance au gel du bleuetier varie linéairement en fonction de la pondération établie, donc du stade phénologique.

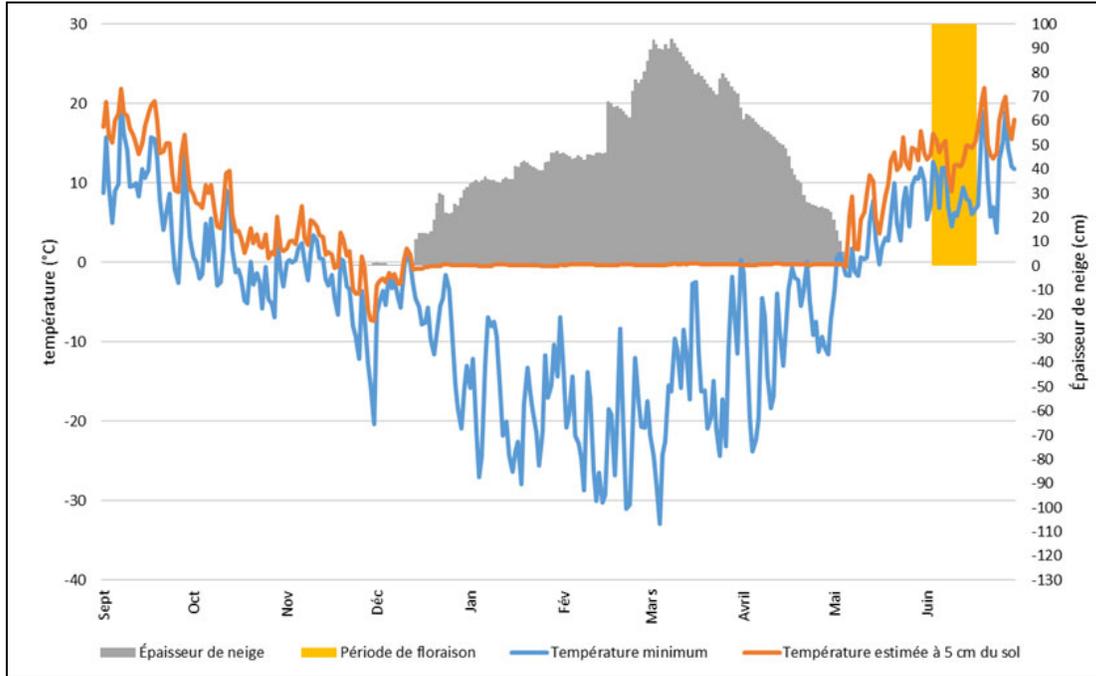


Figure 6. Portrait de l'hiver 2015-2016 au Saguenay-Lac-Saint-Jean.

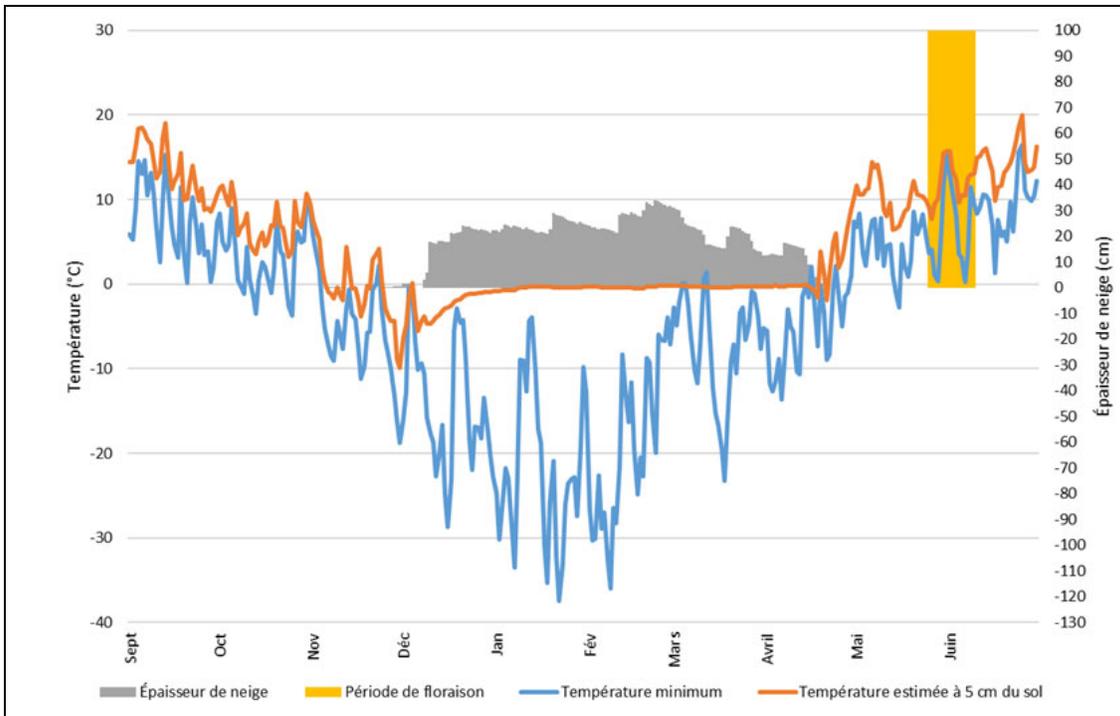


Figure 7. Portrait de l'hiver 2012-2013 au Saguenay-Lac-Saint-Jean.

Afin de prendre en compte l'évolution annuelle du rendement potentiel, le modèle a été divisé en une série de modèles. Le modèle commence à la date qui correspondrait à la récolte de l'année précédente avec comme seule variable NFR-BH (i-1) et se termine lorsque la maturité des fruits est atteinte avec les huit autres variables. Les variables s'ajoutent entre temps à différents moments de l'année (voir Tableau 7). Avec le logiciel statistique XLSTAT, des analyses de relation entre les rendements normalisés et les variables météo ont été effectuées pour chacun des modèles. Les modèles à partir du 1^{er} avril ont été testés avec un AIC d'Akaike ayant un minimum de variables entre 2 et 4 selon les modèles.

Tableau 7. Variables du modèle bioclimatique de rendement annuel potentiel de bleuets nains de l'année précédente (i-1) jusqu'à la récolte de l'année en cours (i).

	NFR-BH (i-1)	A-GN<10 (i-1)	XNEIG3 (i)	PAD-T2.5T (i)	PDF-T0 (i)	DFP-CT0 (i)	PFL-T2.5T (i)	FL-PPT (i)	NFR-BH (i)
1 ^{er} jour du stade « Fruit mature-récolte »	x								
Jour suivant stabilisation T. sol à 5 cm (5 jours consécutifs avec la même température)	x	x							
1 ^{er} avril	x	x	x						
1 ^{er} jour du stade « Gonflement des bourgeons »	x	x	x	x					
1 ^{er} jour du stade « Émergence des boutons floraux »	x	x	x	x	x				
1 ^{er} jour du stade « Nouaison »	x	x	x	x	x	x	x	x	
1 ^{er} jour du stade « Fruit mature-récolte »	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Réserve en eau du sol facilement utilisable (RFU) et coefficient cultural (K_c)

Pour évaluer l'impact d'un climat en évolution sur le bilan hydrique, il est essentiel d'avoir une valeur de RFU. Il s'agit de la hauteur d'eau, à la capacité au champ, qui est accessible à la culture, sans que cette dernière ne subisse un stress hydrique. Toutefois, les résultats de ce projet n'ont pas permis d'établir un lien entre une hauteur d'eau totale exportée du sol (évapotranspiration) et un stress hydrique mesurable sur la culture. Quoi qu'il en soit, il est certain que cette limite existe et elle est variable selon le site. En s'appuyant sur la nature des sols et la profondeur d'enracinement, deux valeurs de RFU ont été retenues, soient 20 et 40 mm. Ces dernières sont « réalistes » et pourront servir de repères pour une entreprise qui peut s'identifier à l'une ou l'autre de ces RFU, et ce, peu importe la région. Il faut aussi un coefficient cultural qui est représentatif du bleuet nain et à la suite des essais réalisés (Tableau 15 et Tableau 16), la valeur de 0,45 a été retenue.

Volet 3. Analyser la rentabilité de l'irrigation en climat actuel et futur

Ce volet est composé de trois grands éléments. Tout d'abord, les coûts associés à l'acquisition et à l'opération du système d'irrigation sont évalués. Deuxièmement, cette évaluation est utilisée pour estimer des seuils de rentabilité en fonction de certains scénarios de base (investissement, superficies, rendement de référence). Ils sont rapportés à la fois en chiffres absolus (kg/ha) et en chiffres relatifs (% du rendement de référence). Enfin, les coûts et les seuils de rentabilité sont mis en parallèle aux coûts de l'assurance-récolte qui s'offre aux producteurs de bleuets nains cultivés.

Coûts de possession et d'opération

Coûts de possession

Les coûts de possession représentent les coûts fixes associés à la possession, soit l'amortissement, les frais d'intérêt, le remisage et les coûts d'assurance. Ces coûts ne varient pas en fonction du degré d'usage du système (ex. : heures d'irrigation). Concernant l'amortissement, celui-ci est calculé en tenant compte du coût d'acquisition (CA), de la durée de vie utile (DVU = 15 ans) du bien et de sa valeur résiduelle (VR = 5 %) (CECPA, 2016), et ce, par l'équation 2.

$$\frac{CA-VR}{DVU} \quad (2)$$

Les frais d'intérêt (équation 3) sont calculés sur la base de la valeur moyenne du bien $[(CA - VR)/2]$ et du taux de prêt des banques commerciales aux entreprises¹. Dans le contexte où les taux d'intérêt des années récentes ont été très bas et que ceux-ci sont maintenant appelés à augmenter dans les mois et les années à venir, les taux de décembre 2018 ont été utilisés (3,95 %) plutôt qu'une moyenne des années récentes.

$$\text{Valeur moyenne} \times \text{taux d'intérêt} = \left[\frac{CA-VR}{2} \right] \times 0,0395 \quad (3)$$

Les frais de remisage peuvent varier considérablement d'une entreprise à l'autre, mais ils demeureront toujours une faible fraction des coûts de possession dans l'ensemble. Edwards (2015) propose d'y attribuer un taux de 0,50 % de la valeur moyenne du bien. Enfin, les coûts d'assurance sont aussi calculés en multipliant un taux donné par la valeur moyenne du bien et le taux utilisé est de 0,38 % (CRAAQ, 2015).

Coûts d'opération

¹ https://www.banqueducanada.ca/wp-content/uploads/2010/09/selected_historical_v122495.pdf.

Les coûts d'opération (CO) représentent les coûts variables qui fluctuent en fonction de l'usage du système. Concernant l'irrigation, les CO incluent principalement, l'entretien et la réparation (équipement et machinerie), la main-d'œuvre et les coûts d'énergie. De plus, selon les situations, ils peuvent inclure des coûts d'usage de l'eau, en fonction de la source d'approvisionnement (i.e. droits sur le volume d'eau pompé). Dans la présente analyse, les CO ne sont pas évalués empiriquement à partir des données des entreprises québécoises, mais plutôt sur la base des évaluations de Dalton et coll. (2002) faites dans le contexte de la production de bleuets nains dans l'état du Maine. Ainsi, pour différents systèmes d'irrigation, les coûts d'opération varieront dans des proportions 40-60 à 60-40 des coûts totaux (i.e. CP + CO). Par conséquent, dans cette analyse, les CO sont établis à 50 % des coûts totaux, soit l'équivalent des CP.

Seuil de rentabilité

La deuxième composante de l'analyse est le seuil de rentabilité (SR) des systèmes d'irrigation. Les seuils de rentabilité procurent une information économique cruciale, en ce sens qu'ils permettent au producteur et à son conseiller d'estimer la probabilité de succès de l'investissement en fonction de différents paramètres. Ainsi, le SR donne un gain de rendement annuel à atteindre attribuable au système d'irrigation. L'équation 4 présente le calcul du seuil de rentabilité.

$$SR = \frac{\text{Coûts totaux } (\$/\text{ha})}{\text{Prix du bleuet } (\$/\text{kg})} = \frac{[CP (\$/\text{ha}) + CO (\$/\text{ha})]}{\text{Prix du bleuet } (\$/\text{kg})} \quad (4)$$

On voit de cette équation que le seuil de rentabilité varie directement en fonction du prix du bleuet. Ainsi, selon les perspectives de prix pour les producteurs, le seuil de rentabilité propre à chaque entreprise variera.

Assurance-récolte

Le programme d'assurance-récolte offert aux producteurs de bleuets nains cultivés offre un produit d'assurance individuelle. Ce type de produit, en plus de proposer différents niveaux de couverture de la valeur assurable, se fonde sur les rendements obtenus individuellement par l'entreprise. Dans ce contexte, la décision d'investir ou non dans un système d'irrigation par le producteur se prendra en parallèle de la couverture d'assurance-récolte qu'il peut obtenir et de son coût. Dans la section des résultats, les coûts d'irrigation et les seuils de rentabilité sont mis en parallèle aux coûts et aux bénéfices potentiels de l'assurance-récolte.

Systèmes d'irrigation retenus

Pour la suite de l'analyse, deux systèmes d'irrigation (neuf, taxes non incluses) ont été retenus et la superficie considérée a été fixée à 20 ha. Le premier système répond à l'objectif de protection contre le gel, soit un système qui doit fonctionner simultanément sur l'ensemble de la superficie à protéger. Ce système peut aussi être utilisé contre le stress hydrique. Ce premier

système alimente 600 gicleurs avec une pompe à essence de 225 HP via des tuyaux enfouis en polyéthylène haute densité connue sous l'acronyme anglais HDPE. Ainsi, le réseau souterrain ne gêne pas les opérations culturales telles que l'application de pesticides ou de récolte, comparativement à un système avec des tuyaux d'aluminium qui doit être déplacé. Le coût de ce système, installation non incluse, est évalué à 236 710 \$.

Le second système est un canon enrouleur alimenté avec une pompe de type PTO. Ce type de pompe est activée par la prise de force du tracteur. Ce système peut couvrir 20 ha, mais seulement contre le stress hydrique. Le coût de ce système est évalué à 84 010 \$.

5. Résultats

Volet 1. Développer des connaissances et des outils pour raisonner l'irrigation en fonction du stress hydrique et du risque de gel des fleurs

Conditions météorologiques

La pluviométrie totale, l'ET_p totale et moyenne (moment présent, formule standardisée courte de Penman-Montheith) sur une base quotidienne sont présentées selon l'année et une période précise, au Tableau 8 (Saint-David-de-Falardeau) et au Tableau 9 (Ascension-de-Notre-Seigneur). Il est à noter que la période de 2018 se termine plus tôt que les autres. Une période plus courte et l'absence de journées où l'ET_p est généralement plus basse à ce moment de l'année, a un impact à la hausse sur la valeur d'ET_p quotidienne. Les valeurs quotidiennes sont présentées en annexe sous forme de graphiques à partir de la Figure 73 jusqu'à la Figure 87.

Tableau 8. Pluviométrie et ET_p (mm) mesurées selon l'année et la période – Saint-David-de-Falardeau.

Année	Période	Nombre de jours	Pluviométrie totale (mm)	ET _p (mm)	
				Totale	Moyenne quotidienne
2015	5 juin au 18 sept.	106	552	286	2,7
2016	5 juin au 18 sept.	106	514	327	3,1
2017	5 juin au 18 sept.	106	369	341	3,5
2018	5 juin au 21 août	78	292	294	3,8

Tableau 9. Pluviométrie et ET_p (mm) mesurées selon l'année et la période – Ascension-de-Notre-Seigneur.

Année	Période	Nombre de jours	Pluviométrie (mm)	ET _p (mm)	
				Totale	Moyenne quotidienne
2015	5 juin au 18 sept.	106	n.d.	341	3,2
2016	5 juin au 18 sept.	106	452	348	3,3
2017	5 juin au 18 sept.	106	285	351	3,3
2018	5 juin au 8 août	65	258	274	4,2

Nombre d'épisodes d'irrigation

Le nombre d'épisodes d'irrigation contre le stress hydrique et contre le gel des fleurs a été comptabilisé pour chacun des sites selon le numéro de traitement, le numéro de champ et l'année. Ces informations sont présentées au Tableau 10 et au Tableau 11, respectivement pour le site Saint-David-de-Falardeau et Ascension-de-Notre-Seigneur. Pour chacun des épisodes d'irrigation, la date où il a eu lieu est présentée au Tableau 12 et au Tableau 13, respectivement pour le site Saint-David-de-Falardeau et Ascension-de-Notre-Seigneur.

Tableau 10. Nombre d'épisodes d'irrigation (contre le stress hydrique et contre le gel des fleurs) selon le traitement, le champ et l'année – Saint-David-de-Falardeau.

N° traitement	Consigne	Saison végétation			Saison production								
		Irrigation lorsque la consigne est atteinte			Irrigation contre le gel des fleurs			Irrigation lorsque la consigne est atteinte					
		Champ 1 - Cycle production 1	Champ 2 - Cycle production 1	Champ 1 - Cycle production 2	Champ 1 - Cycle production 1	Champ 2 - Cycle production 1	Champ 1 - Cycle production 2	Champ 1 - Cycle production 1	Champ 2 - Cycle production 1	Champ 1 - Cycle production 2			
		2015 nb. mm	2016 nb. mm	2017 nb. mm	2016 nb.	2017 nb.	2018 nb.	2016 nb. mm	2017 nb. mm	2018 nb. mm			
1	T	Aucune irrigation possible			0	2	3	Aucune irrigation possible					
2	A							5	65	5	70	4	52
3	B							2	46	2	42	1	23
4	C							1	29	1	31	1	29
5	T	Aucune irrigation possible			Aucune irrigation possible	Aucune irrigation possible	Aucune irrigation possible						
6	A	1	13	4			56	4	52				
7	B	0	0	2			42	2	46				
8	C	0	0	1			31	1	29				
9	T	Aucune irrigation possible			Aucune irrigation possible	Aucune irrigation possible	Aucune irrigation possible						
10	A						5	65	5	70	4	52	
11	B						2	46	2	42	1	23	
12	C						1	29	1	31	1	29	
13	T	Aucune irrigation possible			Aucune irrigation possible	Aucune irrigation possible	Aucune irrigation possible						
14	A	1	13	4			56	4	52				
15	B	0	0	2			42	2	46				
16	C	0	0	1			31	1	29				

Tableau 11. Nombre d'épisodes d'irrigation (contre le stress hydrique et contre le gel des fleurs) selon le traitement, le champ et l'année – Ascension-de-Notre-Seigneur.

N° traitement	Consigne	Saison végétation			Saison production											
		Irrigation lorsque la consigne est atteinte			Irrigation contre le gel des fleurs			Irrigation lorsque la consigne est atteinte								
		Champ 1 - Cycle production 1	Champ 2 - Cycle production 1	Champ 1 - Cycle production 2	Champ 1 - Cycle production 1	Champ 2 - Cycle production 1	Champ 1 - Cycle production 2	Champ 1 - Cycle production 1	Champ 2 - Cycle production 1	Champ 1 - Cycle production 2						
		2015 nb. mm	2016 nb. mm	2017 nb. mm	2016 nb.	2017 nb.	2018 nb.	2016 nb. mm	2017 nb. mm	2018 nb. mm						
1	T	Aucune irrigation possible			0	3	4	Aucune irrigation possible								
2	A							6	84	4	56	3,5	49			
3	B							2	40	3	60	1	20			
4	C							1	27	1	27	1	27			
5	T	Aucune irrigation possible			0	3	4	Aucune irrigation possible								
6	A	1	14	6				84	4	56	6	84	4	56	3,5	49
7	B	0	0	2				40	2	40	2	40	3	60	1	20
8	C	0	0	1				27	0	0	1	27	1	27	1	27
9	T	Aucune irrigation possible			0	3	4	Aucune irrigation possible								
10	A							6	84	4	56	3,5	49			
11	B							2	40	3	60	1	20			
12	C							1	27	1	27	1	27			
13	T	Aucune irrigation possible			0	3	4	Aucune irrigation possible								
14	A	1	14	6				84	4	56	6	84	4	56	3,5	49
15	B	0	0	2				40	2	40	2	40	3	60	1	20
16	C	0	0	1				27	0	0	1	27	1	27	1	27

Tableau 12. Date des irrigations pour chacun des traitements selon l'année, le champ et le cycle (végétation et production) à ce moment - Saint-David-de-Falardeau.

Année	N° traitement			2	3	4	6	7	8	10	11	12	14	15	16
	Consigne			A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
	Mois	Cycle	Champ	Date											
2015	Juin	Végétation	C1	Aucune irrigation possible			-	-	-	Aucune irrigation possible			-	-	-
	Juillet	Végétation	C1	Aucune irrigation possible			-	-	-	Aucune irrigation possible			-	-	-
	Août	Végétation	C1	Aucune irrigation possible			18	-	-	Aucune irrigation possible			18	-	-
2016	Juin	Végétation	C2	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Production	C1	19 et 23	-	-	19 et 23	-	-	19 et 23	-	-	19 et 23	-	-
	Juillet	Végétation	C2	Aucune irrigation possible			-	-	-	Aucune irrigation possible			-	-	-
		Production	C1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Août	Végétation	C2	Aucune irrigation possible			2, 9, 13 et 21	9 et 15	11	Aucune irrigation possible			2, 9, 13 et 21	9 et 15	11
Production		C1	3, 9 et 13	9 et 15	11	3, 9 et 13	9 et 15	11	3, 9 et 13	9 et 15	11	3, 9 et 13	9 et 15	11	
2017	Juin	Végétation	C1	Aucune irrigation possible			-	-	-	Aucune irrigation possible			-	-	-
		Production	C2	13	-	-	13	-	-	13	-	-	13	-	-
	Juillet	Végétation	C1	Aucune irrigation possible			14, 17 et 25	25	-	Aucune irrigation possible			14, 17 et 25	25	-
		Production	C2	14, 18 et 25	25	-	14, 18 et 25	25	-	14, 18 et 25	25	-	14, 18 et 25	25	-
	Août	Végétation	C1	Aucune irrigation possible			1	1	1	Aucune irrigation possible			1	1	1
Production		C2	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	3	
2018	Juin	Production	C1	27	-	-	27	-	-	27	-	-	27	-	-
	Juillet	Production	C1	1 et 5	1	1	1 et 5	1	1	1 et 5	1	1	1 et 5	1	1
	Août	Production	C1	14	-	-	14	-	-	14	-	-	14	-	-

Tableau 13. Date des irrigations pour chacun des traitements selon l'année, le champ et le cycle (végétation et production) à ce moment - Ascension-de-Notre-Seigneur.

		N° traitement			2			3			4			6			7			8			10			11			12			14			15			16		
		Consigne			A			B			C			A			B			C			A			B			C			A			B			C		
Année	Mois	Cycle	Champ	Date																																				
				2015	Juin	Végétation	C1	-			-			-			-			-			-			-			-			-			-			-		
Juillet	Végétation	C1	Aucune irrigation possible			-			-			-			Aucune irrigation possible			-			-			-			-			-			-							
Août	Végétation	C1	-			23			-			-			Aucune irrigation possible			23			-			-			-			-			-							
2016	Juin	Végétation	C2	-			17 et 23			-			-			-			-			17 et 23			-			-			-									
		Production	C1	17 et 23	-	-	17 et 23	-	-	17 et 23	-	-	17 et 23	-	-	17 et 23	-	-	17 et 23	-	-	17 et 23	-	-	17 et 23	-	-	17 et 23	-	-	17 et 23	-	-							
	Juillet	Végétation	C2	Aucune irrigation possible			-			-			-			Aucune irrigation possible			-			-			-			-			-			-						
		Production	C1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
Août	Végétation	C2	Aucune irrigation possible			3, 8, 12 et 16			9 et 13			10			Aucune irrigation possible			3, 8, 12 et 16			9 et 13			10			3, 8, 12 et 16			9 et 13			10							
	Production	C1	3, 8, 12 et 16	9 et 13	16	3, 8, 12 et 16	9 et 13	16	3, 8, 12 et 16	9 et 13	16	3, 8, 12 et 16	9 et 13	16	3, 8, 12 et 16	9 et 13	16	3, 8, 12 et 16	9 et 13	16	3, 8, 12 et 16	9 et 13	16	3, 8, 12 et 16	9 et 13	16	3, 8, 12 et 16	9 et 13	16	3, 8, 12 et 16	9 et 13	16								
2017	Juin	Végétation	C1	Aucune irrigation possible			-			-			-			Aucune irrigation possible			-			-			-			-			-			-						
		Production	C2	14	15	-	14	15	-	14	15	-	14	15	-	14	15	-	14	15	-	14	15	-	14	15	-	14	15	-	14	15	-							
	Juillet	Végétation	C1	Aucune irrigation possible			18, 24, 26 et 31			24 et 26			-			Aucune irrigation possible			18, 24, 26 et 31			24 et 26			-			18, 24, 26 et 31			24 et 26			-						
		Production	C2	18, 26 et 31	19 et 31	24	18, 26 et 31	19 et 31	24	18, 26 et 31	19 et 31	24	18, 26 et 31	19 et 31	24	18, 26 et 31	19 et 31	24	18, 26 et 31	19 et 31	24	18, 26 et 31	19 et 31	24	18, 26 et 31	19 et 31	24	18, 26 et 31	19 et 31	24	18, 26 et 31	19 et 31	24							
Août	Végétation	C1	Aucune irrigation possible			-			-			-			Aucune irrigation possible			-			-			-			-			-			-			-				
	Production	C2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
2018	Juin	Production	C1	26	-	-	26	-	-	26	-	-	26	-	-	26	-	-	26	-	-	26	-	-	26	-	-	26	-	-	26	-	-							
	Juillet	Production	C1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2							
	Août	Production	C1	1 et 14	-	-	1 et 14	-	-	1 et 14	-	-	1 et 14	-	-	1 et 14	-	-	1 et 14	-	-	1 et 14	-	-	1 et 14	-	-	1 et 14	-	-	1 et 14	-	-							

Irrigation contre le gel des fleurs

La décision de déclencher le système d'irrigation pour protéger les fleurs du gel s'appuie sur des mesures de température de l'air au niveau du couvert végétal. À un même moment, la température de l'air au niveau du couvert végétal est généralement plus basse la nuit, que celle de l'air ambiant. Cette observation est présentée à la Figure 8 pour la période comprise entre minuit et 8 h le 10 juin 2017. Comme précédemment mentionnée dans la section ayant trait à la méthodologie, la sonde de température au niveau du couvert végétal n'est pas protégée du soleil, ce qui explique la hausse marquée à partir du moment où le soleil se lève.

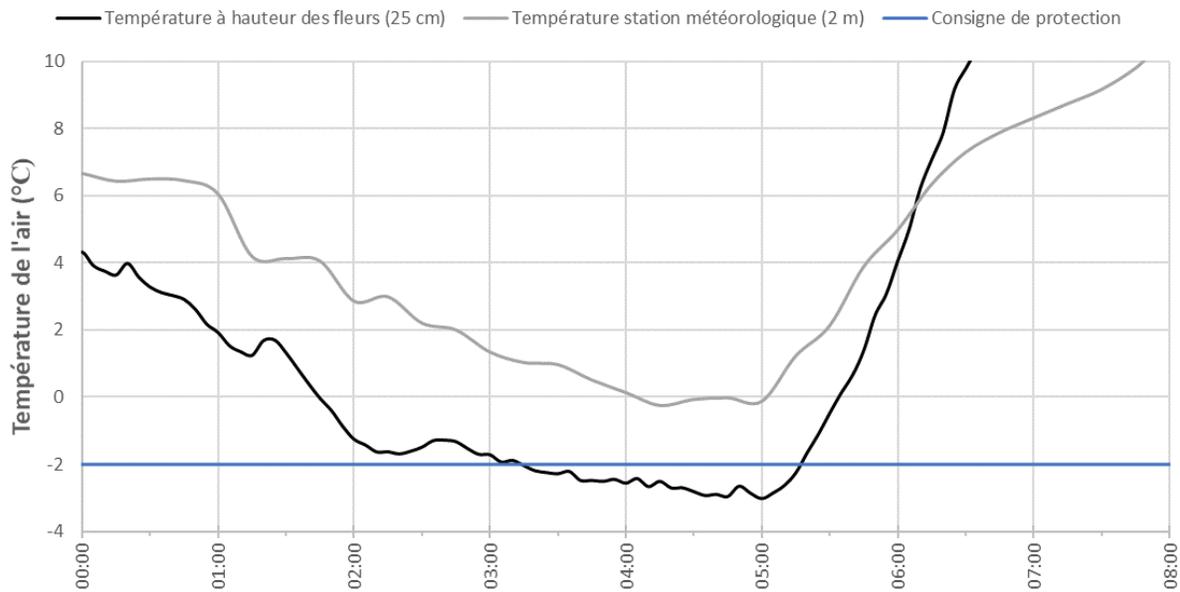


Figure 8. Température de l'air au niveau du couvert végétal et celle de l'air ambiant au même moment – Champ 2 - Ascension-de-Notre-Seigneur, 10 juin 2017.

Pour chacun des épisodes d'irrigation pour protéger les fleurs du gel, la température minimale de l'air qui a été mesurée au niveau du couvert végétal dans les zones non protégées et celle de l'air ambiant au même moment à la station météorologique est présentée selon le site au Tableau 14.

Tableau 14. Température minimale de l'air (°C) mesurée au niveau du couvert végétal dans les zones du champ non protégées lors des épisodes d'irrigation pour protéger les fleurs du gel et température de l'air ambiant mesuré par la station météorologique au même moment selon l'année, la date et le site.

Année	Date	Saint-David-de-Falardeau			Ascension-de-Notre-Seigneur		
		Heure	Air - Couvert végétal (°C)	Air - Station météorologique (°C)	Heure	Air - Couvert végétal (°C)	Air - Station météorologique (°C)
2017	06-juin	-	-	-	04:45	-0,2	5,6
	10-juin	05:00	-0,9	1,9	05:00	-3,0	-0,2
	14-juin	23:35	-0,4	5,2	22:35	0,2	7,5
2018	03-juin	-	-	-	02:10	-0,6	6,5
	04-juin	00:45	1,1	6,3	05:00	4,3	10,2
	06-juin	04:00	-0,4	3,8	04:50	-1,7	1,3
	11-juin	05:15	-2,8	1,1	01:40	-1,2	1,9

L'impact d'un épisode d'irrigation (protection contre le gel des fleurs) sur la température de l'air au niveau du couvert végétal est présenté à la Figure 9 et elle est comparée à la température de l'air au niveau du couvert végétal dans une zone non protégée, au même moment.

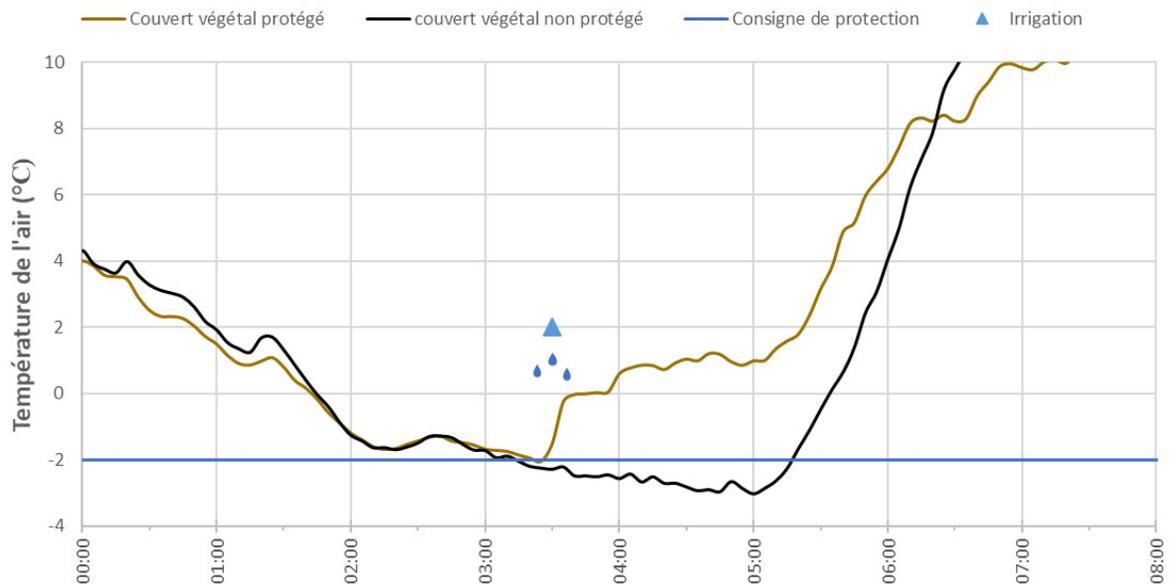


Figure 9. Effet de l'irrigation sur la température de l'air au niveau du couvert végétal – Champ 2 - Ascension-de-Notre-Seigneur, 10 juin 2017.

Prélèvement en eau de la culture

Période d'activité de la culture durant une journée

La période de prélèvement de l'eau par la culture est généralement en phase avec la période de transpiration de la plante (corresponds à la période où l'eau s'échappe de la feuille par les stomates). Ce processus est directement relié à la demande en ET_p et à l'activité photosynthétique de la feuille. Le suivi du statut hydrique du sol à l'aide des TDR permet de cibler la période où le plant prélève de l'eau. Un exemple de période de prélèvement est présenté à la Figure 10 pour le 22 juin en année de production au site Saint-David-de-Falardeau. La période de prélèvement en eau de la culture, ayant un impact mesurable sur la diminution de la teneur en eau du sol, a débuté un peu avant 9 h et s'est terminée vers 20 h, et ce, pour plusieurs parcelles suivies.

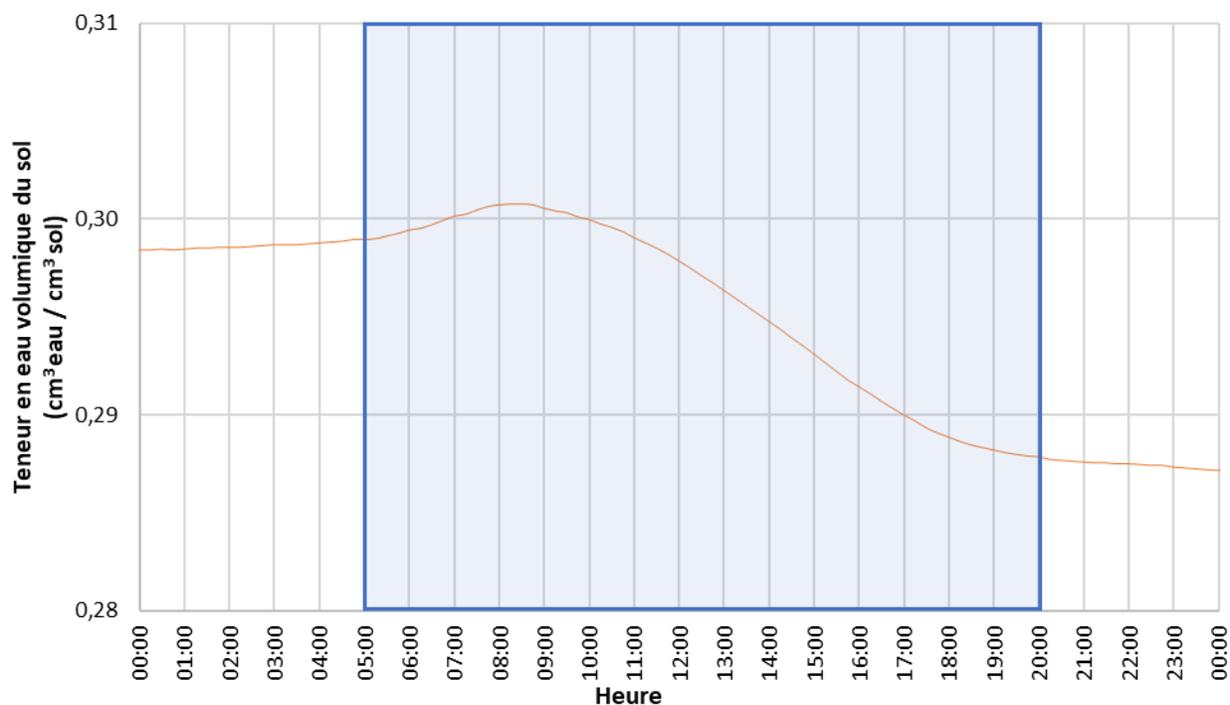


Figure 10. Variation de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau/ cm^3 de sol) durant 24 heures le 22 juin 2018 – Champ 1 – Production, Saint-David-de-Falardeau.

Période prolongée sans précipitations

Saint-David-de-Falardeau

En 2018, la plus longue période sans précipitations au site de Saint-David-de-Falardeau a eu lieu du 19 juin au 1^{er} juillet (Figure 11). Pour la même période, la variation de la teneur en eau du sol mesurée avec une sonde TDR présente un assèchement du sol qui est soutenu. L'impact des précipitations sur l'augmentation de la teneur en eau du sol est aussi présenté et particulièrement flagrant pour le 25 juillet, où l'apport a été suffisant pour rétablir la réserve en eau du sol.

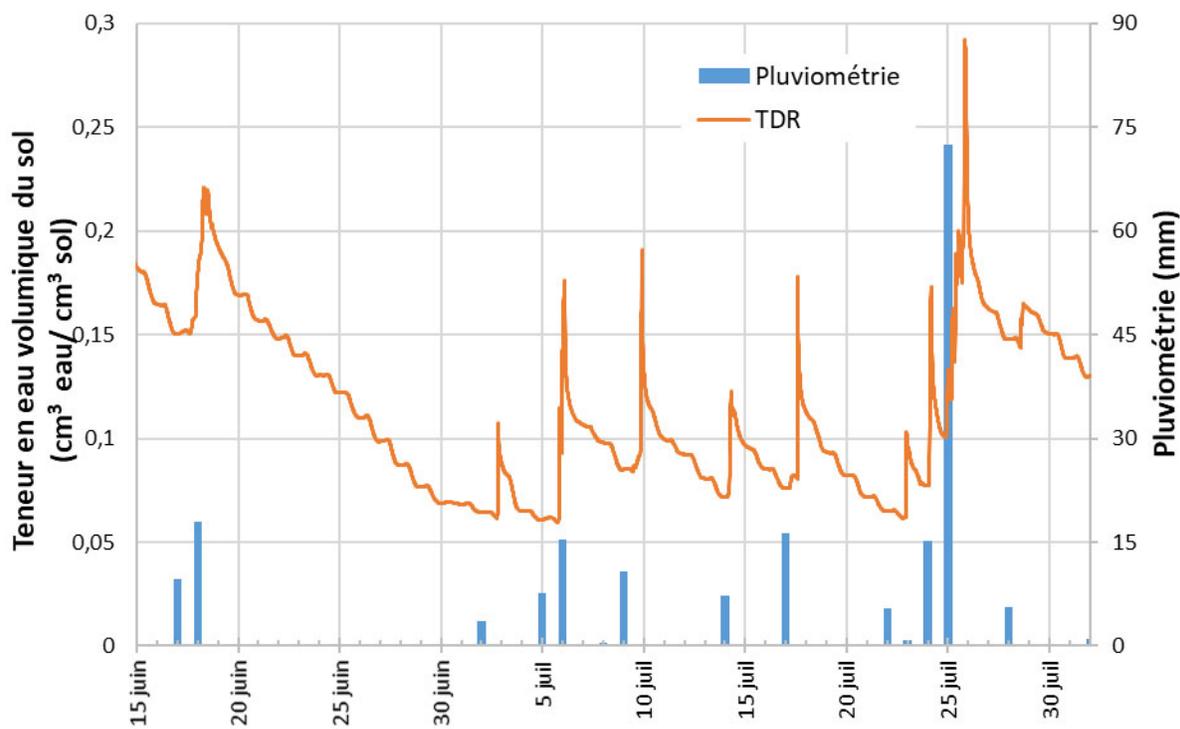


Figure 11. La plus longue période sans précipitations en 2018 (19 juin au 1^{er} juillet) et variations de la teneur en eau du sol, mesurées avec une sonde TDR, pour un témoin non irrigué - Champ 1 – Saison de production n° 2 (2018) – Saint-David-de-Falardeau.

La Figure 12 présente l'évapotranspiration potentielle (ET_p) mesurée quotidiennement au site de Saint-David-de-Falardeau pour la période précédemment identifiée comme la plus longue, en 2018, où aucune précipitation n'a été enregistrée. Quotidiennement, la valeur d' ET_p est comparée au prélèvement en eau de la culture qui a été estimé avec une sonde TDR. Cet exercice est utile pour repérer si la culture a été contrainte dans son prélèvement en eau. Habituellement, lorsque l' ET_p augmente, le prélèvement en eau de la culture augmente et quand l' ET_p diminue, le prélèvement diminue aussi. Lorsque l' ET_p , à l'échelle d'une journée, augmente et que le prélèvement n'augmente pas, il est alors probable que la plante a été contrainte dans le volume d'eau qu'elle pouvait prélever. Par conséquent, le statut hydrique du sol est favorable à ce que la culture subisse un stress hydrique. La période considérée (19 juin au 1^{er} juillet) est la plus longue sans précipitations en 2018 et même après 13 jours sans apport d'eau au sol, la culture ne semble pas subir de stress hydrique. Le prélèvement quotidien moyen de la culture pour cette période est estimé à près de 2,1 mm.

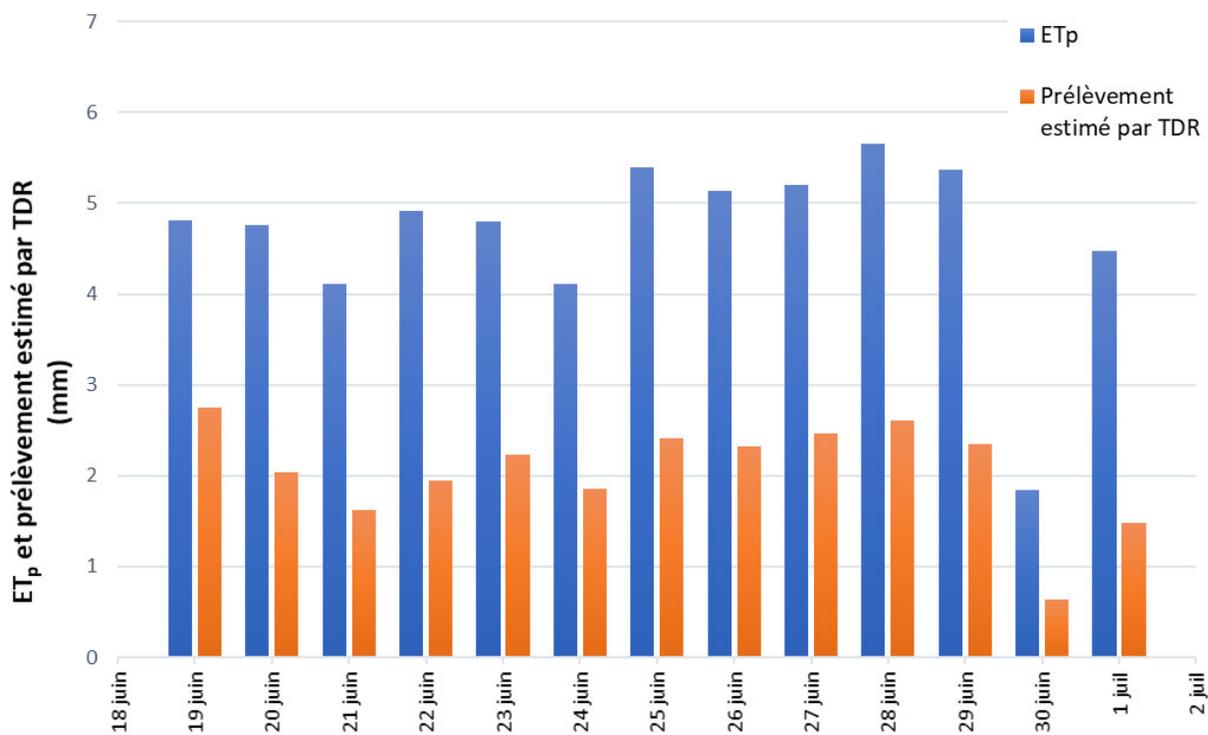


Figure 12. Évapotranspiration potentielle et prélèvement en eau quotidiennement de la culture estimée avec une TDR du 19 juin au 1 juillet - Champ 1 – Saison de production n° 2 (2018) – Saint-David-de-Falardeau.

La Figure 13 présente l'évapotranspiration potentielle (ET_p) mesurée quotidiennement au site Ascension-de-Notre-Seigneur pour la période précédemment identifiée comme la plus longue en 2018, où aucune précipitation n'a été enregistrée. Quotidiennement, la valeur d' ET_p est comparée au prélèvement en eau de la culture qui a été estimé avec une sonde TDR (Figure 14). Cet exercice est utile pour repérer si la culture a été contrainte dans son prélèvement en eau. Habituellement, lorsque l' ET_p augmente, le prélèvement en eau de la culture augmente et quand l' ET_p diminue, le prélèvement diminue aussi. Lorsque l' ET_p , à l'échelle d'une journée, augmente et que le prélèvement n'augmente pas, il est alors probable que la plante a été contrainte dans le volume d'eau qu'elle pouvait prélever. Par conséquent, le statut hydrique du sol est favorable à ce que la culture subisse un stress hydrique. La période considérée (19 juin au 1^{er} juillet) est la plus longue sans précipitations en 2018 et même après 13 jours sans apport d'eau au sol, la culture ne semble pas subir de stress hydrique. Le prélèvement quotidien moyen de la culture pour cette période est estimé près de 1,1 mm

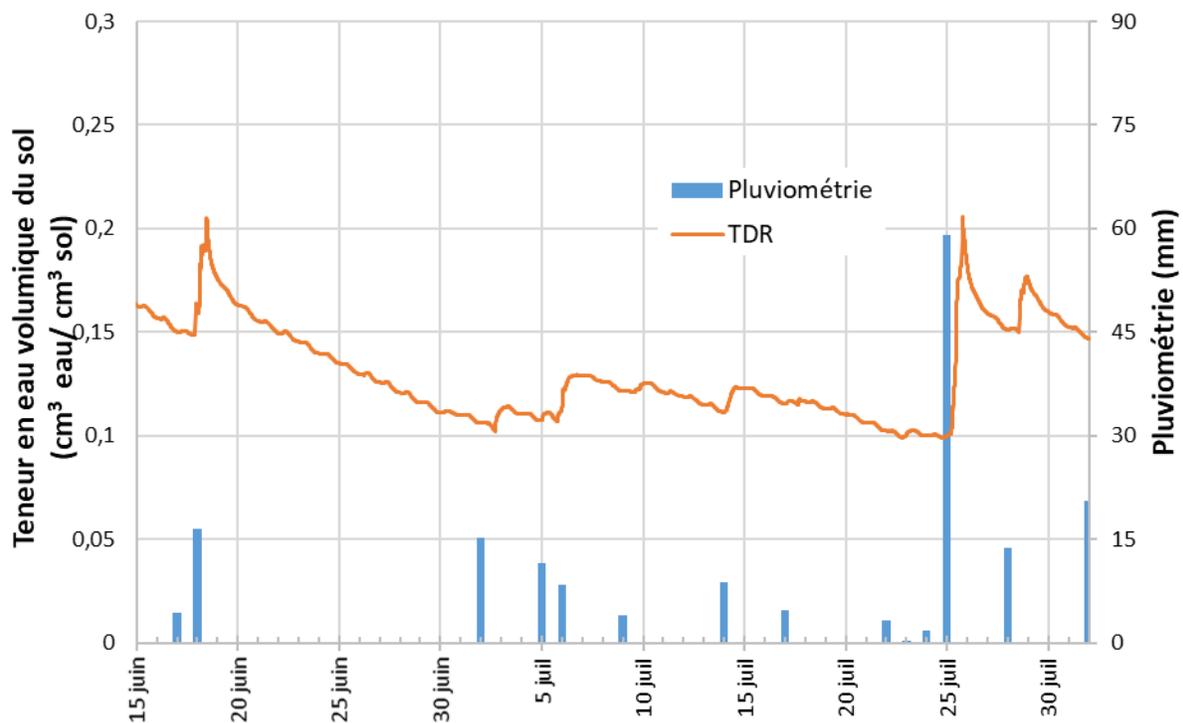


Figure 13. La plus longue période sans précipitations en 2018 (19 juin au 1^{er} juillet) et variations de la teneur en eau du sol, mesurées avec une sonde TDR, pour un témoin non irrigué - Champ 1 – Saison de production n° 2 (2018) – Ascension-de-Notre-Seigneur.

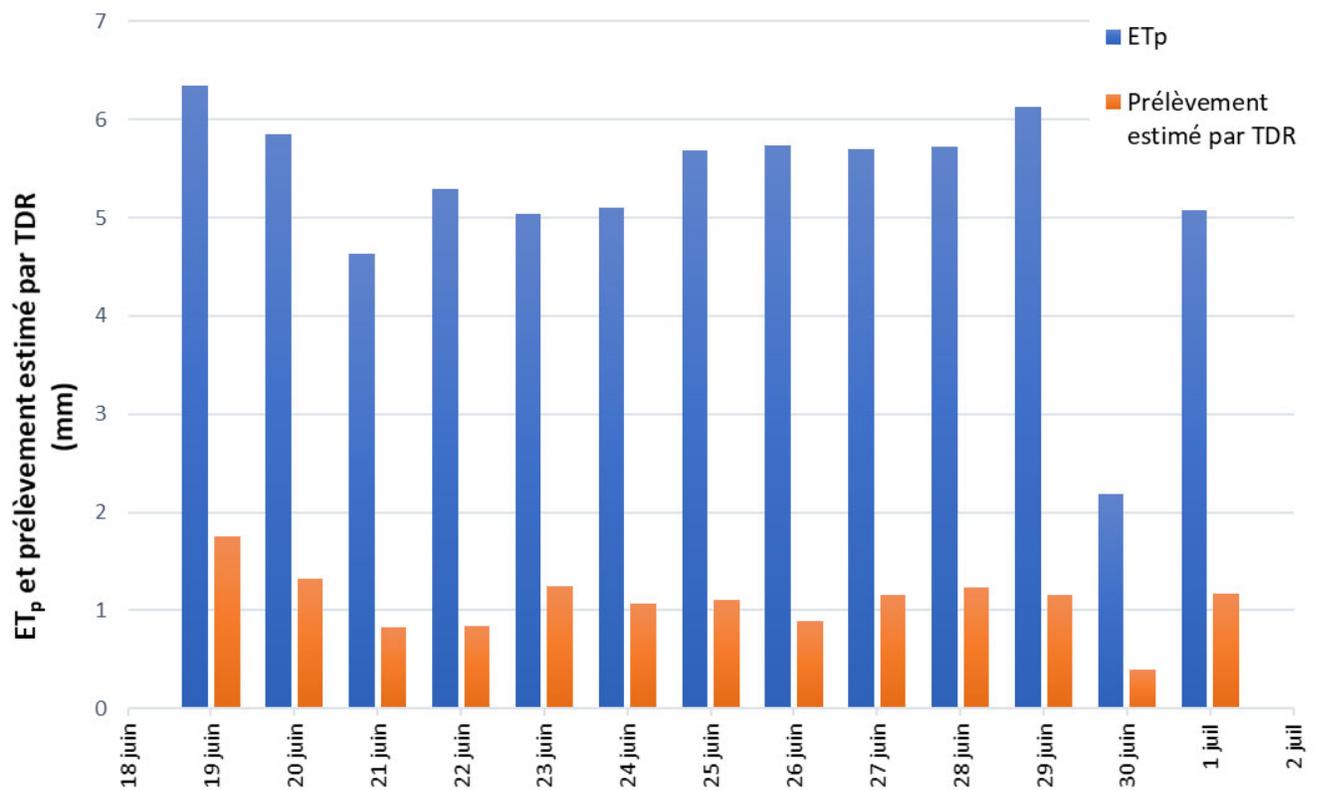


Figure 14. Évapotranspiration potentielle et prélèvement en eau quotidiennement de la culture estimée avec une TDR du 19 juin au 1 juillet - Champ 1 – Saison de production n° 2 (2018) – Ascension-de-Notre-Seigneur.

Coefficient cultural et besoin en eau

Annuellement et pour chacun des champs, les valeurs quotidiennes d'évapotranspiration de la culture (ET_{c-TDR}) ont été mises en relation avec l' ET_p (tel que décrit dans la section ayant trait à la méthodologie). Le rapport entre ces deux variables a été utilisé pour estimer un coefficient cultural (K_c). Ces coefficients sont présentés selon l'année et la période de celle-ci et le stade du champ, respectivement au Tableau 15 et Tableau 16, respectivement pour le site Saint-David-de-Falardeau et Ascension-de-Notre-Seigneur.

Tableau 15. Valeurs moyennes du coefficient cultural (K_c) mesurées selon l'année et la période de celle-ci et le stade (Végétation ou Production) – Saint-David-de-Falardeau.

Période	Année					
	2015	2016		2017		2018
	Végétation	Végétation	Production	Végétation	Production	Production
4 juin au 24 août	0,61	0,50	0,48	0,38	0,52	0,39
25 août au 16 septembre	0,55	0,43	-	0,37	-	-
16 septembre au 15 octobre	0,50	0,39	-	n.d.	-	-

Tableau 16. Valeurs moyennes du coefficient cultural (K_c) mesurées selon l'année et la période de celle-ci et le stade (végétation ou production) – Ascension-de-Notre-Seigneur.

Période	Année					
	2015	2016		2017		2018
	Végétation	Végétation	Production	Végétation	Production	Production
4 juin au 24 août	0,42	0,47	0,35	0,20*	0,47	0,20*
25 août au 16 septembre	0,51	0,50	-	0,30	-	-
16 septembre au 15 octobre	0,36	0,34	-	n.d.	-	-

* La valeur de K_c obtenue pour le site Ascension-de-Notre-Seigneur en production en 2018 (0,20) semble anormalement basse, mais elle va de pair avec le K_c mesuré la saison précédente (végétation).

Le K_c moyen obtenu pour un champ donné, à chacune des saisons de production, a été mis en relation avec son vis-à-vis obtenu en saison de végétation mesuré l'année précédente (4 juin au 24 août). La relation obtenue est présentée à la Figure 15. Par exemple, le K_c obtenu pour le site Saint-David-de-Falardeau pour le champ en production en 2017 (0,47), a été mis en relation avec le K_c obtenu dans le même champ, mais à la saison de végétation 2016 (0,47). Le coefficient de régression obtenu (R^2 0,8177), qui peut aussi être exprimé en pourcentage en y extrayant la racine carrée, est assez élevé. Plus ce dernier est élevé, plus il peut expliquer la variation d'un second facteur. Donc, plus le K_c obtenu en saison de végétation est élevé, plus il est probable que le K_c qui sera obtenu en saison de production soit élevé et inversement.

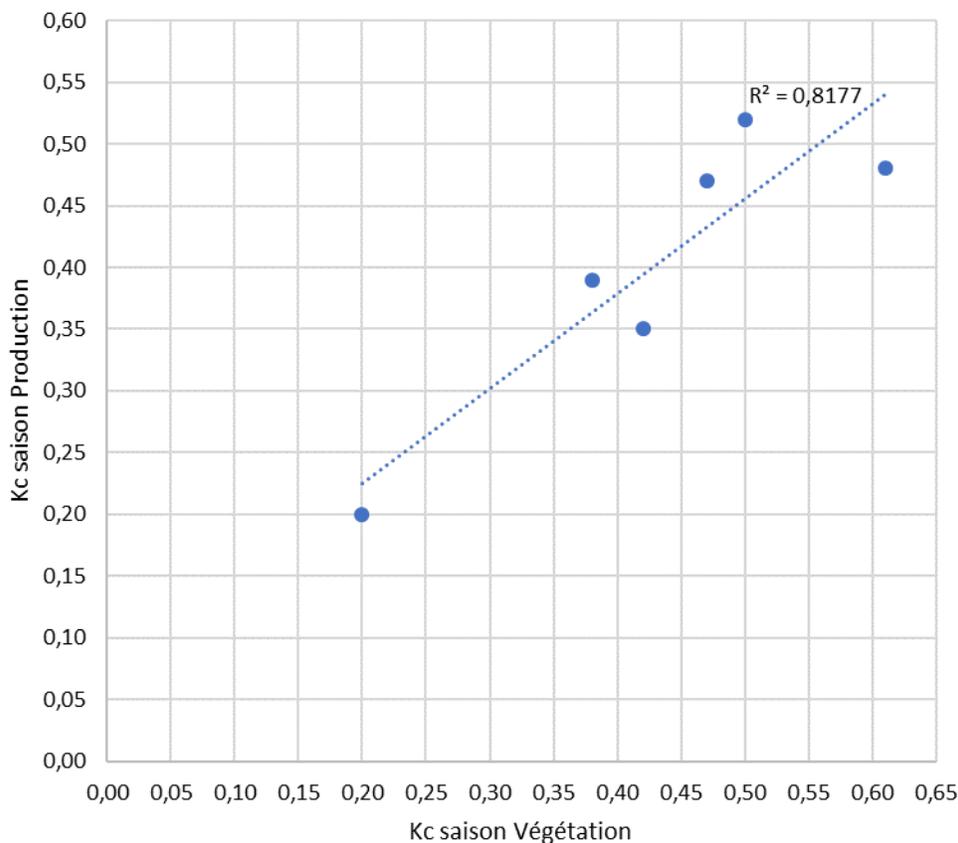


Figure 15. Relation entre le K_c moyen obtenu en saison de végétation et le K_c moyen obtenu en saison de production, pour un champ donné.

La variation quotidienne de la teneur en eau volumique du sol ($ET_c\text{-TDR}$), pour les champs en année de végétation, a été rapportée en mm et est présentée à la Figure 16 et à la Figure 17 pour le champ 1 en 2015, respectivement pour le site Saint-David-de-Falardeau (SDDF) et Ascension-de-Notre-Seigneur (ADNS), à la Figure 18 et à la Figure 19 pour le champ 2 en 2016, respectivement pour SDDF et ADNS et à la Figure 20 et Figure 21 pour le champ 1 en 2017, respectivement pour le site SDDF et ADNS.

Les valeurs sont généralement plus élevées dans la première moitié de la saison. Hormis pour 2017, les valeurs maximales observées se situent entre 2,4 et 2,8 mm. Pour 2017, les valeurs maximales sont de 1,5 et 2 mm, respectivement pour ADNS et SDDF.

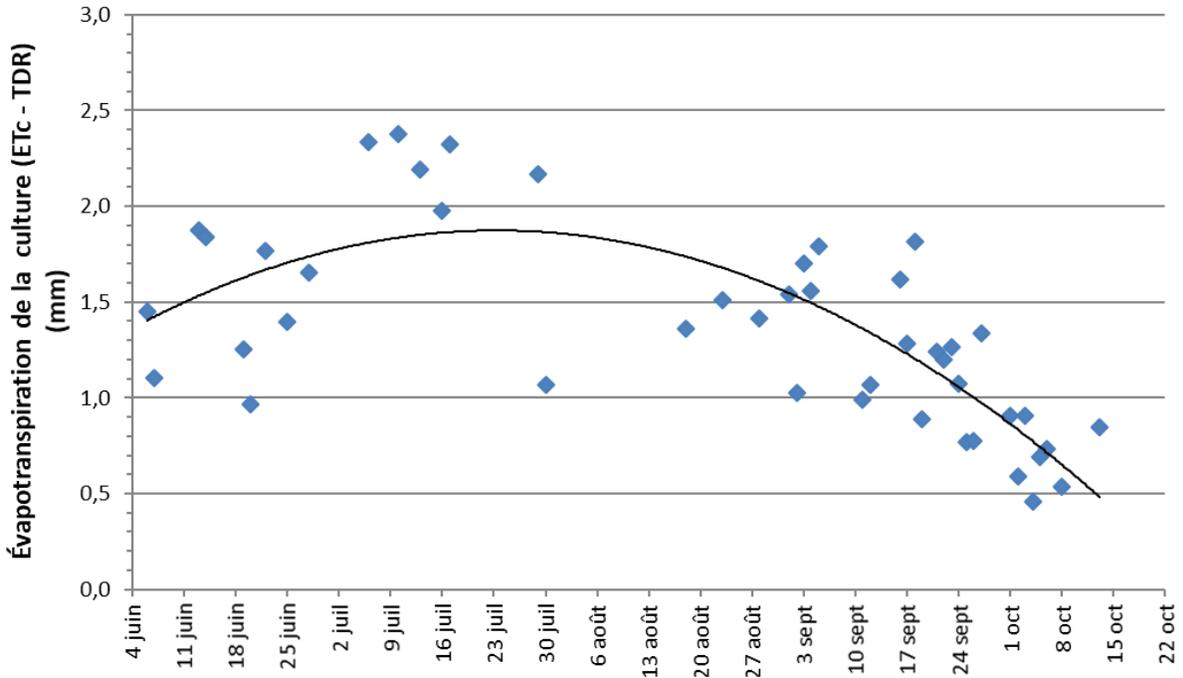


Figure 16. Évapotranspiration de la culture (ET_{c-TDR}) quotidienne (mm) - Champ 1 - Saison de végétation n° 1 (2015) - Saint-David-de-Falardeau.

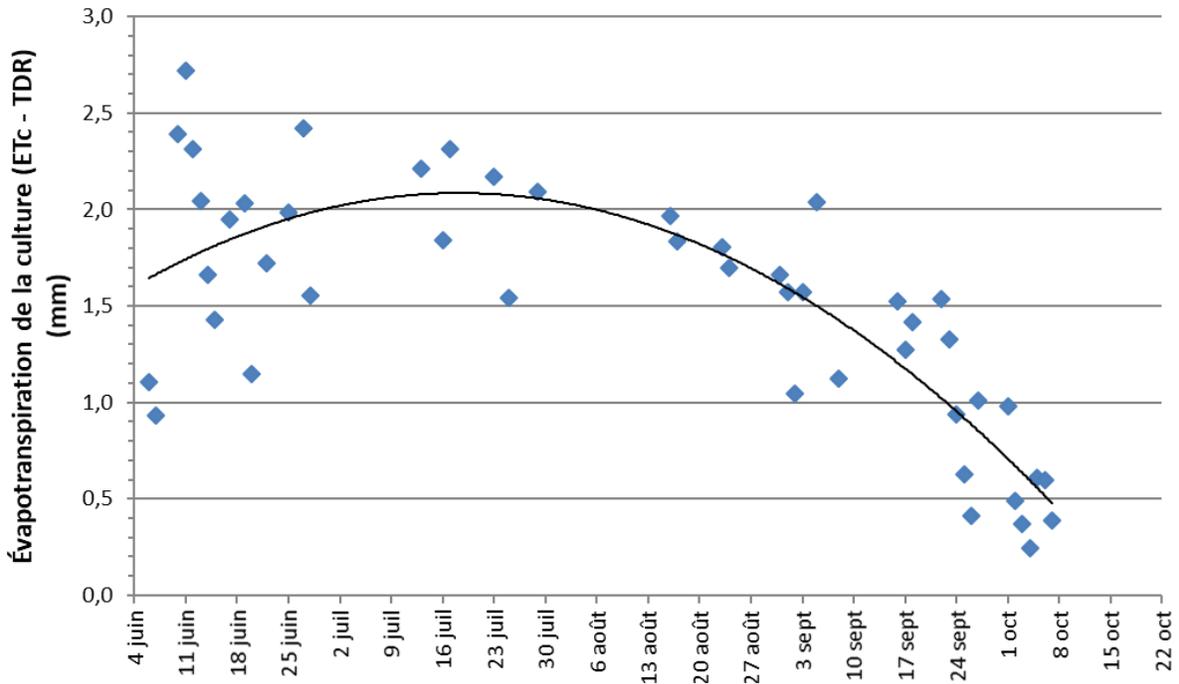


Figure 17. Évapotranspiration de la culture (ET_{c-TDR}) quotidienne (mm) - Champ 1 - Saison de végétation n° 1 (2015) - Ascension-de-Notre-Seigneur.

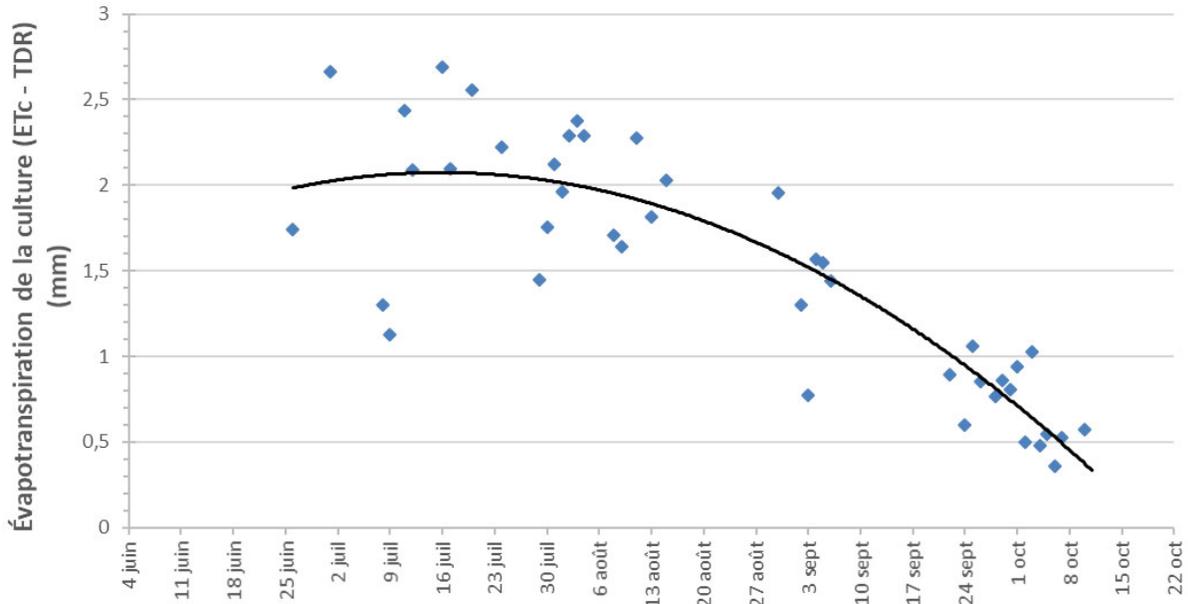


Figure 18. Évapotranspiration de la culture (ET_{c-TDR}) quotidienne (mm) - Champ 2 - Saison de végétation n° 1 (2016) - Saint-David-de-Falardeau.

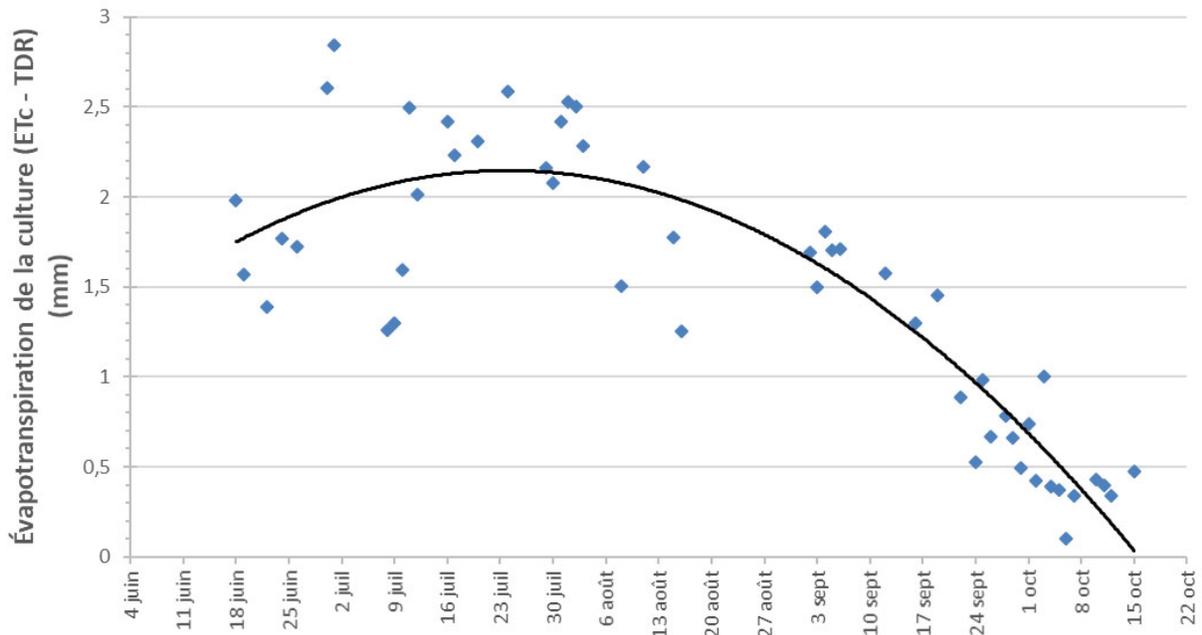


Figure 19. Évapotranspiration de la culture (ET_{c-TDR}) quotidienne (mm) - Champ 2 - Saison de végétation n° 1 (2016) - Ascension-de-Notre-Seigneur.

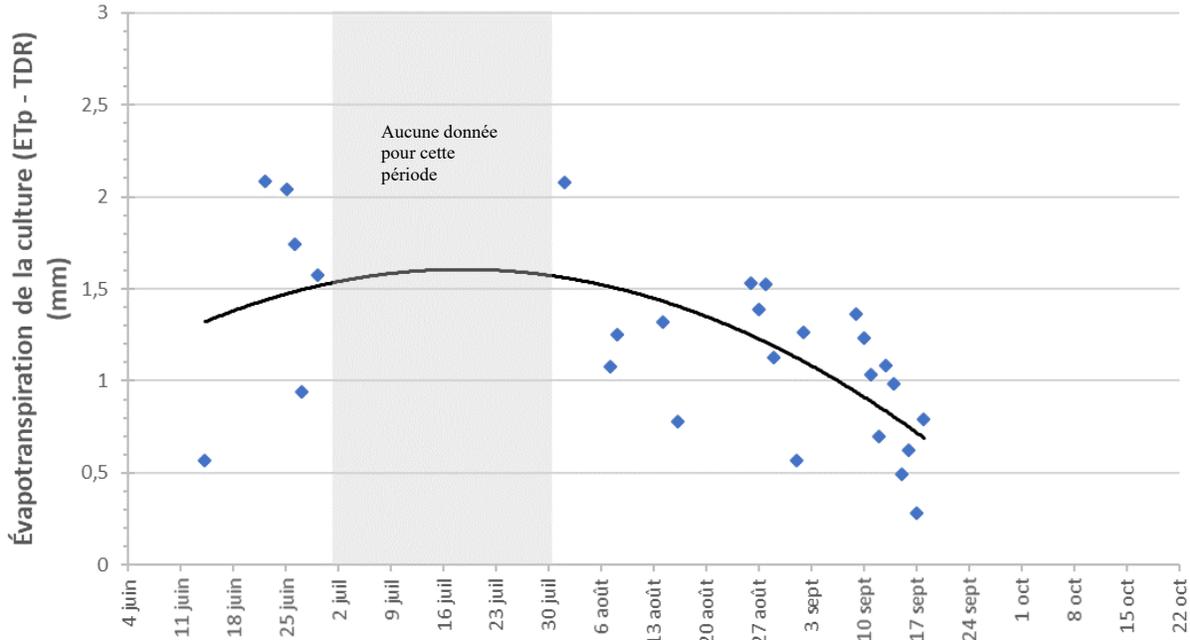


Figure 20. Évapotranspiration de la culture (ET_{c-TDR}) quotidienne (mm) - Champ 1 - Saison de végétation n° 2 (2017) - Saint-David-de-Falardeau.

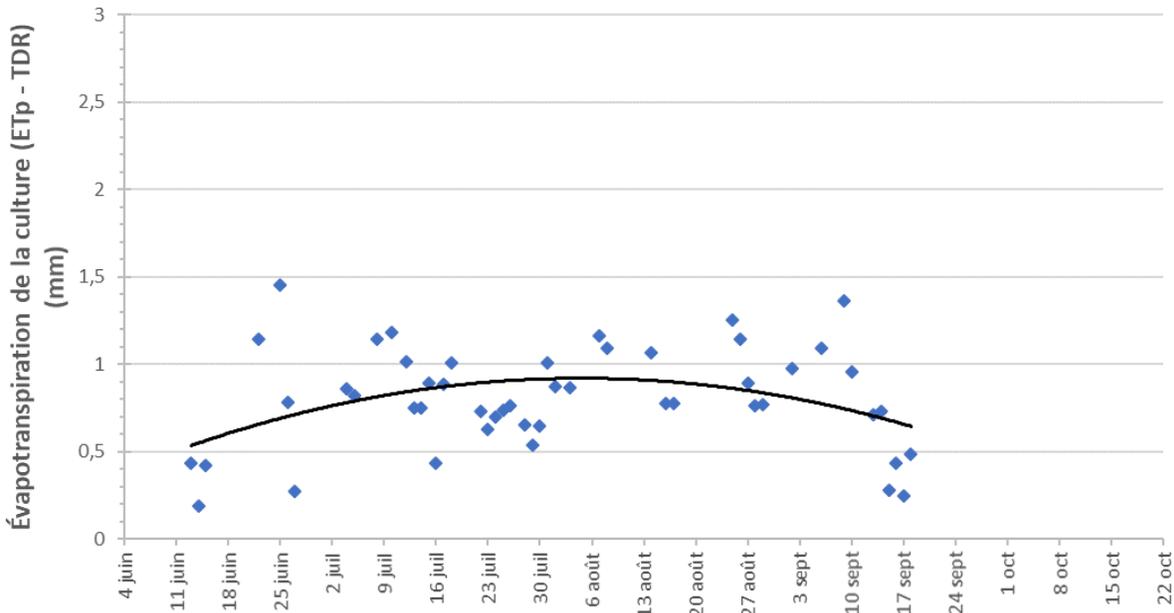


Figure 21. Évapotranspiration de la culture (ET_{c-TDR}) quotidienne (mm) - Champ 1 - Saison de végétation n° 2 (2017) - Ascension-de-Notre-Seigneur, végétation.

Statut hydrique du sol durant les essais

Le nombre de jours où le statut hydrique du sol d'un traitement irrigué (A, B ou C) a été différent de celui du Témoin (T) est présenté au Tableau 17 pour le site Saint-David-de-Falardeau et au Tableau 18 pour le site Ascension-de-Notre-Seigneur, et ce, selon le champ et le stade (Végétation et Production). Le nombre de jours indiqué pour le Témoin correspond au nombre de jours où il y a eu des mesures. Ce nombre est plus bas en Production, car les sondes sont enlevées juste avant la récolte. Par exemple, en 2015, les traitements avec la consigne B ou C, pouvant recevoir un apport en eau par l'irrigation, n'ont pas été différents du Témoin, car ces traitements n'ont reçu aucun épisode d'irrigation.

Tableau 17. Nombre de jours pour un traitement avec une consigne donnée (A, B et C) où le statut hydrique du sol était à une teneur en eau plus élevée que le témoin non irrigué (T) selon le champ et l'année - Saint-David-de-Falardeau.

N° traitement	Consigne	Champ 1	Champ 2	Champ 1	Champ 1	Champ 2	Champ 1
		2015	2016	2017	2016	2017	2018
		Nombre de jours					
		Végétation			Production		
1, 5, 9 et 13	T*	134	91	65	91	65	95
2 et 10	A	0 Aucune irrigation possible			24	22	30
3 et 11	B				12	11	24
4 et 12	C				10	2	13
6 et 14	A	11	39	22	24	22	30
7 et 15	B	0	32	11	12	11	24
8 et 16	C	0	10	2	10	2	13

*Indique le nombre de jours considéré.

Tableau 18. Nombre de jours pour un traitement avec une consigne donnée (A, B et C) où le statut hydrique du sol était « plus humide » que le témoin non irrigué (T) selon le champ et l'année - Ascension-de-Notre-Seigneur.

N° traitement	Consigne	Champ 1	Champ 2	Champ 1	Champ 1	Champ 2	Champ 1
		2015	2016	2017	2016	2017	2018
		Nombre de jours					
		Végétation			Production		
1, 5, 9 et 13	T*	126	127	91	92	105	97
2 et 10	A	0 Aucune irrigation possible			32	30	28
3 et 11	B				12	28	23
4 et 12	C				5	20	n.d.
6 et 14	A	16	32	18	32	30	28
7 et 15	B	0	12	12	12	28	23
8 et 16	C	0	11	0	5	20	n.d.

*Indique le nombre de jours considéré.

Variables mesurées

Cycle de production n° 1 – Champs 1

Le champ 1 situé à Saint-David-de-Falardeau et celui situé à L'Ascension-de-Notre-seigneur ont fait l'objet d'un suivi durant leur premier cycle de production. Les paramètres mesurés en 2015 ont été le nombre moyen de bourgeons floraux et la teneur en N des feuilles. L'année suivante, en saison de production, le poids total en fruits récoltés sur une superficie de 2 m², le poids moyen/fruit, ainsi que le taux de matières sèches et le degré Brix de ces derniers ont été mesurés. Les résultats obtenus au terme du premier cycle de production sont présentés au

Tableau 19 et au Tableau 20 selon le traitement, respectivement pour le site Saint-David-de-Falardeau et Ascension-de-Notre-Seigneur. À l'intérieur même d'un paramètre, les résultats ont été comparés selon le traitement.

Que les plants aient reçu ou non des épisodes d'irrigation contre le gel des fleurs ou qu'ils aient reçu ou non des épisodes d'irrigation selon l'atteinte d'une consigne de déclenchement, les 16 combinaisons de traitements à l'étude n'ont pas eu d'effet significativement différent à $p \leq 0,1$ sur les paramètres considérés, et ce, peu importe le site.

Tableau 19. Nombre moyen de bourgeons floraux et teneur en N des feuilles (Saison végétation 2015) et poids total en fruits, poids moyen/fruit, taux de matières sèches et degré Brix des fruits (Saison production 2016) selon le traitement - Champ 1 - Saint-David-de-Falardeau.

N° traitement	Bourgeons	Feuilles	Fruits			
	Nb moyen/10 tiges	Teneur en N (%)	Poids total/2 m ² (g)	Poids moyen/fruit (g)	Matières sèches (%)	Brix (%)
	Saison végétation n° 1 - Champ 1 (2015)		Saison production n° 1 - Champ 1 (2016)			
1	33,4	1,49	1618,6	0,45	13,4	11,1
2	35,5	1,53	1226,8	0,46	12,9	11,8
3	37,5	1,53	1483,3	0,46	12,6	11,8
4	46,8	1,47	1538,0	0,47	12,8	11,0
5	48,6	1,50	2252,7	0,47	13,2	11,5
6	42,1	1,61	1571,4	0,50	12,9	11,0
7	43,6	1,49	2396,5	0,50	12,3	10,8
8	52,2	1,56	1896,0	0,51	12,9	11,8
9	56,9	1,53	1776,6	0,49	13,1	10,7
10	51,5	1,47	2202,5	0,46	12,9	10,9
11	41,7	1,54	1732,6	0,46	13,2	11,1
12	39,2	1,53	985,5	0,45	13,6	11,2
13	42,4	1,59	1702,6	0,43	13,4	11,5
14	36,3	1,54	1342,7	0,49	13,1	11,2
15	42,8	1,46	1817,2	0,47	12,9	10,7
16	43,0	1,47	1982,3	0,48	12,8	11,5
Valeur P	0,3275	0,9317	0,3277	0,9940	0,3047	0,8940
Erreur type	5,5 à 6,6	0,06 à 0,07	377,8	0,04	-	0,55

Tableau 20. Nombre moyen de bourgeons floraux et teneur en N des feuilles (Saison végétation 2015) et poids total en fruits, poids moyen/fruit, taux de matières sèches et degré Brix des fruits (Saison production 2016) selon le traitement - Champ 1 - Ascension-de-Notre-Seigneur.

N° traitement	Bourgeons	Feuilles	Fruits			
	Nb moyen/10 tiges	Teneur en N (%)	Poids total/2 m ² (g)	Poids moyen/fruit (g)	Matières sèches (%)	Brix (%)
	Saison végétation n° 1 - Champ 1 (2015)		Saison production n° 1 - Champ 1 (2016)			
1	45,3	1,42	745,4	0,37	14,3	12,7
2	30,8	1,47	792,6	0,37	13,8	12,3
3	48,6	1,49	868,4	0,37	13,3	11,5
4	34,0	1,55	658,3	0,38	14,2	12,8
5	42,6	1,49	495,1	0,38	13,4	12,9
6	41,2	1,50	734,5	0,39	13,0	11,5
7	36,1	1,52	609,6	0,38	13,7	12,3
8	39,8	1,46	645,1	0,36	14,4	12,8
9	37,3	1,49	963,7	0,39	14,6	13,2
10	40,3	1,56	696,3	0,38	13,6	12,5
11	39,3	1,52	860,7	0,42	13,4	12,7
12	37,7	1,52	857,7	0,35	13,5	11,9
13	36,2	1,46	830,6	0,34	13,5	12,4
14	40,6	1,56	893,5	0,42	16,6	12,1
15	37,2	1,50	837,3	0,39	14,0	12,6
16	34,8	1,49	727,1	0,36	14,1	12,4
Valeur P	0,4400	0,5496	0,9496	0,9062	0,7693	0,6493
Erreur type	4,3	0,04	180,7	0,03	-	0,53

Les traitements ont été regroupés selon les critères présentés au Tableau 21. La moyenne du poids en fruits récoltés pour chacun des cinq groupes formés y est présentée selon le champ et le site. Ces groupes ont été formés afin de vérifier s'il y a un impact significatif des épisodes d'irrigation contre le gel des fleurs.

Tableau 21. Poids moyen en fruits récoltés (g/2 m²) pour un groupe de consignes donné, selon le champ et le site.

Consignes regroupées	N ^{os} traitements correspondants	Champ 1 - 2016	Champ 2 - 2017	Champ 1 - 2018
		Saison production n° 1	Saison production n° 1	Saison production n° 2
Saint-David-de-Falardeau				
A (Protégé du gel)	2 et 6	1399,1	1451,2	1046,8
A (Non protégé du gel)	10 et 14	1772,6	1381,1	1155,9
Tout (Protégé du gel)	1 à 8	1747,9	1322,1	1406,0
Tout (Non protégé du gel)	9 à 16	1692,7	1473,3	1147,6
Tout	1 à 16	1720,3	1397,7	1276,8
Ascension-de-Notre-Seigneur				
A (Protégé du gel)	2 et 6	763,5	1058,4	828,9
A (Non protégé du gel)	10 et 14	794,9	777,0	1294,9
Tout (Protégé du gel)	1 à 8	693,6	959,5	935,6
Tout (Non protégé du gel)	9 à 16	833,3	836,8	984,0
Tout	1 à 16	763,5	898,2	959,8

Deux contrastes ont été effectués pour chacun des champs et des sites et sont présentés au Tableau 22. Le premier contraste implique les traitements qui ont la consigne A et qui sont protégés du gel (T2 et T6) et ceux qui ne le sont pas (T10 et T14). Le deuxième contraste implique l'ensemble des traitements qui sont protégés du gel (T1 à T8) et ceux qui ne le sont pas (T9 à T16).

Des différences significatives à $p \leq 0,1$ ont été mesurées en 2018 pour chacun des sites. À Saint-David-de-Falardeau, les traitements qui ont été protégés ont un rendement supérieur à ceux des traitements non protégés. Toutefois, cette différence ne s'exprime pas lorsque le contraste est effectué à l'intérieur des traitements qui ont la consigne A.

À l'Ascension-de-Notre-Seigneur, la différence significative est à l'avantage des parcelles n'ayant pas été protégées du gel des fleurs, et ce, pour les traitements qui ont la consigne A seulement. Lorsque l'ensemble des consignes sont combinées, aucune différence significative n'a été mesurée entre les parcelles protégées et celles non protégées.

Tableau 22. Contrastes effectués sur la moyenne du poids en fruits récoltés pour un groupe de consignes donné, selon le champ et le site.

Contrastes	N ^{os} traitements correspondants	Valeur de P		
		Champ 1 - 2016 Saison production n° 1	Champ 2 - 2017 Saison production n° 1	Champ 1 - 2018 Saison production n° 2
Saint-David-de-Falardeau				
A (Protégé du gel) vs A (non protégé)	2 et 6 vs 10 et 14	0,2797	0,7886	0,6738
Tout (Protégé du gel) vs Tout (Non protégé)	1 à 8 vs 9 à 16	0,7608	0,2510	0,0647
Ascension-de-Notre-Seigneur				
A (Protégé du gel) vs A (Non protégé)	2 et 6 vs 10 et 14	0,8630	0,1554	0,0665
Tout (Protégé du gel) vs Tout (Non protégé)	1 à 8 vs 9 à 16	0,1285	0,2142	0,6984

Sans égard aux traitements où il est permis d'utiliser l'irrigation pour protéger (T1 à T8) ou non (T9 à T16) les fleurs du gel, les traitements ont été regroupés selon qu'ils aient reçu ou non un apport en eau d'irrigation basée sur l'atteinte d'une consigne de déclenchement lors de la saison de production 2016, et ce, selon le site (Tableau 23). En 2015, seuls le T6 et le T14 ont reçu un épisode d'irrigation et le projet en était à la première année de réalisation. Par conséquent, le groupe de traitements considérés « Témoins non irrigués » est composé de tous les traitements sauf les T6 et T14.

Le nombre moyen de bourgeons floraux présents sur les plants qui ont reçu un apport en eau d'irrigation n'est pas significativement différent $p \leq 0,1$ des plants qui n'ont reçu aucun apport.

Tableau 23. Nombre de bourgeons floraux moyen pour un groupe de consignes donné et contrastes effectués entre ces deux groupes, selon le site – Champ 1 – Saison de végétation 2015.

Consignes regroupées	N ^{os} traitements correspondants	Nb moyen de bourgeons/10 tiges - Moyenne du groupe	
		Saint-David-de-Falardeau	Ascension-de-Notre-Seigneur
A (Végé + Prod)	6 et 14	39,2	40,9
Tout sauf A (Végé + Prod)	Tout sauf 6 et 14	43,9	38,6
Contrastes		P = 0,2667	P = 0,4737

Sans égard aux traitements où il est permis d'utiliser l'irrigation pour protéger (T1 à T8) ou non (T9 à T16) les fleurs du gel, les traitements ont été regroupés selon les critères présentés au Tableau 24. La moyenne du poids total en fruits récoltés pour chacun des six groupes formés y est présentée selon le site.

Tableau 24. Moyenne du poids total en fruits récoltés pour un groupe de consignes donné, selon le site - Champ 1 - Saison production 2016.

Consignes regroupées	N ^{os} traitements correspondants	Poids total/2 m ² (g) Moyenne du groupe	
		Saint-David-de-Falardeau	Ascension-de-Notre-Seigneur
A (Végé + Prod)	6 et 14	1457,0	814,0
A (Prod)	2 et 10	1714,7	744,4
Tout B	3, 7, 11 et 15	1857,4	794,0
Tout C	4, 8 12 et 16	1600,4	722,0
Tout A, B et C	Tous sauf 1, 5,9 et 13	1681,2	765,1
Tout T	1, 5, 9 et 13	1837,6	758,7

Onze contrastes ont été effectués entre les six groupes formés et les résultats sont présentés au

Tableau 25. Peu importe, la consigne utilisée pour déclencher l'irrigation ou encore, qu'il n'était pas permis d'intervenir avec l'irrigation, le poids total moyen en fruits récoltés n'est pas significativement différent à $p \leq 0,1$.

Tableau 25. Contrastes effectués sur la moyenne du poids total en fruits pour un groupe de consignes donné, selon le site - Champ 1 - Saison production 2016.

Contrastes	N ^{os} traitements correspondants	Valeur de P	
		Saint-David-de-Falardeau	Ascension-de-Notre-Seigneur
A (Végé + Prod) vs (Prod)	6 et 14 vs 2 et 10	0,4540	0,7020
A (Végé + Prod) vs Tout B	6 et 14 vs 3, 7, 11 et 15	0,1827	0,8987
A (Végé + Prod) vs Tout C	6 et 14 vs 4, 8 12 et 16	0,6296	0,5596
A (Prod) vs Tout B	2 et 10 vs 3, 7, 11 et 15	0,6476	0,7530
A (Prod) vs Tout C	2 et 10 vs 4, 8 12 et 16	0,7143	0,8868
Tout B vs Tout C	3, 7, 11 et 15 vs 4, 8 12 et 16	0,6378	0,8373
Tout T vs A (Végé + Prod)	1, 5, 9 et 13 vs 6 et 14	0,2047	0,7253
Tout T vs A (Prod)	1, 5, 9 et 13 vs 2 et 10	0,6936	0,9278
Tout T vs Tout B	1, 5, 9 et 13 vs 3, 7, 11 et 15	0,9395	0,7837
Tout T vs Tout C	1, 5, 9 et 13 vs 4, 8 12 et 16	0,3650	0,7755
Tout T vs Tout A, B et C	1, 5, 9 et 13 vs Tous sauf 1, 5, 9 et 13	0,4611	0,9514

Cycle de production n° 1 – Champs 2

Le champ 2 situé au site Saint-David-de-Falardeau et celui situé au site Ascension-de-Notre-Seigneur ont fait l'objet d'un suivi durant leur premier cycle de production (un seul cycle de production pour les champs 2). Les paramètres mesurés en 2016 ont été le nombre moyen de bourgeons floraux et la teneur en N des feuilles. L'année suivante, en saison de production, le poids total en fruits récoltés sur une superficie de 2 m², le poids moyen/fruit, ainsi que le taux de matières sèches et le degré Brix de ces derniers ont été mesurés. Les résultats obtenus au terme du premier cycle de production sont présentés au Tableau 26 et Tableau 27 et au Tableau 27 selon le traitement, respectivement pour le site Saint-David-de-Falardeau et le site Ascension-de-Notre-Seigneur. À l'intérieur même d'un paramètre, les résultats ont été comparés entre eux selon le traitement.

Que les plants aient reçu ou non des épisodes d'irrigation contre le gel des fleurs ou qu'ils aient reçu ou non des épisodes d'irrigation selon l'atteinte d'une consigne de déclenchement, les 16 combinaisons de traitements à l'étude n'ont pas eu d'effet significativement différent à $p \leq 0,1$ sur les paramètres considérés.

Tableau 26. Nombre moyen de bourgeons floraux et teneur en N des feuilles (Saison végétation 2016) et poids total en fruits, poids moyen/fruit, taux de matières sèches et degré Brix des fruits (Saison production 2017) selon le traitement - Champ 2 - Saint-David-de-Falardeau.

N° traitement	Bourgeons	Feuilles	Fruits			
	Nb moyen/10 tiges	Teneur en N (%)	Poids total/2 m ² (g)	Poids moyen/fruit (g)	Matières sèches (%)	Brix (%)
	Saison végétation n° 1 - Champ 2 (2016)		Saison production n° 1 - Champ 2 (2017)			
1	50,1	1,46	1239,3	0,44	15,9	11,6
2	45,9	1,51	1886,2	0,46	13,2	11,5
3	51,9	1,50	1587,5	0,44	12,8	11,8
4	49,3	1,44	1055,5	0,46	12,8	11,9
5	37,3	1,48	1135,0	0,43	13,1	11,9
6	40,6	1,49	1016,3	0,46	12,5	12,0
7	48,2	1,56	1660,0	0,44	12,4	11,3
8	41,5	1,47	997,0	0,45	13,0	12,3
9	40,8	1,46	1496,5	0,43	13,6	11,6
10	44,2	1,34	1577,4	0,45	10,4	11,3
11	40,0	1,50	1484,4	0,43	12,8	11,0
12	44,9	1,48	1608,3	0,43	13,6	12,2
13	48,9	1,42	1389,3	0,44	13,2	12,1
14	42,9	1,50	1184,8	0,46	12,7	11,5
15	48,1	1,45	1729,8	0,53	12,7	11,5
16	46,1	1,48	1315,8	0,41	13,6	12,1
Valeur P	0,3832	0,5389	0,3817	0,8695	0,3951	0,3774
Erreur type	4,0	0,05	260,2	0,03	-	0,35

Tableau 27. Nombre moyen de bourgeons floraux et teneur en N des feuilles (Saison végétation 2016) et poids total en fruits, poids moyen/fruit, taux de matières sèches et degré Brix des fruits (Saison production 2017) selon le traitement - Champ 2 - Ascension-de-Notre-Seigneur.

N° traitement	Bourgeons	Feuilles	Fruits			
	Nb moyen/10 tiges	Teneur en N (%)	Poids total/2 m ² (g)	Poids moyen/fruit (g)	Matières sèches (%)	Brix (%)
	Saison végétation n° 1 - Champ 2 (2016)		Saison production n° 1 - Champ 2 (2017)			
1	44,7	1,32	993,3	0,38	12,3	10,7
2	41,2	1,33	699,3	0,36	11,8	10,5
3	41,8	1,24	815,5	0,36	11,9	10,9
4	41,5	1,30	1270,8	0,42	12,1	10,5
5	37,6	1,28	1007,0	0,41	11,7	10,3
6	44,3	1,30	1417,5	0,41	12,3	10,5
7	45,7	1,44	757,5	0,42	10,8	10,4
8	39,9	1,30	715,5	0,33	11,6	10,5
9	44,4	1,37	978,0	0,36	12,8	11,2
10	43,3	1,33	726,0	0,37	11,9	11,2
11	47,5	1,30	930,8	0,37	12,7	11,0
12	43,4	1,24	678,8	0,38	13,2	11,1
13	40,6	1,31	953,5	0,34	12,4	10,3
14	38,5	1,28	828,0	0,38	11,8	10,0
15	40,8	1,34	814,4	0,41	11,8	10,9
16	35,9	1,28	785,3	0,46	11,9	10,8
Valeur P	0,9094	0,1560	0,3603	0,4478	0,3940	0,7399
Erreur type	4,2	0,04	194,9	0,03	-	0,43

Sans égard aux traitements où il est permis d'utiliser l'irrigation pour protéger (T1 à T8) ou non (T9 à T16) les fleurs du gel, les traitements ont été regroupés selon les critères présentés au Tableau 28. Le nombre moyen de bourgeons floraux sur 10 tiges pour chacun des quatre groupes formés y est présenté selon le site.

Tableau 28. Nombre moyen de bourgeons floraux pour un groupe de consignes donné, selon le site - Champ 2 - Saison végétation 2016.

Consignes regroupées	N ^{os} traitements correspondants	Nb moyen de bourgeons/10 tiges - Moyenne du groupe	
		Saint-David-de-Falardeau	Ascension-de-Notre-Seigneur
A (Végé + Prod)	6 et 14	41,7	41,4
B (Végé + Prod)	7 et 15	48,2	43,3
C (Végé + Prod)	8 et 16	43,8	37,9
Non irriguées en Végé	1 à 5 et 9 à 13	45,3	42,6

Sept contrastes ont été effectués entre les quatre groupes formés et les résultats sont présentés au Tableau 29. Peu importe la consigne utilisée pour déclencher l'irrigation ou encore, qu'il n'était pas permis d'intervenir avec l'irrigation, le nombre de bourgeons moyen n'est pas significativement différent à $p \leq 0,1$.

Tableau 29. Contrastes effectués sur la moyenne du nombre de bourgeons floraux pour un groupe de consignes donné, selon le site - Champ 2 - Saison végétation 2016.

Contrastes	N ^{os} traitements correspondants	Valeur de P	
		St-David-de-Falardeau	Ascension-de-Notre-Seigneur
A (Végé + Prod) vs B (Végé + Prod)	6 et 14 vs 7 et 15	0,1176	0,6652
A (Végé + Prod) vs C (Végé + Prod)	6 et 14 vs 8 et 16	0,6120	0,4126
B (Végé + Prod) vs C (Végé + Prod)	7 et 15 vs 8 et 16	0,2843	0,2131
Non irrig. (Végé) vs A (Végé + Prod)	1 à 5 et 9 à 13 vs 6 et 14	0,2549	0,7203
Non irrig. (Végé) vs B (Végé + Prod)	1 à 5 et 9 à 13 vs 6 et 14	0,3701	0,8410
Non irrig. (Végé) vs C (Végé + Prod)	1 à 5 et 9 à 13 vs 6 et 14	0,6251	0,1600
Non irrig. (Végé) vs ABC (Végé + Prod)	1 à 5 et 9 à 13 vs 6, 7, 8, 14, 15, 16	0,7127	0,4319

Sans égard aux traitements où il est permis d'utiliser l'irrigation pour protéger (T1 à T8) ou non (T9 à T16) les fleurs du gel, les traitements ont été regroupés selon les critères présentés au Tableau 30. La moyenne du poids total en fruits récoltés pour chacun des six groupes formés y est présentée selon le site.

Tableau 30. Moyenne du poids total en fruits pour un groupe de consignes donné, selon le site - Champ 2 - Saison production 2017.

Consignes regroupées	N ^{os} traitements correspondants	Poids total/2 m ² (g) Moyenne du groupe	
		St-David-de-Falardeau	Ascension-de-Notre-Seigneur
A (Végé + Prod)	6 et 14	1100,5	1122,8
A (Prod)	2 et 10	1731,8	712,6
Tout B	3, 7, 11 et 15	1615,4	829,5
Tout C	4, 8 12 et 16	1244,1	862,6
Tout A, B et C	Tous sauf 1, 5, 9 et 13	1425,2	869,9
Tout T	1, 5, 9 et 13	1315,0	982,9

Onze contrastes ont été effectués entre les six groupes formés et les résultats sont présentés au Tableau 31. Des différences significatives à $p \leq 0,1$ ont été observées pour les deux sites en ce qui a trait au groupe T6 et T14 (Consigne A avec irrigation permise en végétation et production) versus au groupe T2 et T10 (Consigne A avec irrigation permise seulement en production) (Tableau 31). Pour le site Saint-David-de-Falardeau, le groupe T6 et T14 est « anormalement » bas ce qui explique les cinq contrastes qui sont significatifs. À L'Ascension-de-Notre-Seigneur, le groupe T6 et T14 (Consigne A avec irrigation permise en végétation et production) a un poids total en fruits récoltés significativement plus élevé que le groupe T2 et T10 (Consigne A avec irrigation permise seulement en production). De plus, le groupe T6 et T14 est significativement plus élevé que le groupe « Tout B » (T3, T7, T11 et T15).

Tableau 31. Contrastes effectués sur la moyenne du poids total en fruits pour un groupe de consignes donné, selon le site - Champ 2 - Saison de production 2017.

Contrastes	N ^{os} traitements correspondants		Valeur de P	
			St-David-de-Falardeau	Ascension-de-Notre-Seigneur
A (Végé + Prod) vs (Prod)	6 et 14	vs 2 et 10	0,0191	0,0407
A (Végé + Prod) vs Tout B	6 et 14	vs 3, 7, 11 et 15	0,0268	0,0888
A (Végé + Prod) vs Tout C	6 et 14	vs 4, 8 12 et 16	0,5269	0,1299
A (Prod) vs Tout B	2 et 10	vs 3, 7, 11 et 15	0,6080	0,4920
A (Prod) vs Tout C	2 et 10	vs 4, 8 12 et 16	0,0355	0,3789
Tout B vs Tout C	3, 7, 11 et 15	vs 4, 8 12 et 16	0,0439	0,8560
Tout T vs A (Végé + Prod)	1, 5, 9 et 13	vs 6 et 14	0,3459	0,4117
Tout T vs A (Prod)	1, 5, 9 et 13	vs 2 et 10	0,0705	0,1159
Tout T vs Tout B	1, 5, 9 et 13	vs 3, 7, 11 et 15	0,1091	0,2713
Tout T vs Tout C	1, 5, 9 et 13	vs 4, 8 12 et 16	0,7018	0,3869
Tout T vs Tout A, B et C	1, 5, 9 et 13	Tous sauf 1, 5, 9 et 13	0,4667	0,3204

Cycle de production n° 2 – Champs 1

Le champ 1 situé à Saint-David-de-Falardeau et celui situé à L'Ascension-de-Notre-Seigneur ont fait l'objet d'un suivi durant leur deuxième cycle de production (dans le cadre de ce projet). Les paramètres mesurés en 2017 ont été le nombre moyen de bourgeons floraux et la teneur en N des feuilles. L'année suivante, en saison de production, le poids total en fruits récoltés sur une superficie de 2 m², le poids moyen/fruit, ainsi que le taux de matières sèches et le degré Brix de ces derniers ont été mesurés. Les résultats obtenus au terme du premier cycle de production sont présentés au Tableau 32 et Tableau 33 selon le traitement, respectivement pour le site Saint-David-de-Falardeau et le site Ascension-de-Notre-Seigneur. À l'intérieur même d'un paramètre, les résultats ont été comparés entre eux selon le traitement.

Que les plants aient reçu ou non des épisodes d'irrigation contre le gel des fleurs ou qu'ils aient reçu ou non des épisodes d'irrigation selon l'atteinte d'une consigne de déclenchement, les 16 combinaisons de traitements à l'étude n'ont pas eu d'effet significativement différent sur les paramètres considérés à $p \leq 0,1$.

Tableau 32. Nombre moyen de bourgeons floraux et teneur en N des feuilles (Saison végétation 2017) et teneur en N des feuilles, poids total en fruits, poids moyen/fruit, taux de matières sèches et degré Brix des fruits (Saison production 2018) selon le traitement - Champ 1 - Saint-David-de-Falardeau.

N° traitement	Bourgeons		Feuilles		Fruits		
	Nb. moyen/10 tiges	Teneur en N (%)	Poids total/2 m ² (g)	Poids moyen/fruit (g)	Matières sèches (%)	Brix (%)	
	Saison végétation n° 2 Champ 1 (2017)		Saison production n° 2 - Champ 1 (2018)				
1	38,5	1,61	1,26	1604,3	0,48	11,3	13,3
2	29,3	1,59	1,26	918,0	0,50	11,8	12,4
3	40,0	1,68	1,30	1459,8	0,52	10,9	13,2
4	33,8	1,57	1,28	1349,2	0,50	11,4	13,4
5	42,6	1,59	1,22	1438,9	0,46	11,3	13,2
6	34,9	1,66	1,32	1175,5	0,50	11,0	12,9
7	31,3	1,59	1,27	1227,9	0,42	11,7	13,5
8	47,4	1,64	1,28	2074,4	0,54	11,2	13,0
9	44,0	1,62	1,29	1081,2	0,47	10,6	13,4
10	39,7	1,58	1,23	1303,8	0,46	11,1	13,0
11	40,9	1,54	1,16	784,5	0,44	11,9	14,5
12	40,2	1,70	1,30	997,2	0,49	11,6	12,9
13	37,3	1,60	1,30	1344,2	0,41	11,7	13,3
14	48,9	1,68	1,36	1007,9	0,48	11,7	13,5
15	43,8	1,60	1,26	1371,5	0,48	11,1	13,1
16	40,6	1,50	1,47	1290,5	0,52	10,5	13,1
Valeur P	0,8170	0,6597	0,1663	0,2057	0,7389	0,8835	0,5583
Erreur type	6,5 à 7,5	0,05 à 0,06	0,05 à 0,07	247,1 à 285,3	0,04	0,51 à 0,59	0,42 à 0,83

Tableau 33. Nombre moyen de bourgeons floraux et teneur en N des feuilles (Saison végétation 2017) et teneur en N des feuilles, poids total en fruits, poids moyen/fruit, taux de matières sèches et degré Brix des fruits (Saison production 2018) selon le traitement - Champ 1 - Ascension-de-Notre-Seigneur.

N° traitement	Bourgeons	Feuilles		Fruits			
	Nb. moyen/10 tiges	Teneur en N (%)		Poids total/2 m ² (g)	Poids moyen/fruit (g)	Matières sèches (%)	Brix (%)
	Saison végétation n° 2 Champ 1 (2017)		Saison production n° 2 - Champ 1 (2018)				
1	38,2	1,43	1,11	1092,3	0,37	11,9	14,0
2	32,8	1,44	1,12	789,0	0,36	11,4	13,2
3	40,0	1,54	1,19	1166,8	0,46	11,8	13,8
4	37,9	1,43	1,12	904,5	0,37	11,6	14,1
5	31,9	1,41	1,10	984,8	0,37	11,8	14,0
6	43,6	1,49	1,22	868,8	0,42	11,3	13,2
7	38,6	1,41	1,04	1020,3	0,38	11,1	13,1
8	43,1	1,48	1,10	658,5	0,38	11,5	14,1
9	34,4	1,43	1,19	687,8	0,34	12,6	14,6
10	33,6	1,38	1,19	1148,6	0,40	10,9	13,6
11	40,0	1,37	1,14	696,8	0,33	11,4	13,4
12	35,6	1,44	1,14	1262,3	0,41	11,4	13,1
13	33,1	1,48	1,16	821,8	0,35	11,8	14,0
14	41,6	1,43	1,16	1441,3	0,42	11,0	14,1
15	38,4	1,41	1,12	717,3	0,36	11,6	13,7
16	32,5	1,42	1,29	1096,1	0,53	11,6	13,2
Valeur P	0,7971	0,4454	0,0333	0,6099	0,1464	0,8325	0,8310
Erreur type	4,7	0,04	0,04	248,2	0,04	0,50	0,58

Sans égard aux traitements où il est permis d'utiliser l'irrigation pour protéger (T1 à T8) ou non (T9 à T16) les fleurs du gel, les traitements ont été regroupés selon les critères présentés au Tableau 34. Le nombre moyen de bourgeons floraux sur 10 tiges pour chacun des quatre groupes formés y est présenté selon le site.

Tableau 34. Nombre moyen de bourgeons floraux pour un groupe de consignes donné, selon le site - Champ 1 - Saison végétation 2017.

Consignes regroupées	N ^{os} traitements correspondants	Nb moyen de bourgeons/10 tiges - Moyenne du groupe	
		Saint-David-de-Falardeau	Ascension-de-Notre-Seigneur
A (Végé + Prod)	6 et 14	41,9	42,6
B (Végé + Prod)	7 et 15	37,5	38,5
C (Végé + Prod)	8 et 16	44,0	37,8
Non irriguées en Végé	1 à 5 et 9 à 13	38,6	35,8

Parmi les sept contrastes effectués, celui entre le groupe où l'irrigation n'est pas permise en végétation (Non irrig. (Végé)) et le groupe de traitements qui ont la consigne A et où il est permis d'intervenir avec l'irrigation en végétation et production (A Végé + Prod) est significativement différent à $p \leq 0,1$, à la faveur du 2^e groupe (Tableau 35). Ainsi, le nombre de bourgeons a été plus élevé pour les plants ayant été irrigués avec la consigne A où l'irrigation était permise en végétation et production, comparativement à tous les autres plants qui n'ont pas été irrigués contre le stress hydrique. Un second contraste est près du seuil fixé à $p \leq 0,1$ celui où tous les traitements non irrigués en végétation (T1 à T5 et T9 à T13) versus tous les traitements où l'irrigation était permise, sans égard à la consigne (T6 à T8 et T14 à T15).

Tableau 35. Contrastes effectués sur la moyenne du nombre de bourgeons floraux pour un groupe de consignes donné, selon le site - Champ 1 - Saison végétation 2017.

Contrastes	N ^{os} traitements correspondants	Valeur de P	
		Saint-David-de-Falardeau	Ascension-de-Notre-Seigneur
A (Végé + Prod) vs B (Végé + Prod)	6 et 14 vs 7 et 15	0,5255	0,3896
A (Végé + Prod) vs C (Végé + Prod)	6 et 14 vs 8 et 16	0,7579	0,3126
B (Végé + Prod) vs C (Végé + Prod)	7 et 15 vs 8 et 16	0,3651	0,8795
Non irrig. (Végé) vs A (Végé + Prod)	1 à 5 et 9 à 13 vs 6 et 14	0,5327	0,0671
Non irrig. (Végé) vs B (Végé + Prod)	1 à 5 et 9 à 13 vs 6 et 14	0,8425	0,4552
Non irrig. (Végé) vs C (Végé + Prod)	1 à 5 et 9 à 13 vs 6 et 14	0,3358	0,5807
Non irrig. (Végé) vs ABC (Végé + Prod)	1 à 5 et 9 à 13 vs 6, 7, 8, 14, 15, 16	0,4961	0,1181

Sans égard aux traitements où il est permis d'utiliser l'irrigation pour protéger (T1 à T8) ou non (T9 à T16) les fleurs du gel, les traitements ont été regroupés selon les critères présentés au Tableau 26. La moyenne du poids total en fruits récoltés pour chacun des six groupes formés y est présentée selon le site.

Tableau 36. Moyenne du poids total en fruits pour un groupe de consignes donné, selon le site - Champ 1 - Saison production 2018.

Consignes regroupées	N ^{os} traitements correspondants	Poids total/2 m ² (g) Moyenne du groupe	
		Saint-David-de-Falardeau	Ascension-de-Notre-Seigneur
A (Végé + Prod)	6 et 14	1091,7	1155,0
A (Prod)	2 et 10	1110,9	968,8
Tout B	3, 7, 11 et 15	1210,9	900,3
Tout C	4, 8 12 et 16	1427,8	980,3
Tout A, B et C	Tous sauf 1, 5, 9 et 13	1246,7	980,8
Tout T	1, 5, 9 et 13	1367,1	896,6

Onze contrastes ont été effectués entre les six groupes formés et les résultats sont présentés dans le Tableau 37. Peu importe la consigne utilisée pour déclencher l'irrigation ou encore, qu'il n'était pas permis d'intervenir avec l'irrigation, le poids total moyen en fruits récoltés n'est pas significativement différent à $p \leq 0,1$.

Tableau 37. Contrastes effectués sur la moyenne du poids total en fruits pour un groupe de consignes donné, selon le site - Champ 1 - Saison de production 2018.

Contrastes	N ^{os} traitements correspondants		Valeur de P	
			Saint-David-de-Falardeau	Ascension-de-Notre-Seigneur
A (Végé + Prod) vs (Prod)	6 et 14	vs 2 et 10	0,4568	0,9408
A (Végé + Prod) vs Tout B	6 et 14	vs 3, 7, 11 et 15	0,2418	0,5955
A (Végé + Prod) vs Tout C	6 et 14	vs 4, 8 12 et 16	0,4205	0,1395
A (Prod) vs Tout B	2 et 10	vs 3, 7, 11 et 15	0,7511	0,6713
A (Prod) vs Tout C	2 et 10	vs 4, 8 12 et 16	0,9574	0,1834
Tout B vs Tout C	3, 7, 11, 15	vs 4, 8 12 et 16	0,9726	0,1597
Tout T vs A (Végé + Prod)	1, 5, 9 et 13	vs 6 et 14	0,2352	0,2238
Tout T vs A (Prod)	1, 5, 9 et 13	vs 2 et 10	0,7384	0,2801
Tout T vs Tout B	1, 5, 9 et 13	vs 3, 7, 11 et 15	0,9836	0,4288
Tout T vs Tout C	1, 5, 9 et 13	vs 4, 8 12 et 16	0,6355	0,7578
Tout T vs Tout A, B et C	1, 5, 9 et 13	vs Tous sauf 1, 5, 9, 13	0,5595	0,4522

Prélèvement en eau et rendement

Le rendement en fruits moyen récolté pour chacun des six champs qui ont été en production (Tableau 21) a été mis en relation avec le K_c obtenu en saison de végétation pour la période comprise entre le 4 juin et le 24 août et en saison de production (Tableau 15 et Tableau 16) (Figure 23) pour le champ en question. Cette relation est présentée à la Figure 22, pour la saison de végétation et à la Figure 23, pour la saison de production.

Par exemple, à la Figure 22, le K_c obtenu pour la période comprise entre le 4 juin et le 24 août, pour le champ en végétation en 2017 au site Saint-David-de-Falardeau (0,38), a été mis en relation avec le poids en fruits moyen récolté pour ce champ à la saison de production 2018 (1276,8 g/2 m²). Le coefficient de régression obtenu (R^2) est suffisamment élevé pour y accorder de l'intérêt. Ce dernier propose que plus le K_c obtenu en saison de végétation est élevé, plus il est probable que le poids en fruits obtenu en saison de production sera élevé. Le R^2 obtenu avec la relation entre le K_c végétation et poids en fruits (0,37) est plus élevée que celui obtenu pour la relation entre le K_c production et poids en fruits (0,29). Éventuellement, une telle approche, où le potentiel de rendement peut être estimé l'année qui précède la récolte, pourrait être utile pour prioriser ou identifier des champs qui ont le plus grand potentiel, et par conséquent, ceux qui devraient être irrigués.

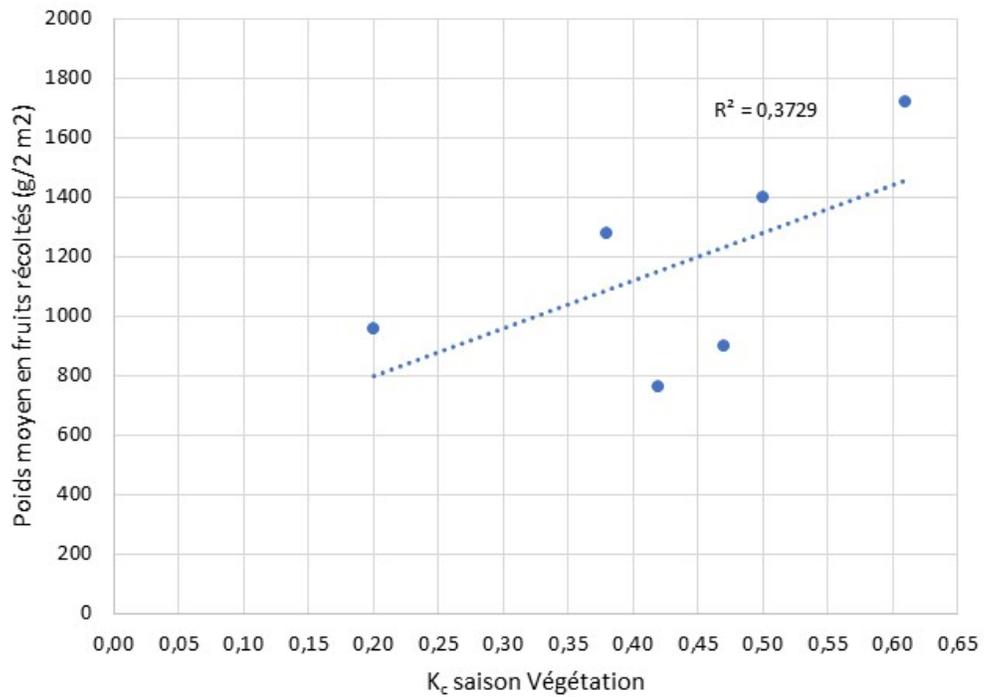


Figure 22. Relation entre le K_c moyen obtenu en saison de végétation et le poids en fruits récolté pour un champ donné.

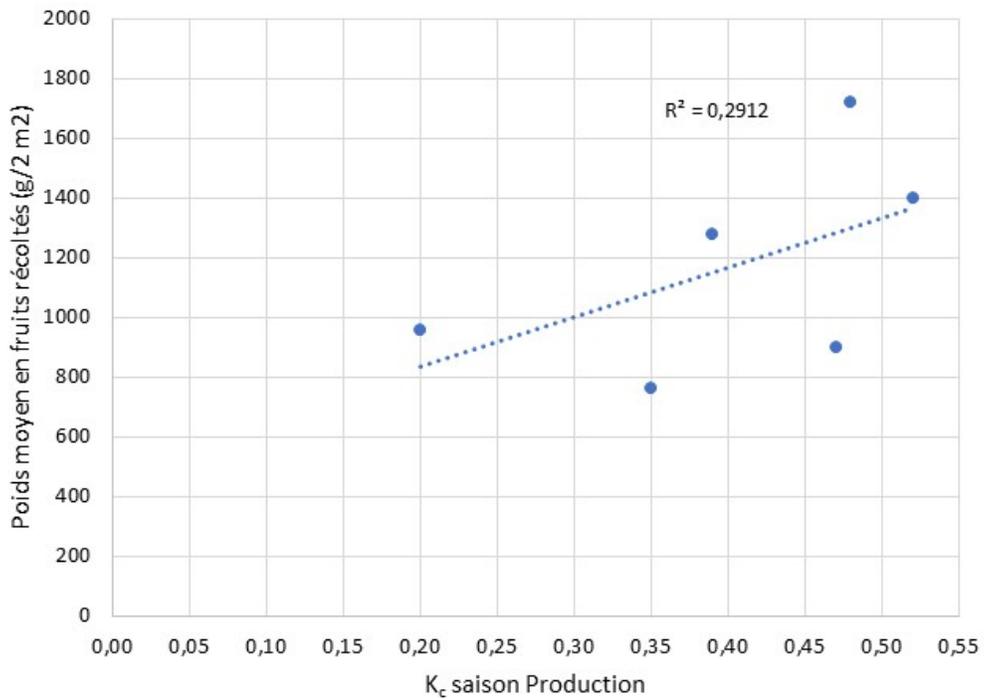


Figure 23. Relation entre le K_c moyen obtenu en saison de production et le poids en fruits récolté pour un champ donné.

Le bilan hydrique comme outil d'aide à la décision

Deux bilans hydriques ont été réalisés avec les données d' ET_p (moment présent, formule standardisée courte de Penman-Montheith) et de pluviométrie mesurée lors de la saison 2017 au site Ascension-de-Notre-Seigneur. Comme toutes les variables météorologiques étaient disponibles pour le moment présent, l'équation P-M a été utilisée, car cette dernière est préférable à celle de Baier-Robertson modifiée. La période considérée débute le 5 juin et se termine le 16 septembre. Les K_c utilisés sont ceux estimés pour le champ en végétation (Tableau 16). Le premier bilan hydrique a été réalisé en considérant une RFU du sol de 20 mm et le second avec une RFU de 40 mm.

Les deux bilans ont pu débiter avec une RFU comblée à 100 % étant donné l'historique des précipitations. Les 26 premiers jours de l'exercice, pour le bilan dont le sol a une RFU de 20 mm, sont présentés au Tableau 39. Les jours suivants sont présentés au Tableau 52 en annexe. Aussi, le bilan hydrique réalisé avec un sol dont la RFU est de 40 mm est présenté au Tableau 53 en annexe.

- Le 5 juin au matin la RFU est de 20 mm.
- L' ET_p estimée pour la journée a été de 4,8 mm et le K_c utilisé est de 0,38.
- L' ET_c où le prélèvement en eau de la culture a par conséquent été de 1,8 mm (4,8 mm x 0,38)
- Aucune précipitation n'a été enregistrée
- La RFU en fin de journée est donc de 18,2 mm

Quoique le bilan hydrique soit près de 0 mm (pour la RFU de 20 mm) pour le 17 juin, le 31 juillet et le 1^{er} août, des précipitations ont permis de rétablir partiellement la réserve facilement utilisable en eau du sol. Aucune situation de stress hydrique n'a été révélée par cet exercice. Une RFU de 40 mm permet de retenir davantage d'eau provenant des précipitations, conséquemment, le bilan ne s'est jamais rapproché de 0. Dans un contexte où le bilan hydrique est utilisé comme outil d'aide à la décision pour déclencher un épisode d'irrigation, l'apport devrait débiter lorsque le bilan atteint 0 mm.

Cet exercice démontre aussi qu'une proportion des précipitations reçues ne sont pas valorisables par la culture. Il y a plus d'un facteur à considérer pour évaluer cette proportion, mais seulement en excluant la hauteur d'eau qui excède la capacité de rétention du sol au moment de l'apport, 159,1 mm, sur les 284,8 mm reçus ne peuvent pas être valorisés par la culture (Tableau 38). Par exemple, 48 mm de pluie ont été mesurés le 18 juin. À ce moment et en considérant le prélèvement en eau de la culture lors de cette journée, le sol ne pouvait retenir que 18,9 mm. La RFU considère entre autres la profondeur racinaire de la culture, les 23,1 mm restants étant hors de portée du système racinaire. L'ensemble des valeurs qui a mené à la production du Tableau 38 est présenté en annexe au Tableau 52.

Si la RFU à 20 mm avait été complètement utilisée, l'exercice aurait pu démontrer que l'efficacité des précipitations peut être plus élevée avec une RFU plus élevée.

Tableau 38. Précipitations totales, mesurées du 5 juin au 16 septembre 2017 à L'Ascension-de-Notre-Seigneur et précipitations ayant un potentiel d'être valorisées.

Précipitations (mm)		
Totales	Valorisables	Non-valorisables
284,8	125,7	159,1

Tableau 39. Bilan hydrique réalisé avec un sol dont la RFU est de 20 mm avec les K_c et l' ET_p estimés et les précipitations mesurées et valorisables du 5 au 30 juin 2017 - Champ 1 en Végétation - Ascension-de-Notre-Seigneur.

Date Juin	RFU (mm)	ET_p (mm)	K_c	ET_c (mm)	Précipitations (mm)		RFU (mm)
					Totales	Valorisables	
	Début de journee						Fin de journee
5	20,0	4,8	0,38	1,8	0,0	0,0	18,2
6	18,2	5,4	0,38	2,1	0,0	0,0	16,1
7	16,1	6,1	0,38	2,3	0,0	0,0	13,8
8	13,8	6,4	0,38	2,4	0,0	0,0	11,4
9	11,4	5,0	0,38	1,9	0,0	0,0	9,5
10	9,5	5,1	0,38	1,9	0,0	0,0	7,5
11	7,5	6,1	0,38	2,3	2,0	2,0	7,2
12	7,2	2,7	0,38	1,0	2,2	2,2	8,4
13	8,4	6,5	0,38	2,5	0,0	0,0	5,9
14	5,9	3,5	0,38	1,3	0,0	0,0	4,6
15	4,6	4,9	0,38	1,9	0,0	0,0	2,7
16	2,7	1,6	0,38	0,6	0,2	0,2	2,3
17	2,3	3,2	0,38	1,2	0,4	0,4	1,5
18	1,5	1,1	0,38	0,4	42,0	18,9	20,0
19	20,0	4,7	0,38	1,8	0,2	0,2	18,4
20	18,4	3,7	0,38	1,4	4,6	3,0	20,0
21	20,0	2,5	0,38	1,0	0,8	0,8	19,8
22	19,8	5,3	0,38	2,0	0,0	0,0	17,8
23	17,8	1,7	0,38	0,7	18,2	2,8	20,0
24	20,0	3,5	0,38	1,3	0,2	0,2	18,9
25	18,9	5,5	0,38	2,1	0,0	0,0	16,8
26	16,8	4,8	0,38	1,8	0,0	0,0	15,0
27	15,0	2,8	0,38	1,1	0,0	0,0	13,9
28	13,9	2,8	0,38	1,1	6,0	6,0	18,9
29	18,9	5,1	0,38	1,9	0,0	0,0	16,9
30	16,9	3,1	0,38	1,2	0,4	0,4	16,1

Volet 2. Impact d'un climat en évolution sur le synchronisme fleur-gel et le bilan hydrique

Amélioration des estimations de l'ET_p et intégration dans le calcul du bilan hydrique

Afin de comparer la performance du nouveau modèle de calcul de l'ET_p, les équations Baier-Robertson (BR) et Rochette ont été utilisées. Comme il est possible de constater au Tableau 40, qui regroupe l'ensemble des années et régions, le modèle BR modifié correspond bien aux valeurs de référence de Penman-Monteith (PM-ASCE). À titre d'exemple, les estimations des modèles sont illustrées pour les mois de juin et juillet 2016 à L'Acadie à la Figure 24 et Figure 25. Il est possible de voir dans ces figures que le modèle BR modifié est beaucoup plus efficace les jours de pluie que les équations BR et Rochette. Toutefois, comme illustré à la mi-juin 2016 (Figure 24), le modèle BR modifié a sous-estimé les valeurs d'ET_p par rapport à PM-ASCE, car il n'intègre pas les mesures de vitesse du vent comme variable explicative. Ainsi, pour les jours où les vitesses de vent sont particulièrement élevées, il serait nécessaire d'augmenter en mode opérationnel les valeurs d'ET_p quotidiennes pour mieux représenter les valeurs réelles.

Ces nouveaux modèles d'estimation de l'ET_p quotidienne (BR modifié - mois de mars à octobre) ont été implantés dans le logiciel CIPRA et ont été utilisés comme intrant dans le modèle de bilan hydrique et d'estimation du rendement du bleuet nain au Saguenay Lac-Saint-Jean dans le cadre de ce projet.

Tableau 40. Statistiques comparatives des différents modèles pour les mois principaux de production des cultures végétales (mai à septembre) par rapport à l'équation Penman-Monteith (PM-ASCE).

Modèles	Erreur quadratique (RMSE)	Qualité de la concordance (EF)
Baier-Robertson (BR)	1,85	-0,29
Rochette	1,51	0,13
BR modifié (mars à octobre)	0,57	0,88
BR modifié (1 éq. par mois)	0,51	0,90

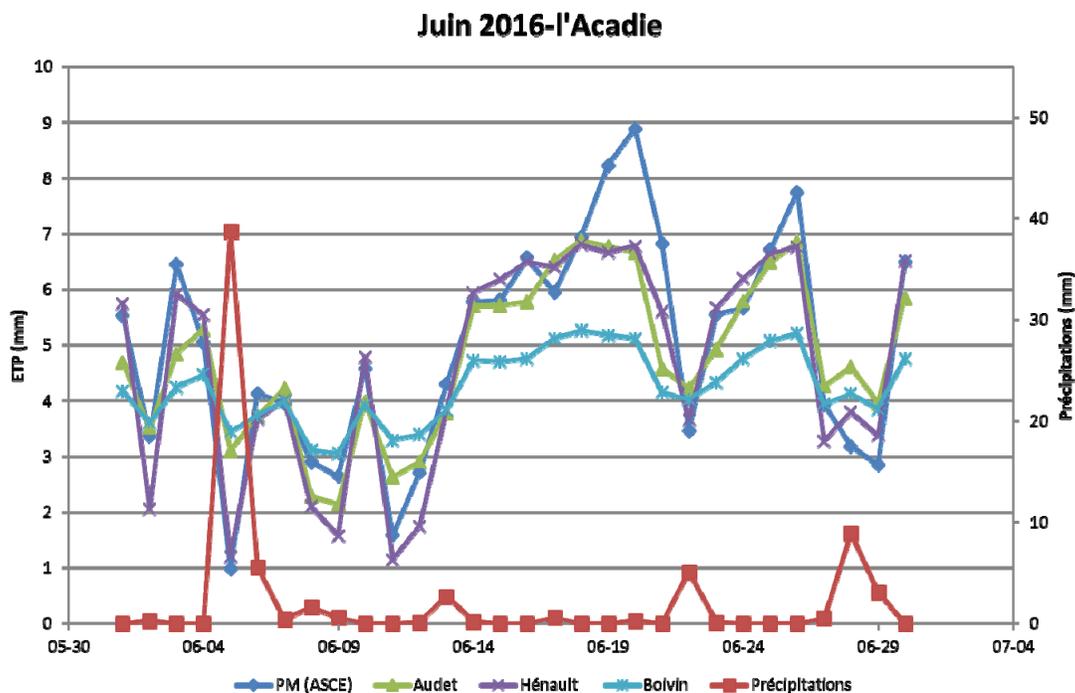


Figure 24. Performance de quatre modèles à estimer l'ET_p (L'Acadie, juin 2016) : Penman-Monteith (PM-ASCE), Baier-Robertson, Rochette et Baier-Robertson modifié (Hénault).

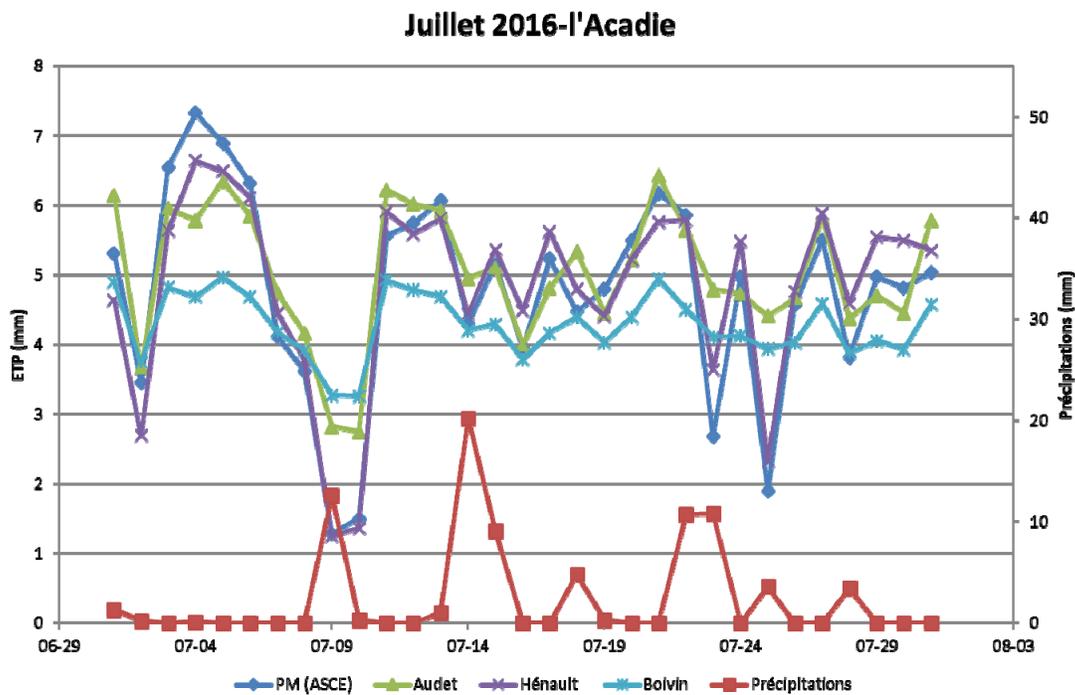


Figure 25. Performance de quatre modèles à estimer l'ET_p (l'Acadie, juillet 2016) : Penman-Monteith (PM-ASCE), Baier-Robertson, Rochette et Baier-Robertson modifié (Hénault).

Modèle bioclimatique pour le développement phénologique du bleuet nain

Pour le modèle phénologique du bleuet nain, les degrés-jours déterminés pour chaque seuil au moyen de la méthode de calcul des degrés-jours sinus simple de Baskerville sont présentés au Tableau 41. La moyenne du cumul de degrés-jours pour l'atteinte de l'initiation de la floraison (BBCH 51) est de 204 DJ. Les degrés-jours pour ce stade varient entre 187 et 221 DJ. La moyenne du cumul de degrés-jours pour l'atteinte de la pleine floraison (BBCH 65) est de 526 DJ. Les degrés-jours pour ce stade varient entre 498 et 554 DJ. La moyenne du cumul de degrés-jours pour le début du développement des fruits (BBCH 71) est de 748 DJ. Les degrés-jours pour ce stade varient entre 720 et 777 DJ. Finalement, la moyenne du cumul de degrés-jours pour l'atteinte de la pleine maturité des fruits (BBCH 87) est de 1480 DJ. Les degrés-jours pour l'atteinte de ce stade varient entre 1443 et 1516 DJ. La différence entre les degrés-jours calculés à partir du couvert de neige et ceux calculés à partir du 1^{er} mars n'est pas très marquée et relativement constante pour l'ensemble des stades. Toutefois, le modèle utilisant la date du dernier 10 cm de neige a été retenu pour les prochaines étapes de cette étude.

Tableau 41. Degrés-jours pour l'atteinte des différents seuils

Seuils (BBCH)	Degrés-jours pour chacun des modèles		
	1^{er} mars	10 cm de neige	Moyenne
51	221	187	204
53	296	247	272
55	329	285	307
59	410	358	384
65	554	498	526
67	603	548	576
71	777	720	748
75	982	926	954
81	1138	1083	1110
87	1516	1443	1480

Les statistiques comparatives entre les différents stades phénologiques prédits par des modèles de cumul des degrés-jours pour le bleuet nain et les observations du RAP sont présentées au Tableau 42. Pour le modèle de cumul des degrés-jours à partir du 1^{er} mars, les RMSE varient entre 5,1 et 12,5 jours et les EF varient de -5,78 à 0,62. Pour le modèle de cumul des degrés-jours à partir du seuil de 10 cm de neige, les RMSE varient entre 5,2 et 12,4 jours et les EF varient de 0,39 à 0,90, ce qui est supérieur au modèle démarrant le 1^{er} mars.

Tableau 42. Statistiques comparatives pour les modèles de prédictions des stades phénologiques du bleuet nain.

BBCH	N ¹	À partir du 1 ^{er} mars		À partir de 10 cm Neige	
		RMSE ¹	EF ¹	RMSE	EF
51	69	7,1	0,14	8,4	0,66
53	69	5,4	0,56	5,8	0,84
55	69	5,1	0,59	5,5	0,86
59	69	5,2	0,50	5,2	0,88
65	68	6,2	0,42	6,2	0,85
67	68	6,4	0,45	6,2	0,85
71	65	5,8	0,62	5,7	0,89
75	59	5,8	0,57	5,9	0,90
81	52	9,2	0,11	9,0	0,77
87	11	12,5	-5,78	12,4	0,39

¹RMSE: Erreur quadratique (jours); EF: Efficience du modèle; N: Nombre de paires d'observations et prédictions.

Les modèles étudiés donnent des résultats fort acceptables comme en témoignent les statistiques de RMSE et EF. Le modèle de cumul à partir d'un couvert de 10 cm de neige est le plus précis. La RMSE moyenne de ce modèle est de 7,0 jours et le EF moyen est de 0,79. Bien que plus précis, ce modèle requiert les données météorologiques de l'année précédente de la station météo sélectionnée afin de calculer la hauteur du couvert végétal et ce, à partir du 1^{er} septembre. Afin d'être utilisé avec CIPRA, un module est disponible pour déterminer la dernière date où le couvert de neige est supérieur ou égal à 10 cm. Il est possible de fournir manuellement la date d'observation de couverture de neige si disponible. Les deux modèles ont été intégrés dans CIPRA et prochainement dans Agrométéo Québec. Ces modèles pourront donc être utilisés pour l'ensemble des régions productrices de bleuets nains au Québec.

Modèle bioclimatique pour la prédiction du rendement potentiel du bleuet nain

Tel que décrit dans la méthodologie, afin de prendre en compte la progression temporelle de la prédiction du rendement potentiel, l'approche de modélisation bioclimatique a été divisée en une série de modèles. Les calculs commencent à la date qui correspondrait à la récolte de l'année précédente avec comme seule variable de bilan hydrique et se termine lorsque la maturité des fruits est atteinte avec huit autres variables. Les variables s'ajoutent entre temps à différents moments de l'année (voir Tableau 7). Les neuf variables suivantes ont été conservées pour la série de modèles de prédiction du rendement du bleuet nain (en ordre chronologique) :

- NFR-BH (i -1) : Bilan hydrique du sol de l'année précédente à la période qui correspondrait à la formation des fruits.
- A-GN<10 : Nombre de jours de gel avec moins de 10 cm de neige au sol à l'automne avant que la température du sol (5 cm) se stabilise.
- XNEIG3 : Épaisseur de neige maximale au mois de mars.
- PAD-T2.5T : Nombre de jours de gel total (gel réel et potentiel) avant le débourrement.
- PDF-T0 : Nombre de jours de gel réel du débourrement à la floraison.
- DFF-CT0 : Cumul de températures pondérées durant la période de floraison.
- PFL-T2.5T : Nombre de jours de gel total (gel réel et potentiel) durant la période de floraison.
- FL-PPT : Précipitations moyennes durant la floraison.
- NFR-BH : Bilan hydrique du sol durant la période de formation des fruits.

Pour le modèle le plus complet, soit celui correspondant au jour suivant le stade « Fruit mature-récolte », les variables ayant la plus forte corrélation avec le rendement sont DFF-CT0, PFL-T2.5T et XNEIG3. NFR-BH (i -1) et PDF-T0 sont les variables qui ont la plus faible corrélation avec le rendement. Les deux premiers modèles ne sont pas significatifs à un seuil de 0,05 ce qui sous-entend que les rendements ne seraient pas affectés par NFR-BH (i -1) et A-GN<10 de l'année précédente. Le modèle gagne en significativité à partir du modèle du 1er avril grâce à l'ajout de la variable XNEIG3. Il a été indiqué que le modèle devait contenir au minimum deux variables, alors NFR-BH (i -1) a été exclu du modèle selon la statistique d'AIC de Akaike. La variable XNEIG3 ajoute une certaine variabilité aux rendements en comparaison au modèle de l'automne. Les modèles du début du débourrement et du début de la floraison restent semblables au modèle précédent, à l'exception que le second n'est plus significatif à un seuil de 0,05. Encore une fois, NFR-BH (i -1) est exclu des modèles. L'ajout des variables DFF-CT0, PFL-T2.5T et FL-PPT au modèle du début de la nouaison fait augmenter le pourcentage de la variabilité expliquée par le modèle à 59,9% et est significatif au seuil de 0,001. Les rendements prédits se rapprochent des rendements observés (Figure 26). Il a été convenu que le modèle devait contenir au minimum quatre variables et le modèle en a conservé six selon la statistique d'AIC de Akaike. C'est NFR-BH (i -1) et PAD-T2.5T qui ont été exclus. Pour le modèle le plus complet, c'est-à-dire à la récolte, c'est sensiblement la même chose à l'exception que le modèle contient la variable NFR-BH (Figure 27). Les sept variables du modèle expliquent 63,6% de la variabilité du rendement à un seuil de 0,001.

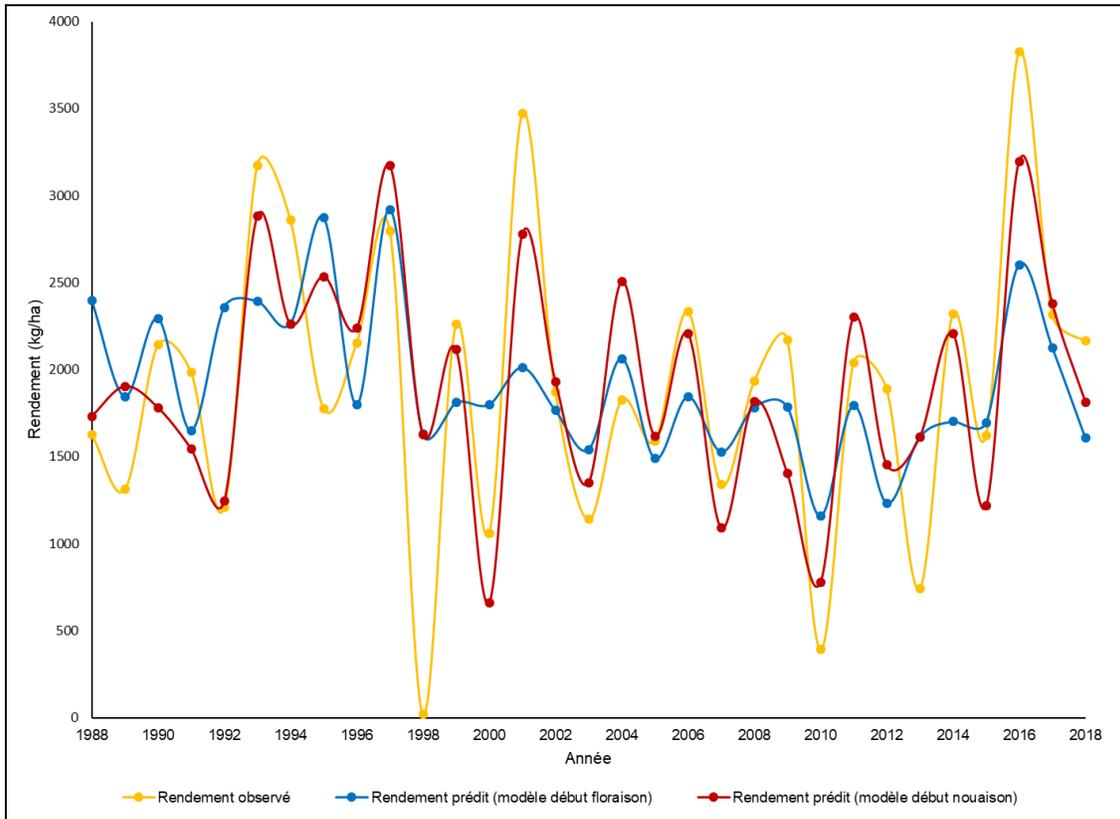


Figure 26. Rendements observés et rendements prédits de bleuets nains au Saguenay-Lac-Saint-Jean de 1988 à 2018 par les modèles du début de floraison et de la nouaison.

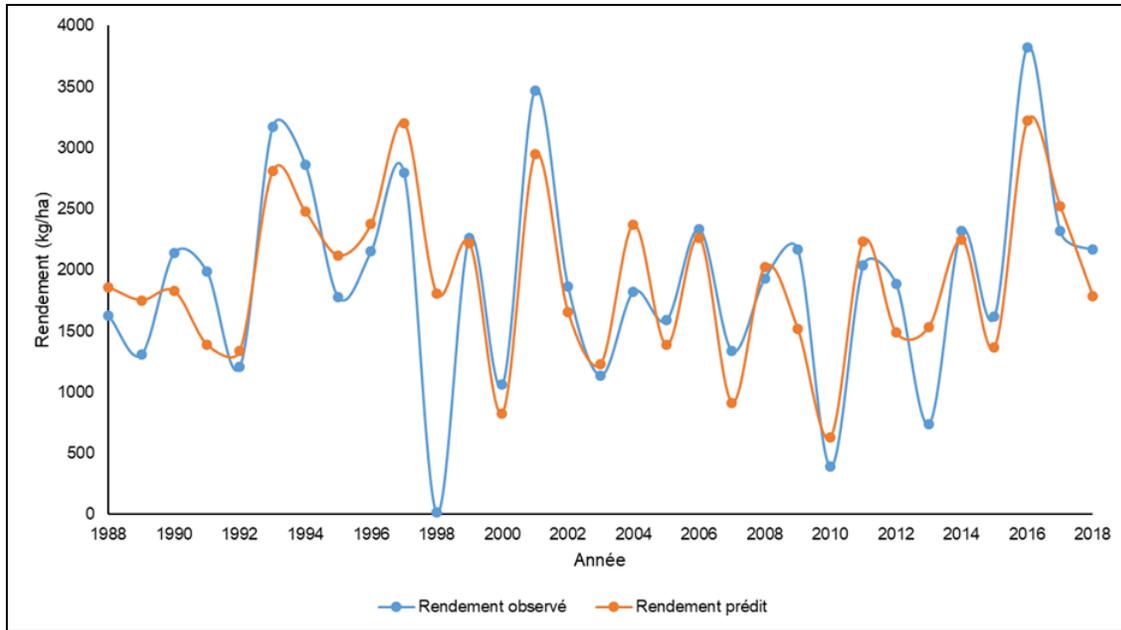


Figure 27. Rendements observés et rendements prédits de bleuets nains au Saguenay-Lac-Saint-Jean de 1988 à 2018 par le modèle final.

Dans l'ensemble les rendements prédits à la récolte sont assez similaires aux rendements observés. Par contre, pour les années 1991, 1998, 2009, 2013 et 2016, il y a un écart entre les rendements observés et les prédictions. En 1998 et en 2013, le rendement estimé par le modèle est supérieur au rendement observé de 1772 et 793 kg/ha, respectivement. Pour les trois autres années, les prédictions sont inférieures aux rendements observés d'environ 600 kg/ha. Les rendements prédits varient entre 628 et 3222 kg/ha, alors que les rendements réels varient entre 19 et 3826 kg/ha. Pour l'année 1998, le modèle a estimé un rendement largement supérieur à la réalité. Il semble qu'un gel des fleurs à $-3,5^{\circ}\text{C}$ durant le stade pleine floraison du bleuets nain aurait causé des pertes de rendement très importantes, puisque les fleurs exposées à cette température ne produisent pas de fruits (Hicklenton et coll., 2002). Un gel majeur comme en 1998 n'est pas pris en compte par le modèle. D'ailleurs, en retirant l'année 1998 de l'analyse, le modèle expliquerait 82,4% de la variabilité du rendement. En 2013, le rendement prédit était aussi supérieur à celui qui a été observé. Il y a eu deux jours où la température minimum de l'air a été de $0,3$ et $0,2^{\circ}\text{C}$ durant les stades boutons floraux et pleine floraison. Étant donné que ce sont des températures de gel potentiel, elles ne sont pas totalement prises en compte par les variables météo sélectionnées. Il est plus difficile d'expliquer des prédictions inférieures aux rendements observés, comme en 1991, 2009 et 2016. En 2009, il y a eu dix jours de gel d'intensité modérée du débourrement au début de la floraison donc peut-être qu'il y a eu peu de dommages. Même si le rendement prédit en 2016 est inférieur de 604 kg/ha au rendement observé, il est le rendement annuel prédit le plus élevé tout comme dans la réalité.

Indices associés à la couverture de neige pour la culture du bleuets nain au Saguenay Lac-St-Jean en climat actuel (1981-2010) et futur (2041-2070).

Cinq indices associés à la couverture de neige ont été retenus et analysés en climat actuel et futur afin d'évaluer l'impact des changements sur la protection hivernale des plants de bleuets et sur les dommages potentiels associés à une réduction de cette protection. Ces indices sont présentés au Tableau 43 et les points importants à noter sont énoncés ci-dessous. Les différences fournies entre le climats actuel et futur sont calculées à partir des valeurs centrales (moyennes) de chacun des intervalles obtenus des cartes pour la région productrice de bleuets nain du Saguenay Lac-St-Jean.

- La couverture de neige > 10 cm à l'automne serait atteinte de 20 à 38 jours plus tard.
- La couverture de neige > 10 cm au printemps disparaîtrait de 6 à 25 jours plus tôt.
- La durée de la couverture de neige > 10 cm pendant la période hivernale serait plus courte de 20 à 40 jours.
- Le nombre de jours avec une couverture de neige < 10 cm pendant la période hivernale augmenterait de 19 à 38 jours, ce qui devrait augmenter les risques de dommages hivernaux en bleuetières.
- Le nombre de jours où la température du sol à 5 cm < -5°C pendant la période hivernale augmenterait de 0 à 6 jours, ce qui devrait augmenter les risques de dommages hivernaux en bleuetières.

Tableau 43. Indices associés à la couverture de neige pour la culture du bleuets nain au Saguenay-Lac-Saint-Jean en climat actuel (1981-2010) et futur (2041-2070)

Indices	Climat de référence (1981-2010)	Scénario CC inférieur (2041-2070)	Scénario CC supérieur (2041-2070)
Dates du premier 10 cm de neige à l'automne	8/11 - 17/11	28/11 - 6/12	17/12 - 25/12
Dates du dernier 10 cm de neige au printemps *	13/04 - 24/04 (Figure 28)	1/04 - 24/04 (Figure 29)	21/03 - 31/03 (Figure 30)
Durée du 10 cm de neige pendant la période hivernale (jrs)	151 - 170	130 - 150	110 - 129
Nombre de jours où neige < 10 cm pendant la période hivernale	34 - 52	53 - 71	72 - 90
Nombre de jours où T _{sol} < -5°C pendant la période hivernale	2,1 - 6,0	2,1 - 4,0	8,1 - 12,0

*Indice illustré sous forme de carte du Québec agricole.

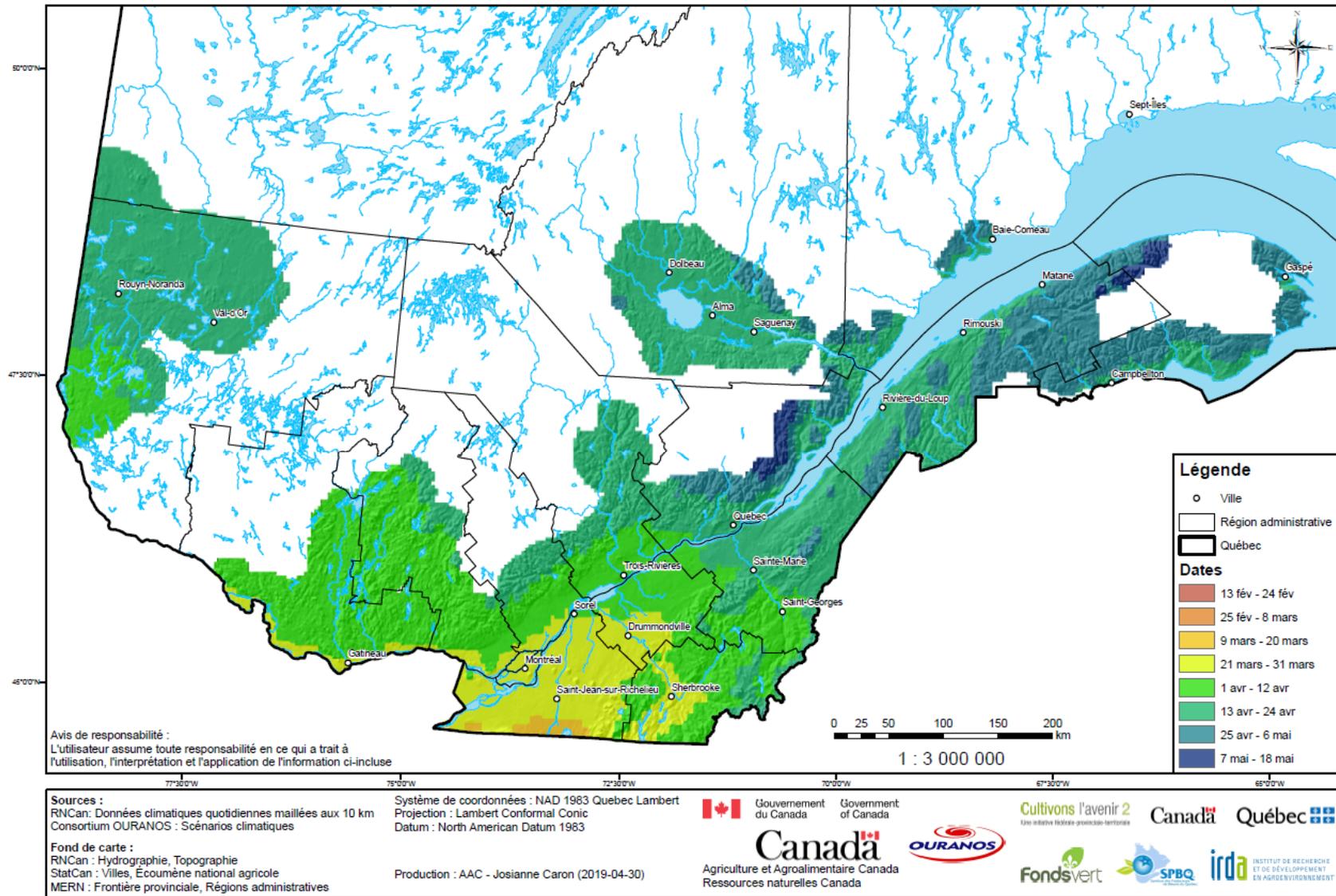


Figure 28. Dates moyennes d'atteinte du dernier 10 cm de neige au printemps sur la période 1981-2010.

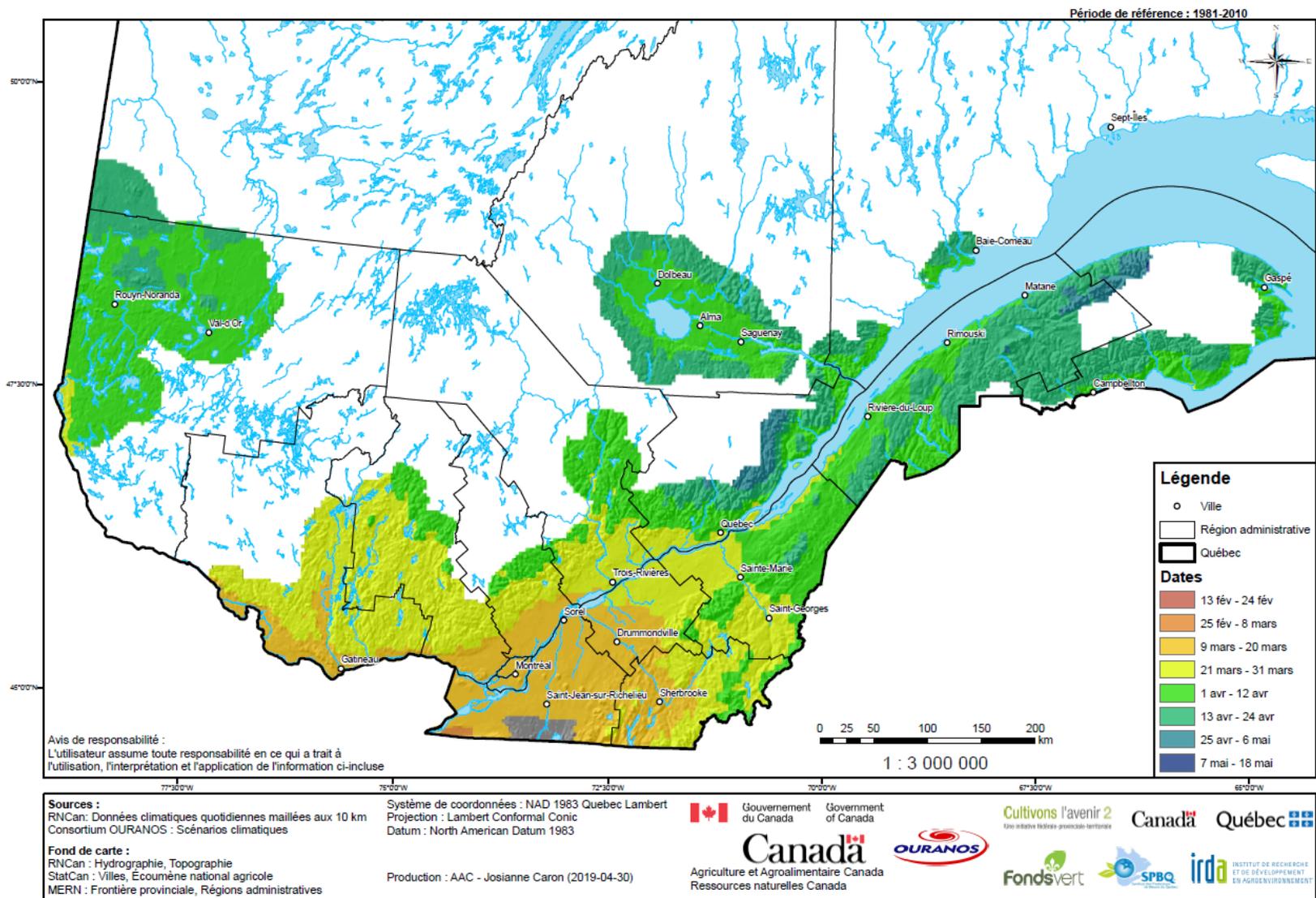


Figure 29. Dates moyennes d'atteinte du dernier 10 cm de neige au printemps : Scénario de changement inférieur (2041-2070).

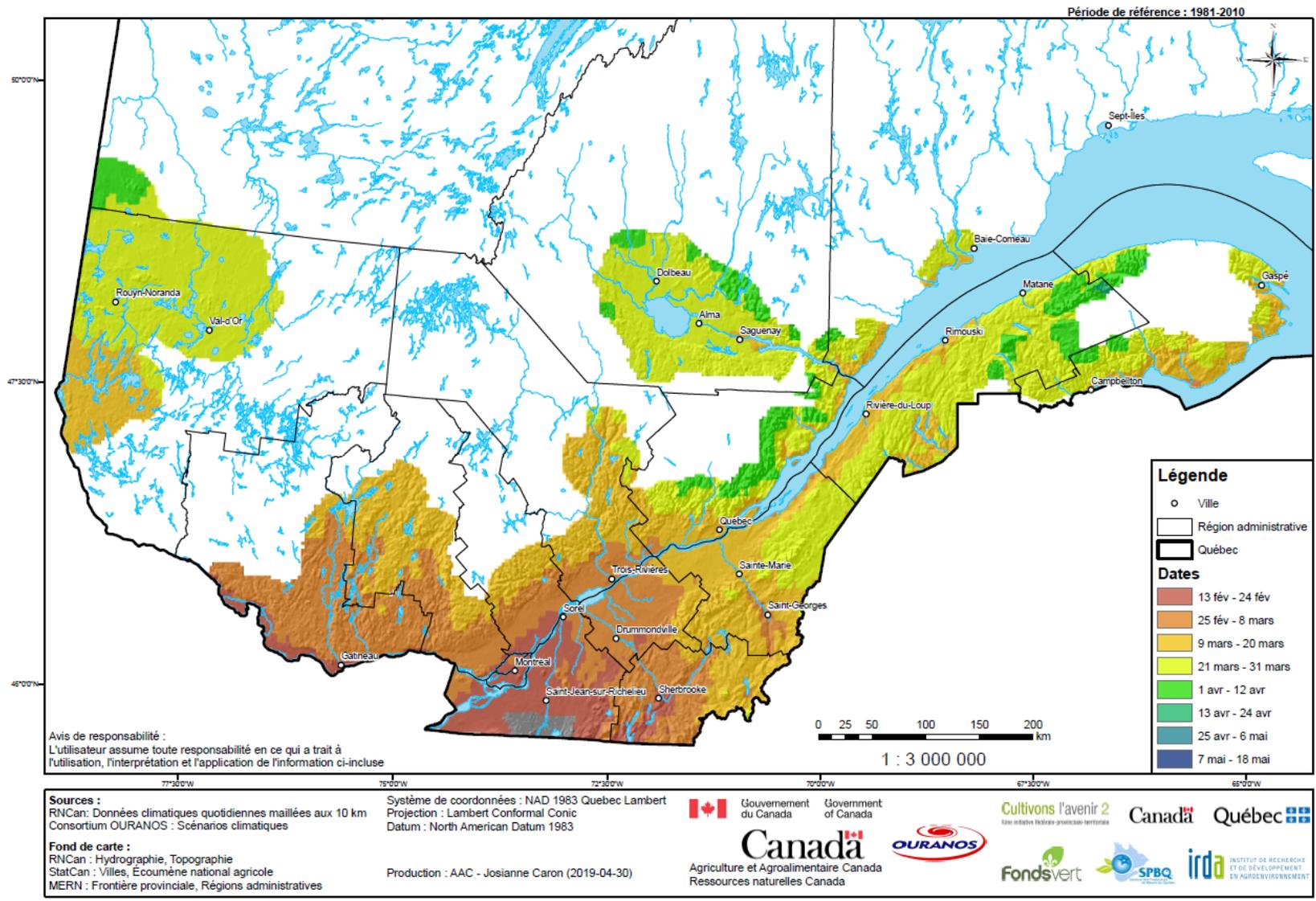


Figure 30. Dates moyennes d'atteinte du dernier 10 cm de neige au printemps : Scénario de changement supérieur (2041-20170).

Indices associés à la phénologie de la culture du bleuet nain au Saguenay Lac-St-Jean en climat actuel (1981-2010) et futur (2041-2070).

Deux indices associés à la phénologie du bleuet nain ont été retenus et analysés en climat actuel et futur. Ces indices ont été choisis pour évaluer l'impact des changements climatiques sur le devancement du développement phénologique de cette culture. Ils sont présentés au Tableau 44 et les points importants à noter sont énoncés ci-dessous. Les différences fournies entre les climats actuel et futur sont calculées à partir des valeurs centrales (moyennes) de chacun des intervalles obtenus des cartes pour la région productrice de bleuets nains du Saguenay Lac-St-Jean.

- Les dates moyennes d'atteinte de la pleine floraison seraient atteintes de 9 à 32 jours plus tôt.
- Les dates moyennes d'atteinte de la maturité des fruits seraient atteintes de 12 à 40 jours plus tôt.

Tableau 44. Indices associés à la phénologie de la culture du bleuet nain au Saguenay Lac-St-Jean en climat actuel (1981-2010) et futur (2041-2070).

Indices	Climat de référence (1981-2010)	Scénario CC inférieur (2041-2070)	Scénario CC supérieur (2041-2070)
Dates moyennes de la pleine floraison *	9/06 - 17/06 (Figure 31)	31/05 - 8/06 (Figure 32)	3/05 - 20/05 (Figure 33)
Dates moyennes de maturité des fruits	14/08 - 24/08	2/08 - 13/08	29/06 - 21/07

*Indice illustré sous forme de carte du Québec agricole.

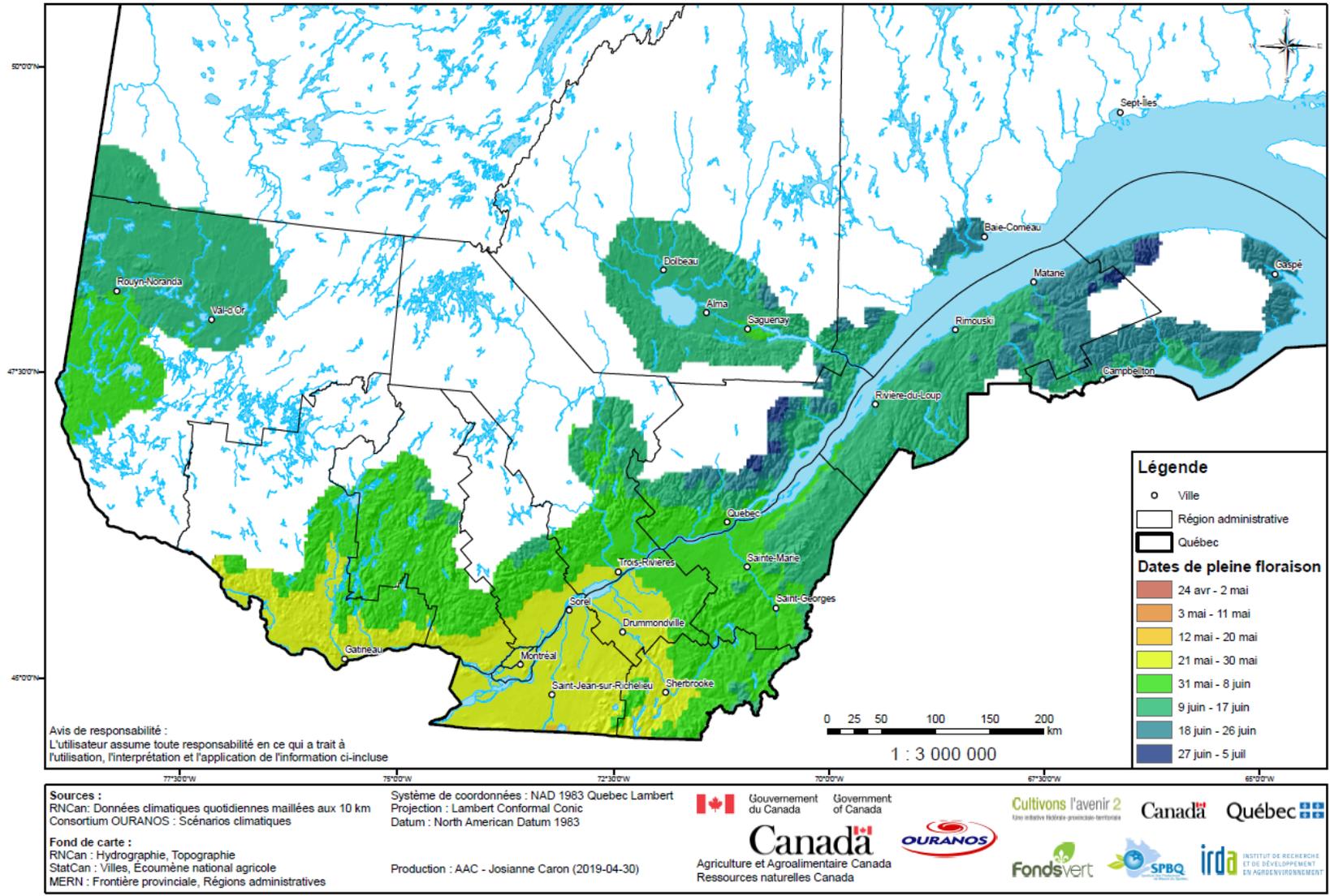


Figure 31. Dates moyennes de la pleine floraison chez le bleuet nain basées sur la période 1981-2010.

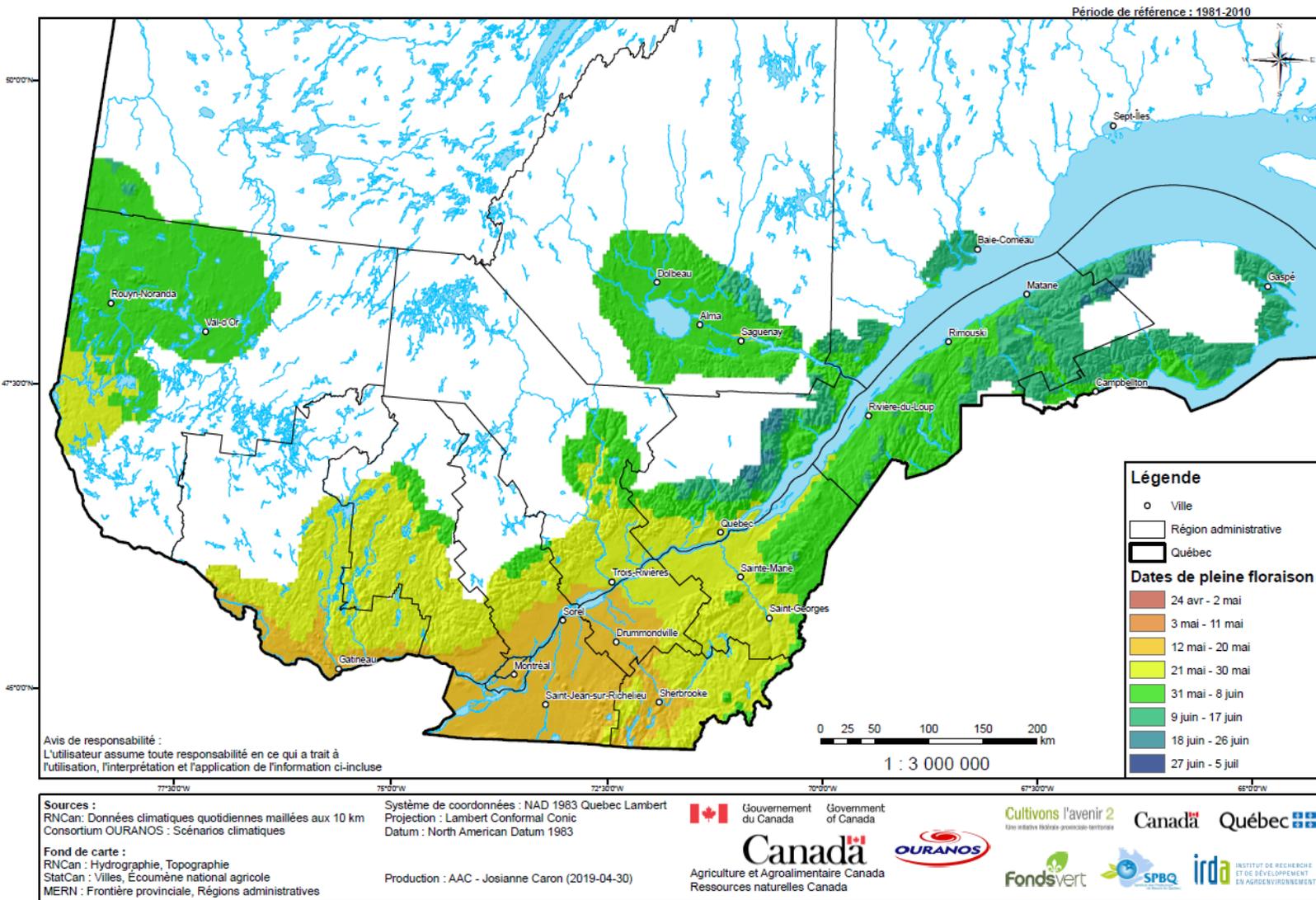


Figure 32. Dates moyennes de la pleine floraison chez le bleuet nain : Scénario de changement inférieur (2041-2070).

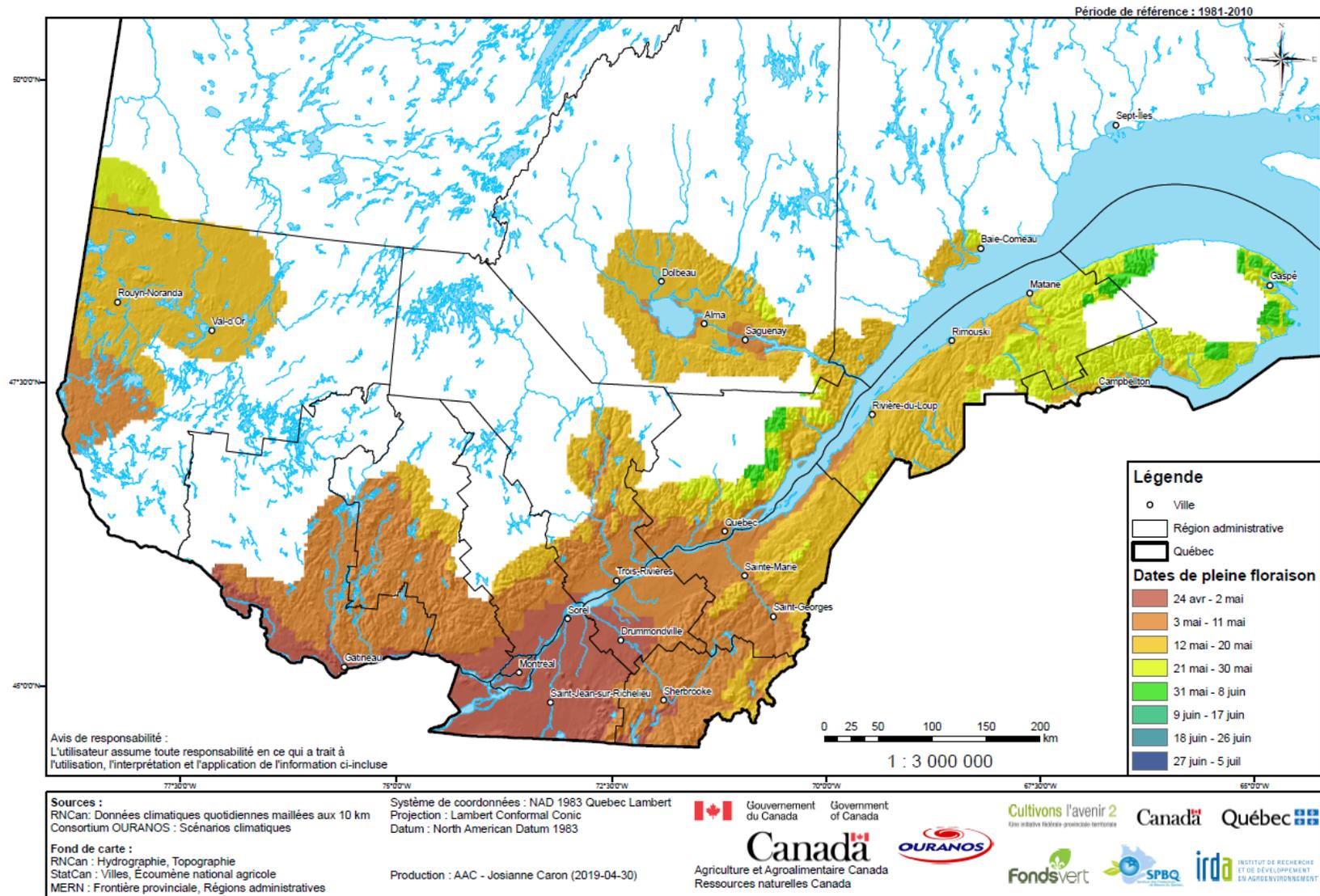


Figure 33. Dates moyennes de la pleine floraison chez le bleuet nain : Scénario de changement supérieur (2041-2070).

Indices associés aux risques de gel pour la culture du bleuets nain au Saguenay Lac-St-Jean en climat actuel (1981-2010) et futur (2041-2070).

Quatre indices associés aux risques de gel pour la culture du bleuets nain ont été retenus et analysés en climat actuel et futur. Les stades de floraison et de maturation du bleuets nain sont des stades critiques où des gels importants peuvent causer des réductions majeures dans le rendement et la qualité des fruits. Ces indices sont présentés au Tableau 45 et les points importants à noter sont énoncés ci-dessous. Les différences fournies entre le climat actuel et futur sont calculées à partir des valeurs centrales (moyennes) de chacun des intervalles obtenus des cartes pour la région productrice de bleuets nains du Saguenay Lac-St-Jean.

- Les dates du dernier gel printanier seraient devancées de 10 à 46 jours.
- Les dates du premier gel automnal seraient retardées 10 à 28 jours.
- Les risques de gel pendant les périodes de floraison et de maturation des fruits n'augmenteraient pas de façon importante. Des seuils de température de 0°C ont été sélectionnés pour tenir compte de la hauteur des mesures effectuées à la station météo, ce qui se traduit généralement par des températures inférieures à 0°C au niveau du couvert végétal.

Tableau 45. Indices associés aux risques de gel pour la culture du bleuets nain au Saguenay Lac-St-Jean en climat actuel (1981-2010) et futur (2041-2070).

Indices	Climat de référence (1981-2010)	Scénario CC inférieur (2041-2070)	Scénario CC supérieur (2041-2070)
Dates du dernier gel printanier *	19/05 - 10/06 (Figure 34)	19/05 - 30/05 (Figure 35)	3/04 - 25/04 (Figure 36)
Dates du premier gel automnal	3/09 - 21/09	13/09 - 1/10	11/10 - 20/10
Nombre de jours où T _{min} < 0°C pendant la floraison	1,0 - 1,9	0,0 - 0,9	1,0 - 2,9
Nombre de jours où T _{min} < 0°C pendant la maturation des fruits	0,0 - 0,9	0,0 - 0,9	0,0 - 0,9

*Indice illustré sous forme de carte du Québec agricole.

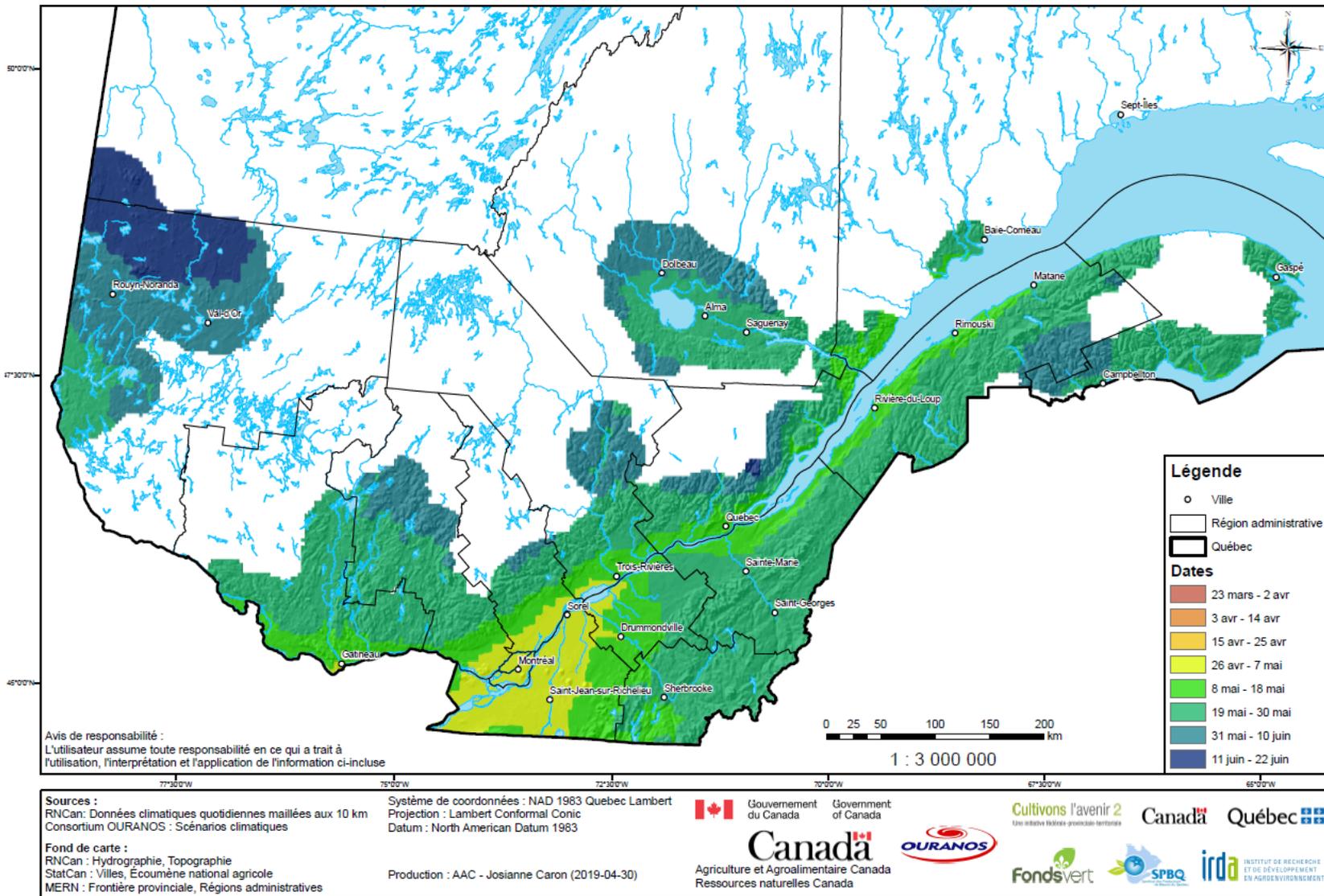


Figure 34. Dates moyennes du dernier gel printanier basées sur la période 1981-2010.

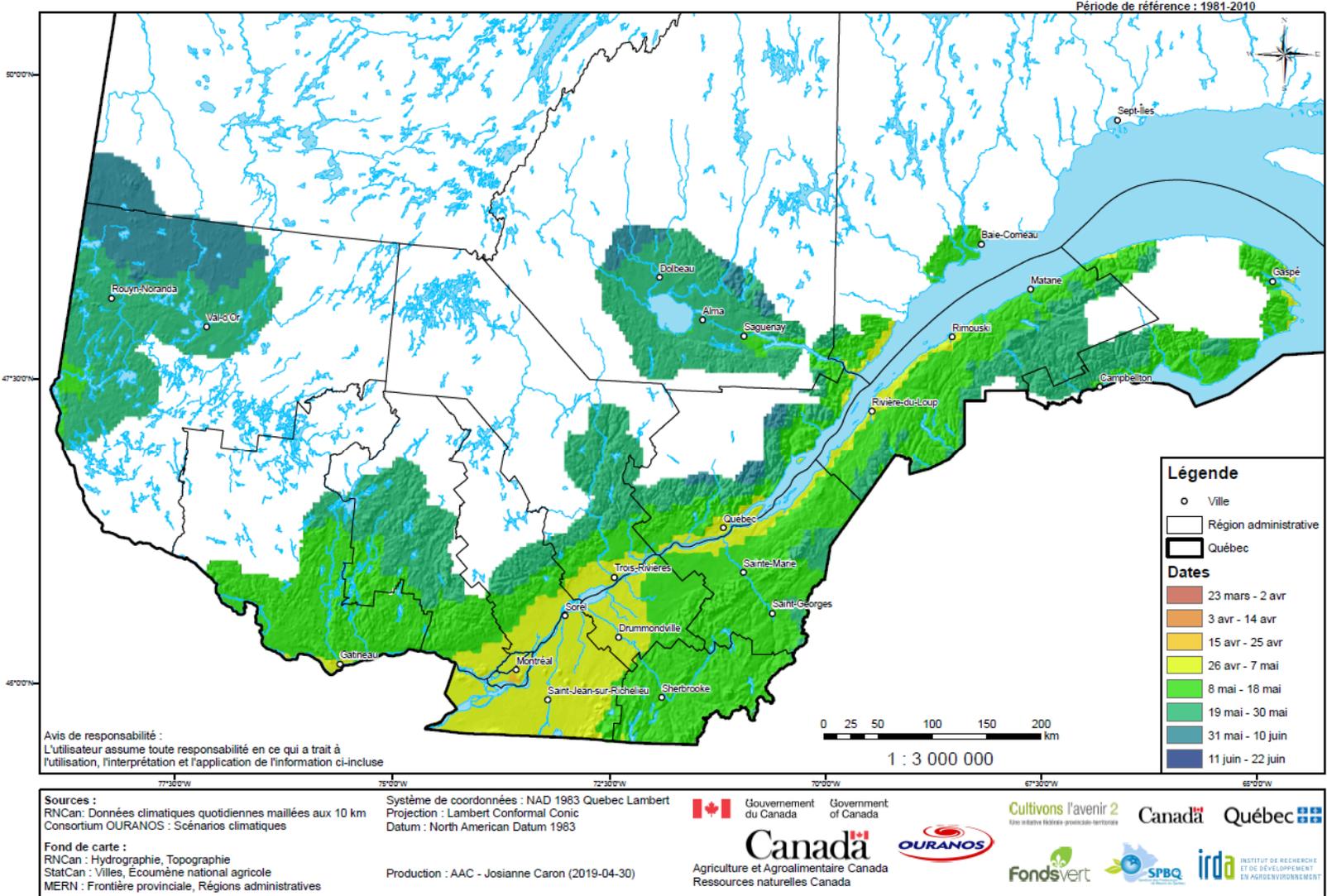


Figure 35. Dates moyennes du dernier gel printanier : Scénario changement inférieur (2041-2070).

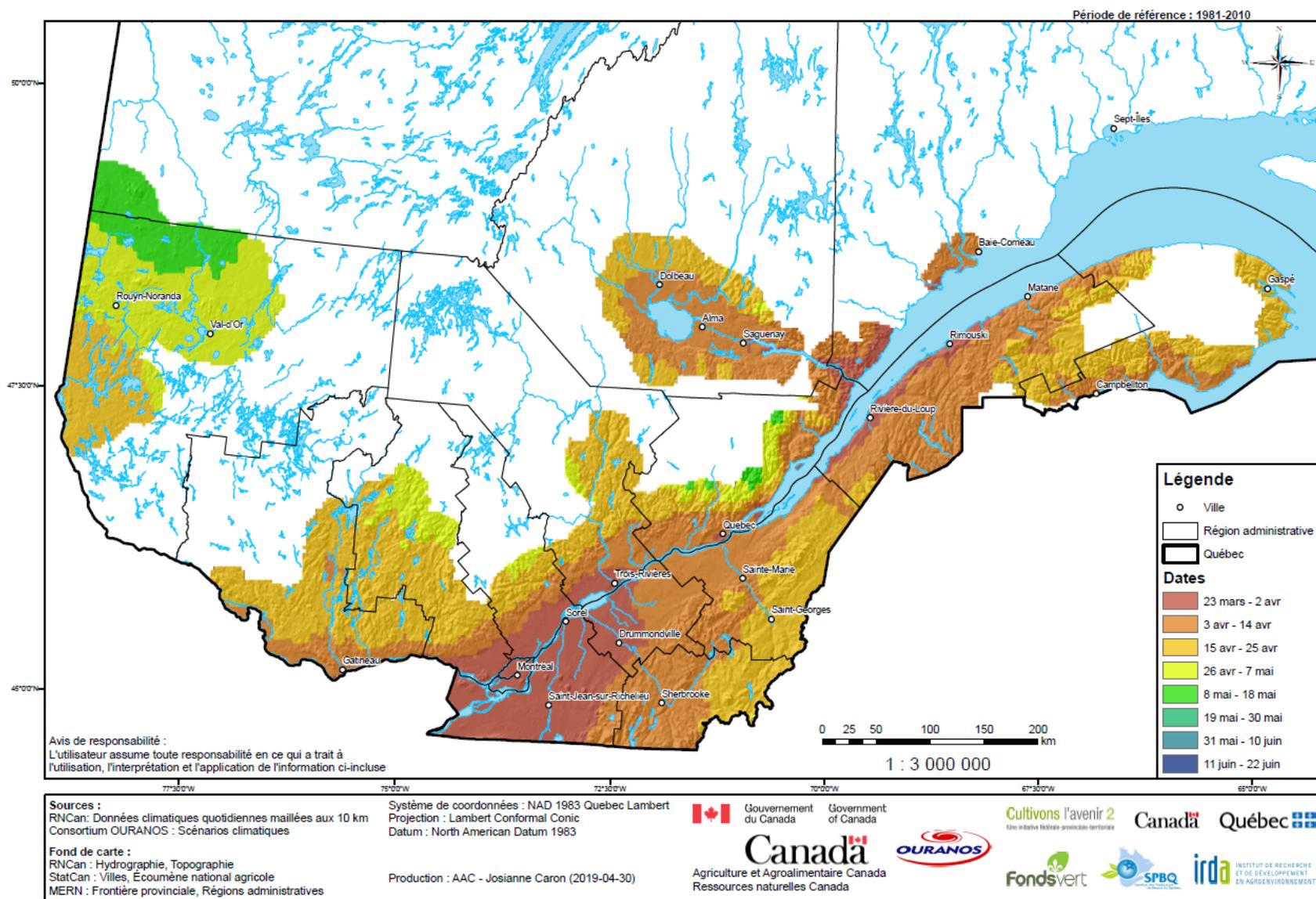


Figure 36. Dates moyennes du dernier gel printanier : Scénario changement supérieur (2041-2070).

Indices hydriques associés à l'année de production (période de la nouaison à la récolte) de la culture du bleuet nain au Saguenay Lac-St-Jean en climat actuel (1981-2010) et futur (2041-2070).

Six indices associés à l'année de production de la culture du bleuet nain ont été retenus et analysés en climat actuel et futur. Ces indices visent à évaluer l'impact des changements climatiques sur les quantités de précipitations, l'évapotranspiration moyenne calculée selon l'équation Baier-Robinson modifiée et le bilan hydrique du sol pendant l'année de production du bleuet nain. Ils sont présentés au Tableau 46 et les points importants à noter sont énoncés ci-dessous. Les différences fournies entre le climats actuel et futur sont calculées à partir des valeurs centrales (moyennes) de chacun des intervalles obtenus des cartes pour la région productrice de bleuets nains du Saguenay Lac-St-Jean.

- Le total des précipitations diminuerait de 0 à 32 mm.
- L'évapotranspiration quotidienne moyenne augmenterait de 0,4 à 1,0 mm/jour.
- Le bilan hydrique quotidien moyen diminuerait de 0,6 à 4,0 mm/jour avec une RFU de 20 mm et changerait -6,5 à +1,1 mm/jour avec une RFU de 40 mm.
- Le nombre de jours où le bilan hydrique quotidien serait de 0 mm augmenterait de 0,7 à 4,4 jours avec une RFU de 20 mm et de 0,0 à 2,5 jours avec une RFU de 40 mm.

Tableau 46. Indices hydriques associés à l'année de production (période de la nouaison à la récolte) de la culture du bleuet nain au Saguenay Lac-St-Jean en climat actuel (1981-2010) et futur (2041-2070).

Indices	Climat de référence (1981-2010)	Scénario CC inférieur (2041-2070)	Scénario CC supérieur (2041-2070)
Total des précipitations de la nouaison à la récolte (mm) *	125 – 156 (Figure 37)	91 – 124 (Figure 38)	125 – 156 (Figure 39)
Évapotranspiration quotidienne moyenne de la nouaison à la récolte (mm/jour) *	3,9 - 4,6 (Figure 40)	4,3 - 5,0 (Figure 41)	5,0 - 5,4 (Figure 42)
Bilan hydrique quotidien moyen (RFU = 20 mm, Kc = 0.45) de la nouaison à la récolte (mm/jour) *	11,5 - 14,9 (Figure 43)	11,5 - 13,8 (Figure 44)	8,1 - 10,4 (Figure 45)
Bilan hydrique quotidien moyen (RFU = 40 mm, Kc = 0.45) de la nouaison à la récolte (mm/jour)	26,4 - 32,9	28,6 - 32,9	19,9 - 26,4
Nombre de jours où le bilan hydrique = 0 mm de la nouaison à la récolte (RFU = 20 mm, Kc = 0.45) *	1,3 - 3,7 (Figure 46)	1,3 - 5,0 (Figure 47)	5,1 - 8,7 (Figure 48)
Nombre de jours où le bilan hydrique = 0 mm de la nouaison à la récolte (RFU = 40 mm, Kc = 0.45)	0,0 - 1,9	0,0 - 1,9	2,0 - 4,9

*Indice illustré sous forme de carte du Québec agricole.

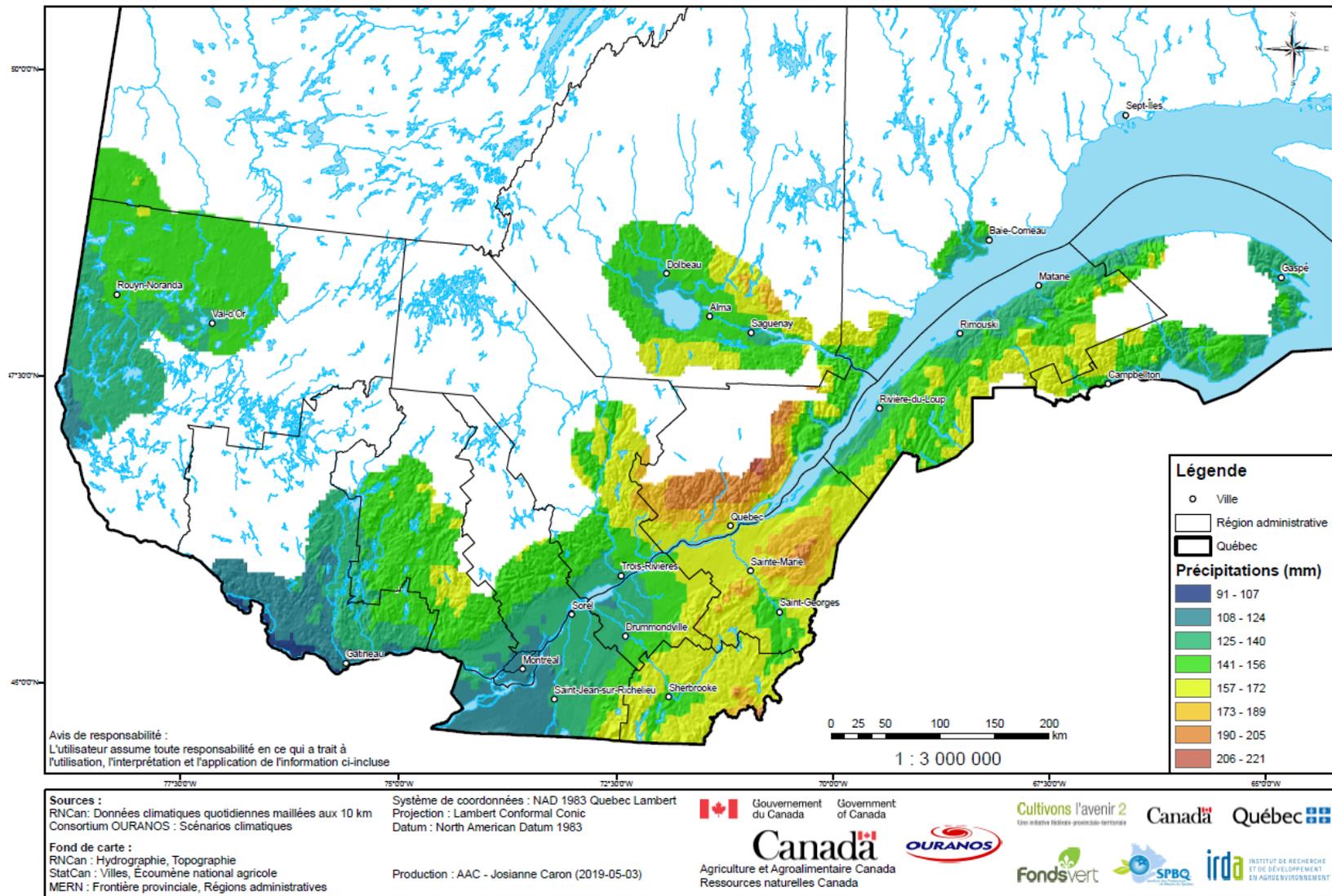


Figure 37. Total des précipitations de la nouaison à la récolte chez le bleuet nain, basé sur la période 1981-2010.

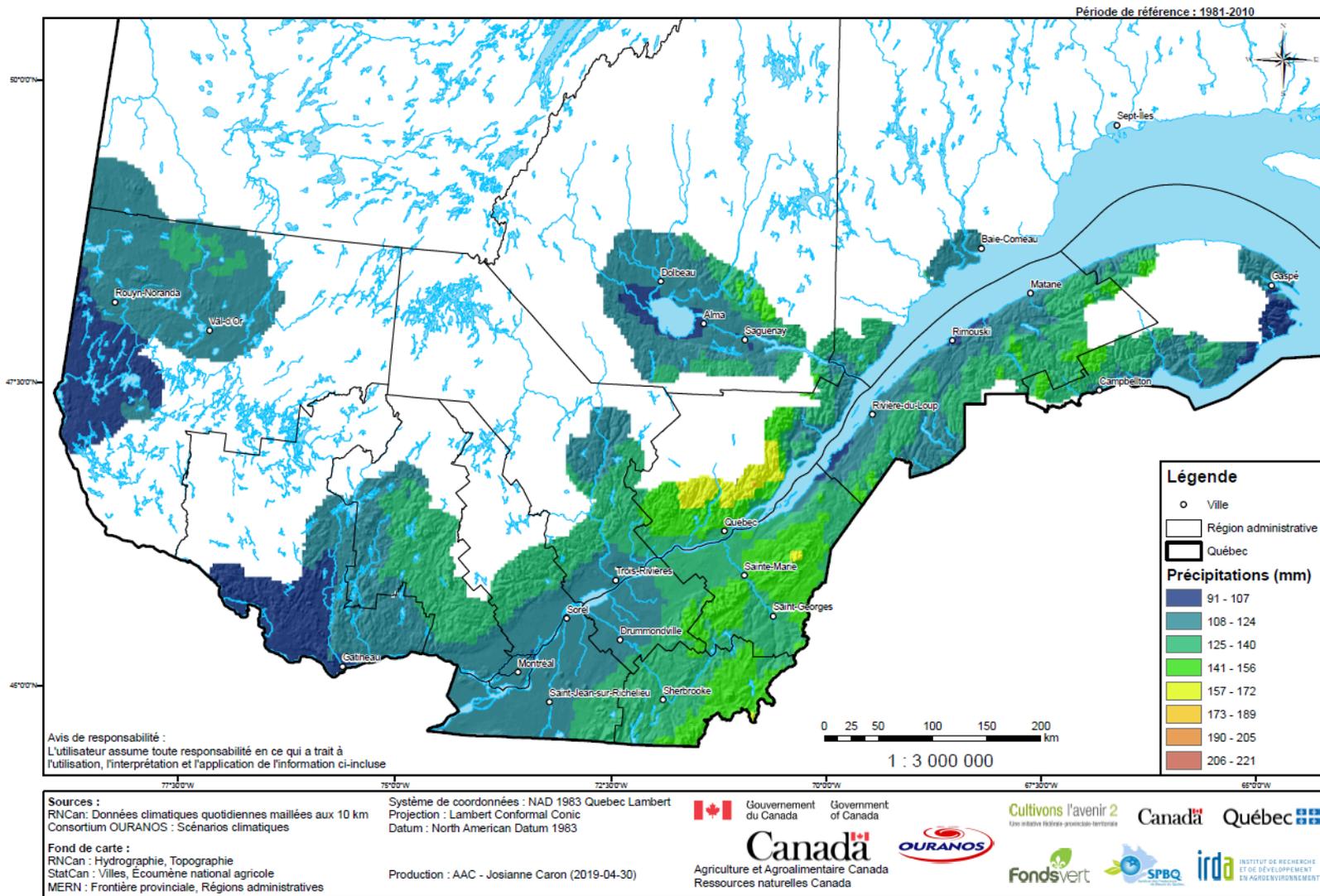


Figure 38. Total des précipitations de la nouaison à la récolte chez le bleuet nain : Scénario de changement inférieur (2041-2070).

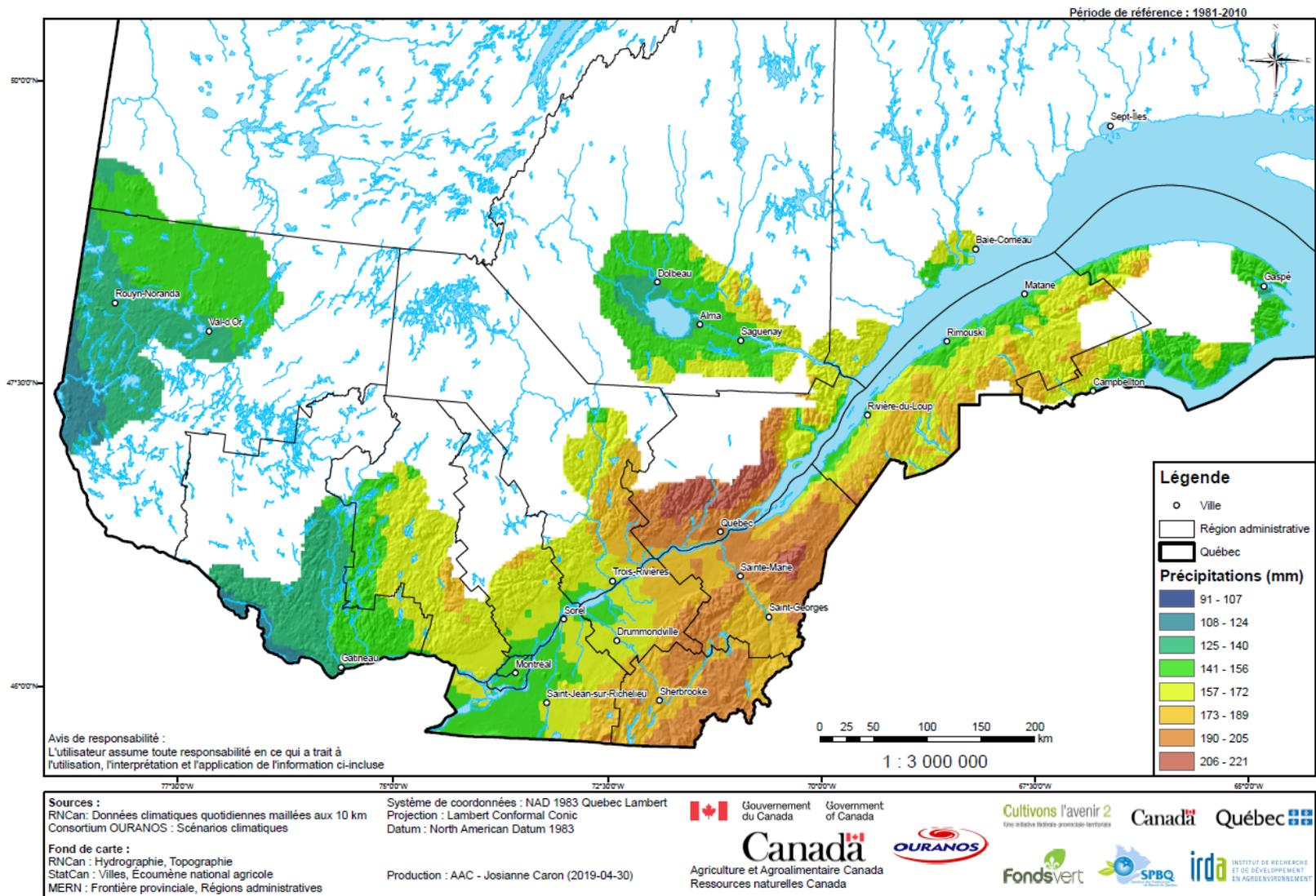


Figure 39. Total des précipitations de la nouaison à la récolte chez le bleuet nain : Scénario de changement supérieur (2041-2070).

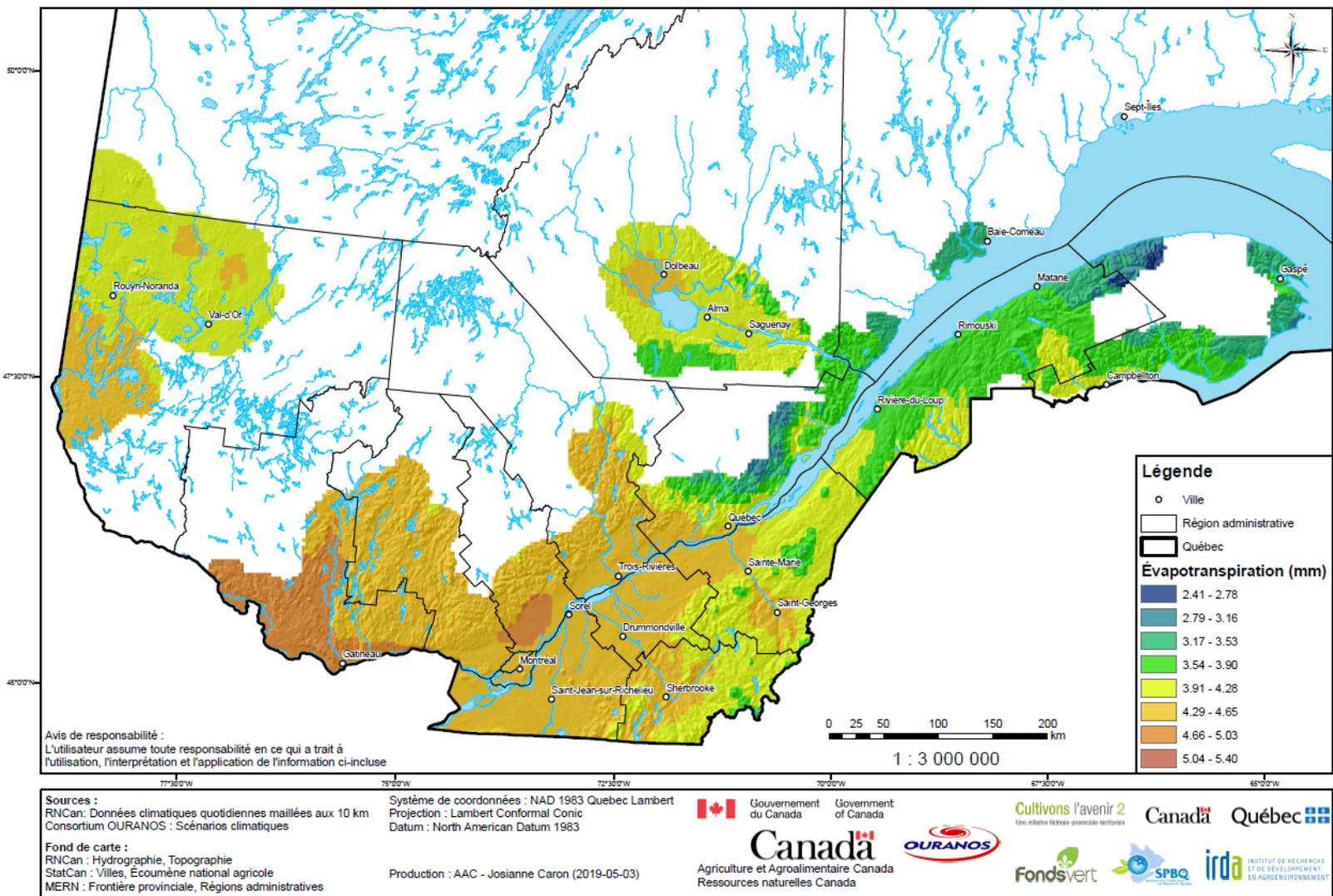


Figure 40. Évapotranspiration quotidienne moyenne chez le bleuet nain, de la nouaison à la récolte, basé sur la période 1981-2010.

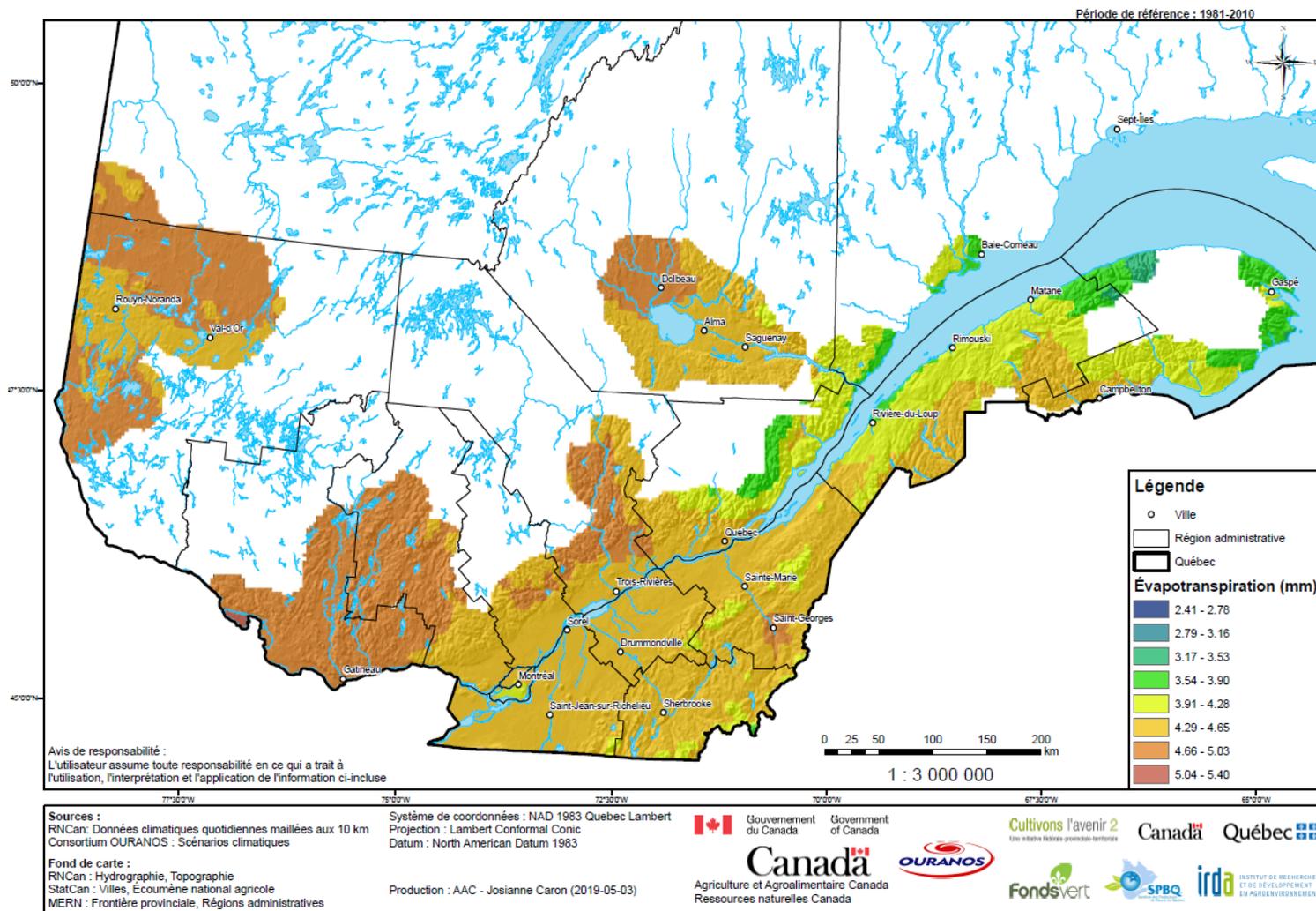


Figure 41. Évapotranspiration quotidienne moyenne chez le bleuet nain, de la nouaison à la récolte : Scénario de changement inférieur (2041-2070).

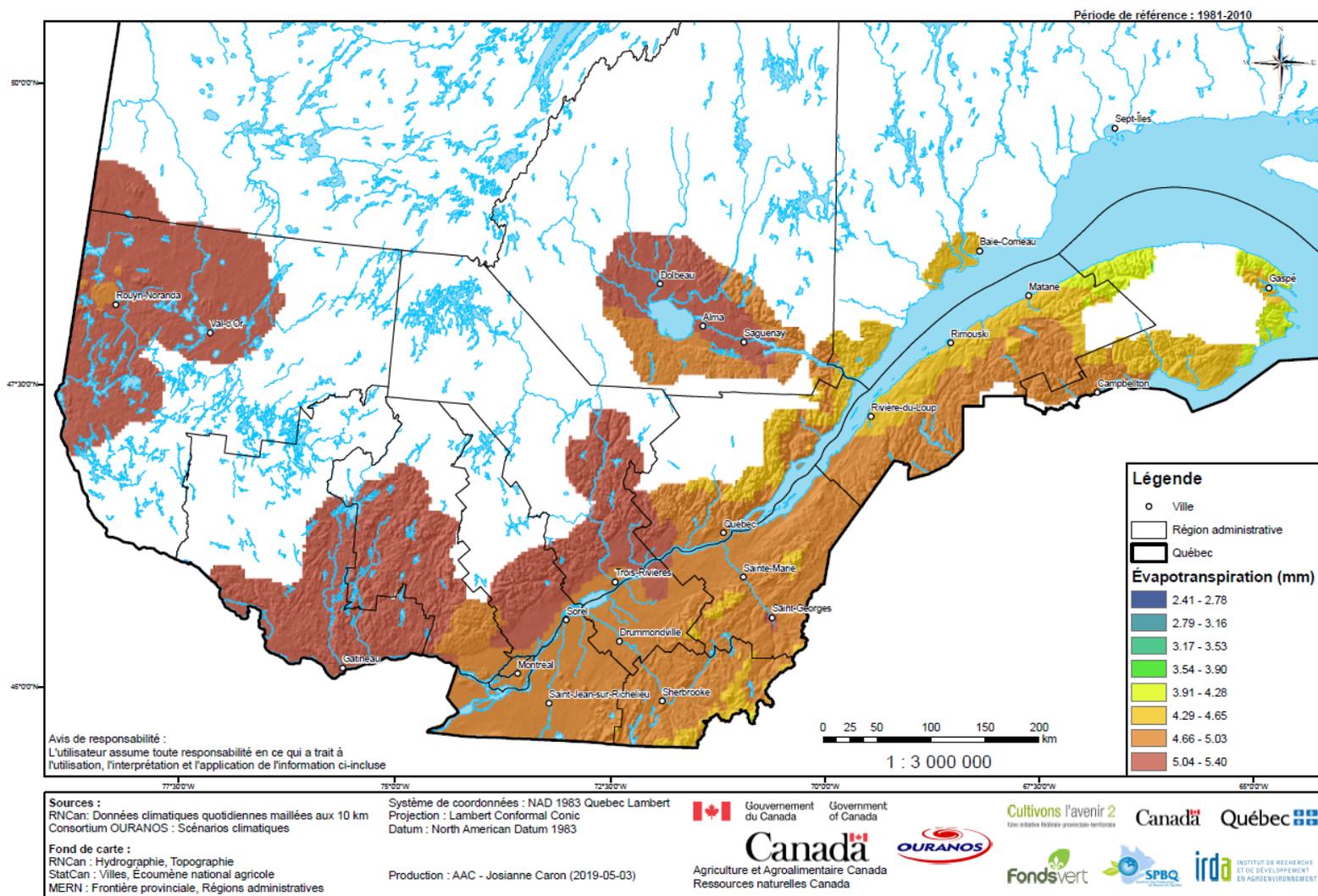


Figure 42. Évapotranspiration quotidienne moyenne chez le bleuet nain, de la nouaison à la récolte : Scénario de changement supérieur (2041-2070).

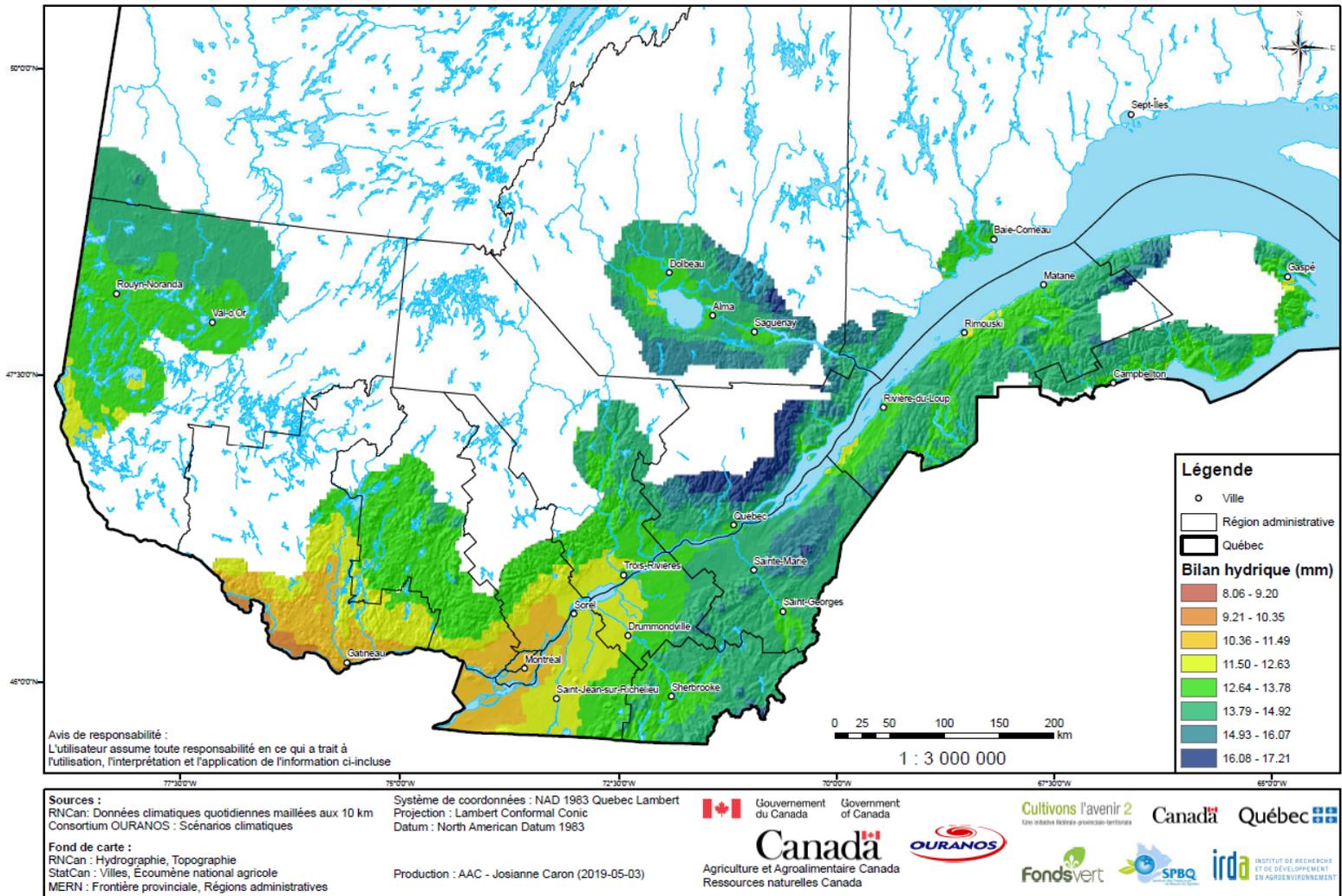


Figure 43. Bilan hydrique quotidien moyen chez le bleuet nain (RFU = 20 mm, kc = 0,45), de la nouaison à la récolte, basé sur la période 1981-2010.

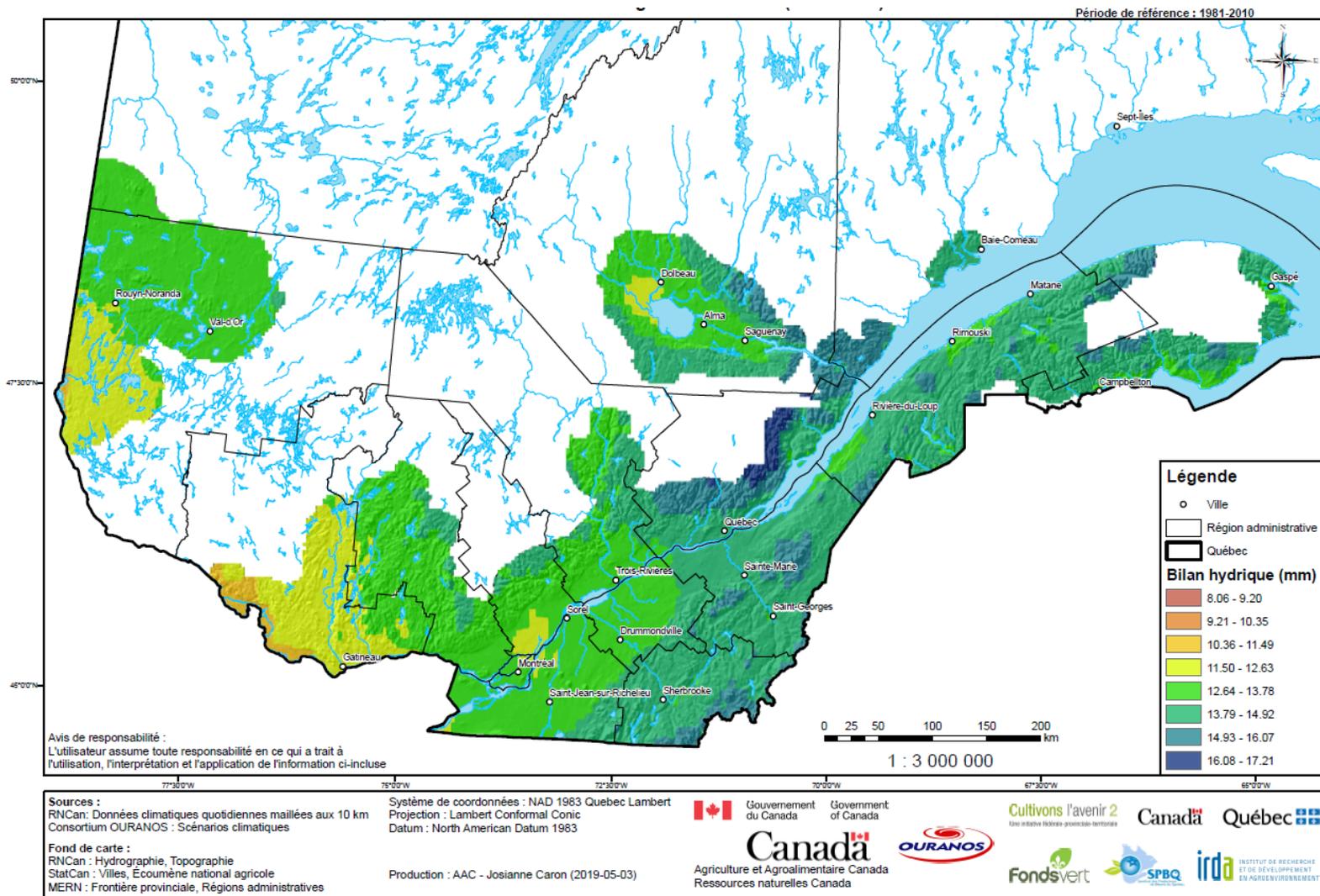


Figure 44. Bilan hydrique quotidien moyen chez le bleuet nain (RFU = 20 mm, Kc = 0,45), de la nouaison à la récolte : Scénario de changement inférieur (2041-2070).

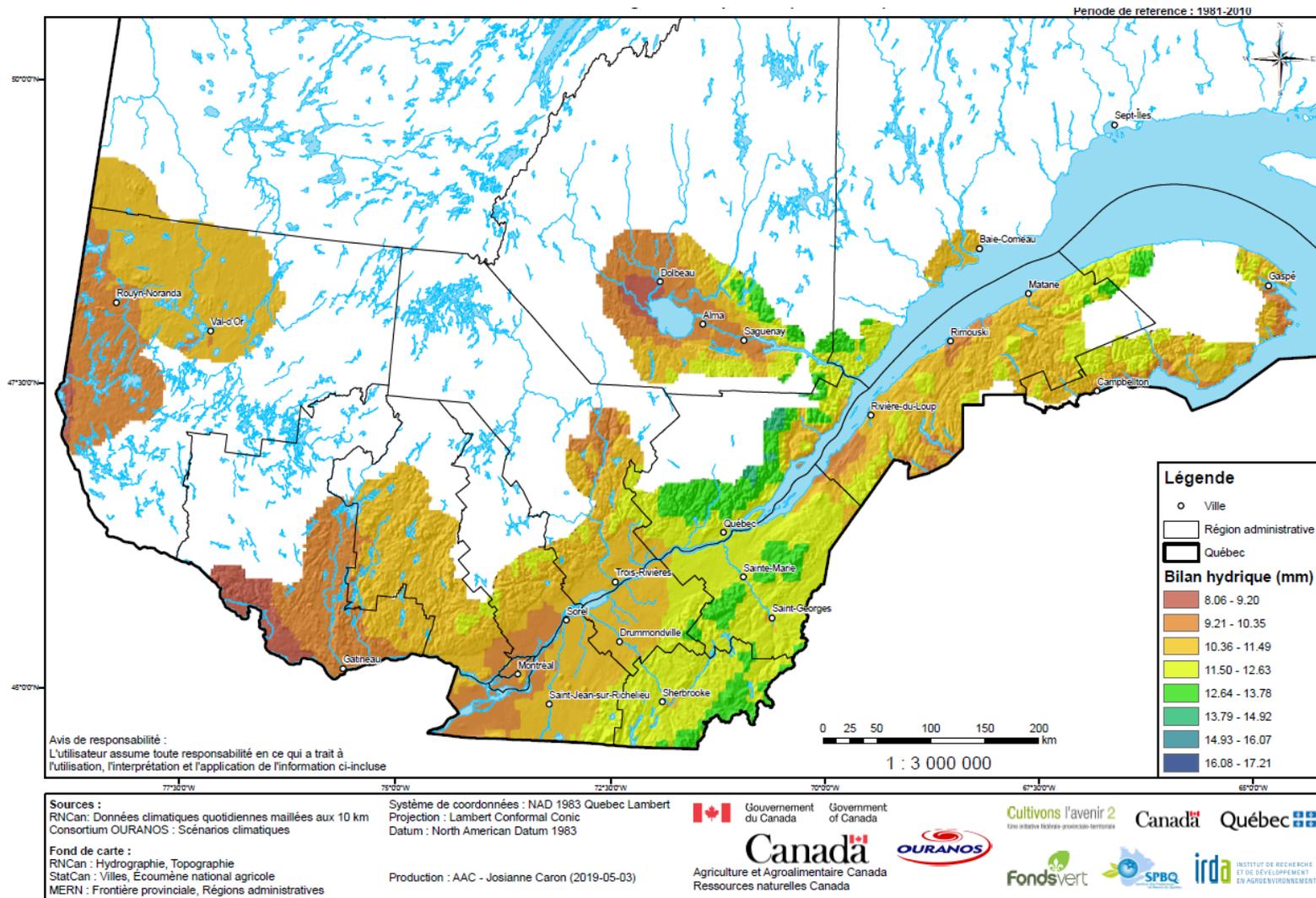


Figure 45. Bilan hydrique quotidien moyen chez le bleuët nain (RFU = 20 mm, Kc = 0,45), de la nouaison à la récolte : Scénario de changement supérieur (2041-2070).

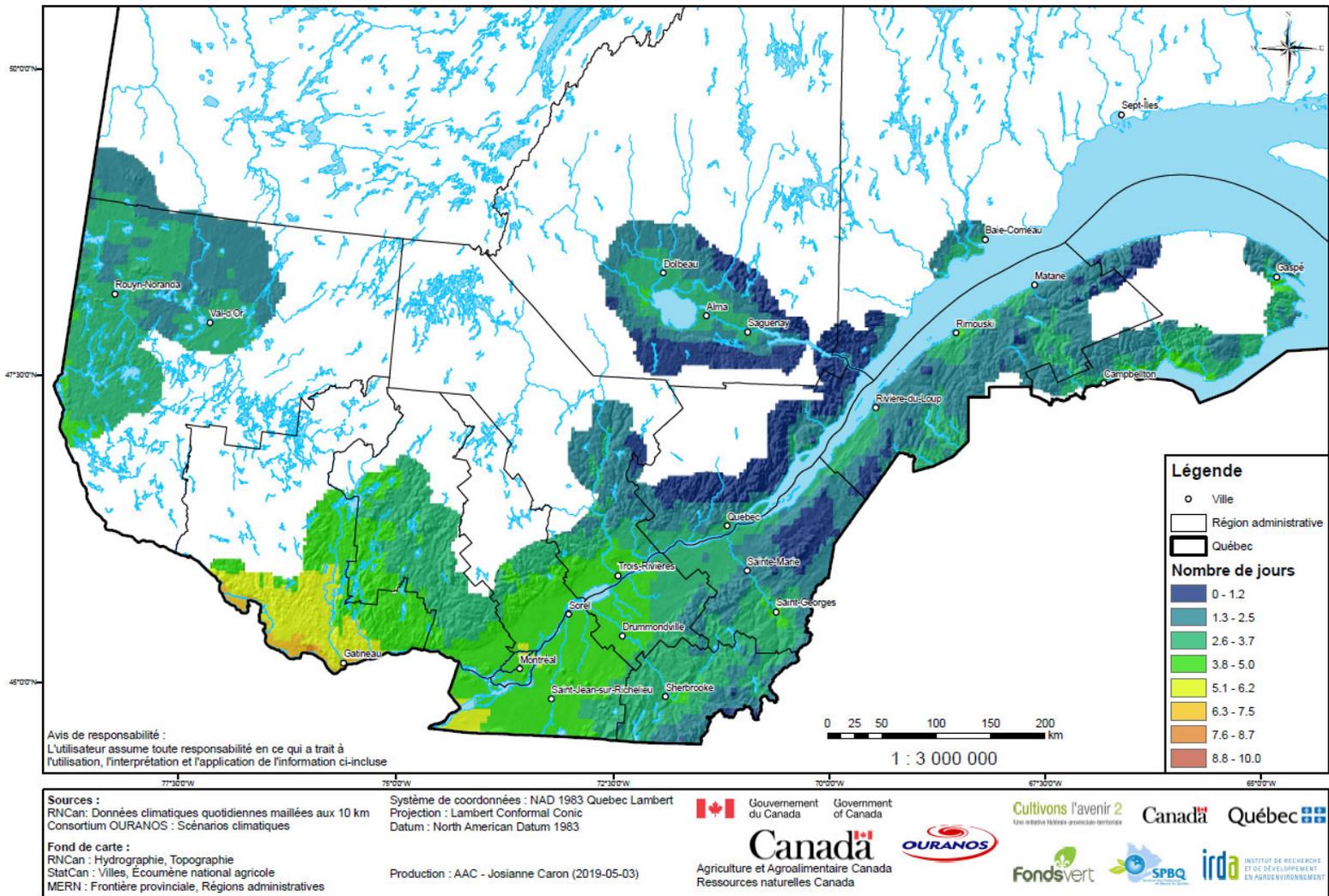


Figure 46. Nombre de jours où le bilan hydrique est 0 chez le bleuët nain (RFU = 20 mm, Kc = 0,45), de la nouaison à la récolte, basé sur la période 1981-2010.

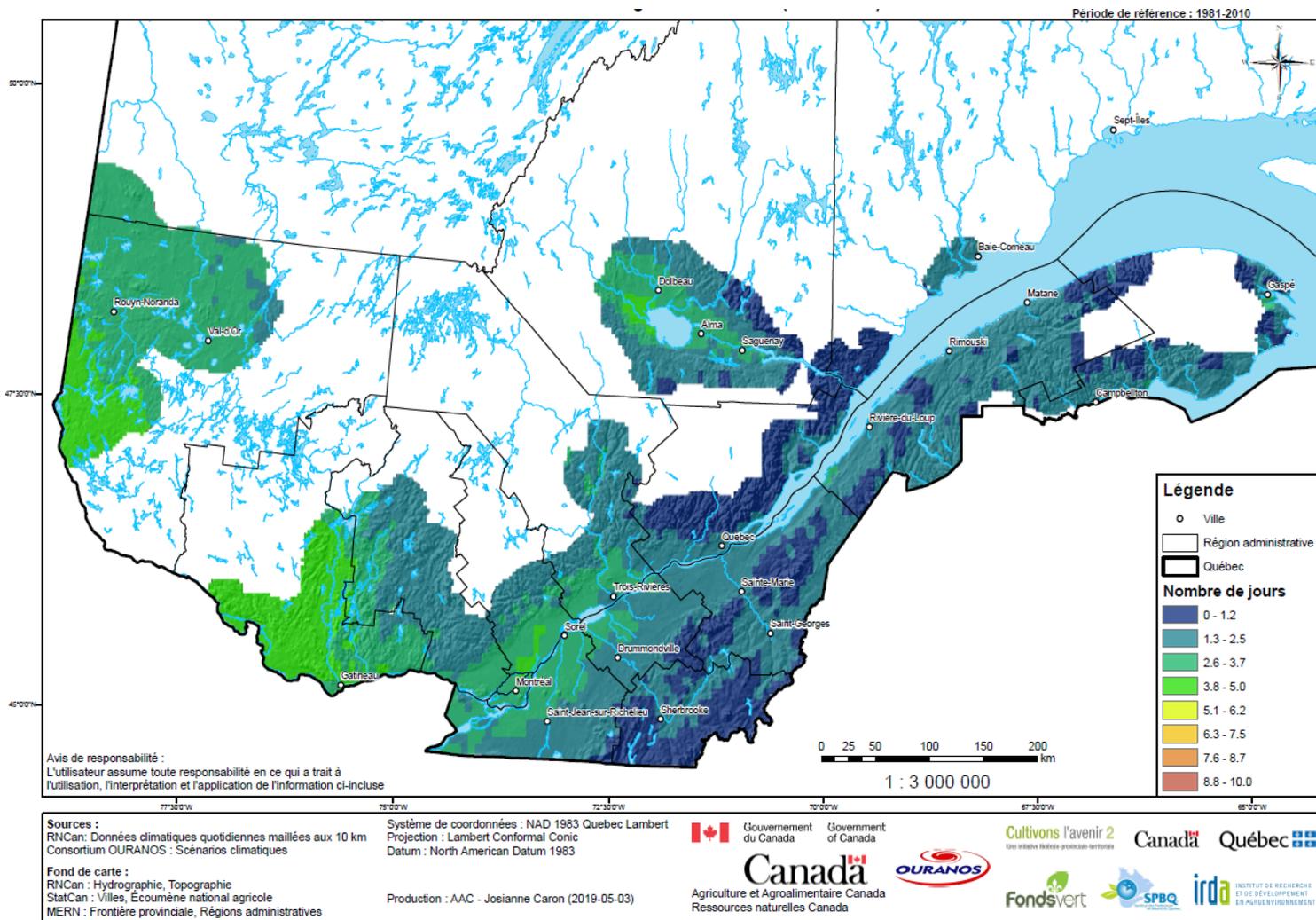


Figure 47. Nombre de jours où le bilan hydrique est 0 chez le bleuët nain (RFU = 20 mm, $K_c = 0,45$), de la nouaison à la récolte : Scénario de changement inférieur (2041-2070).

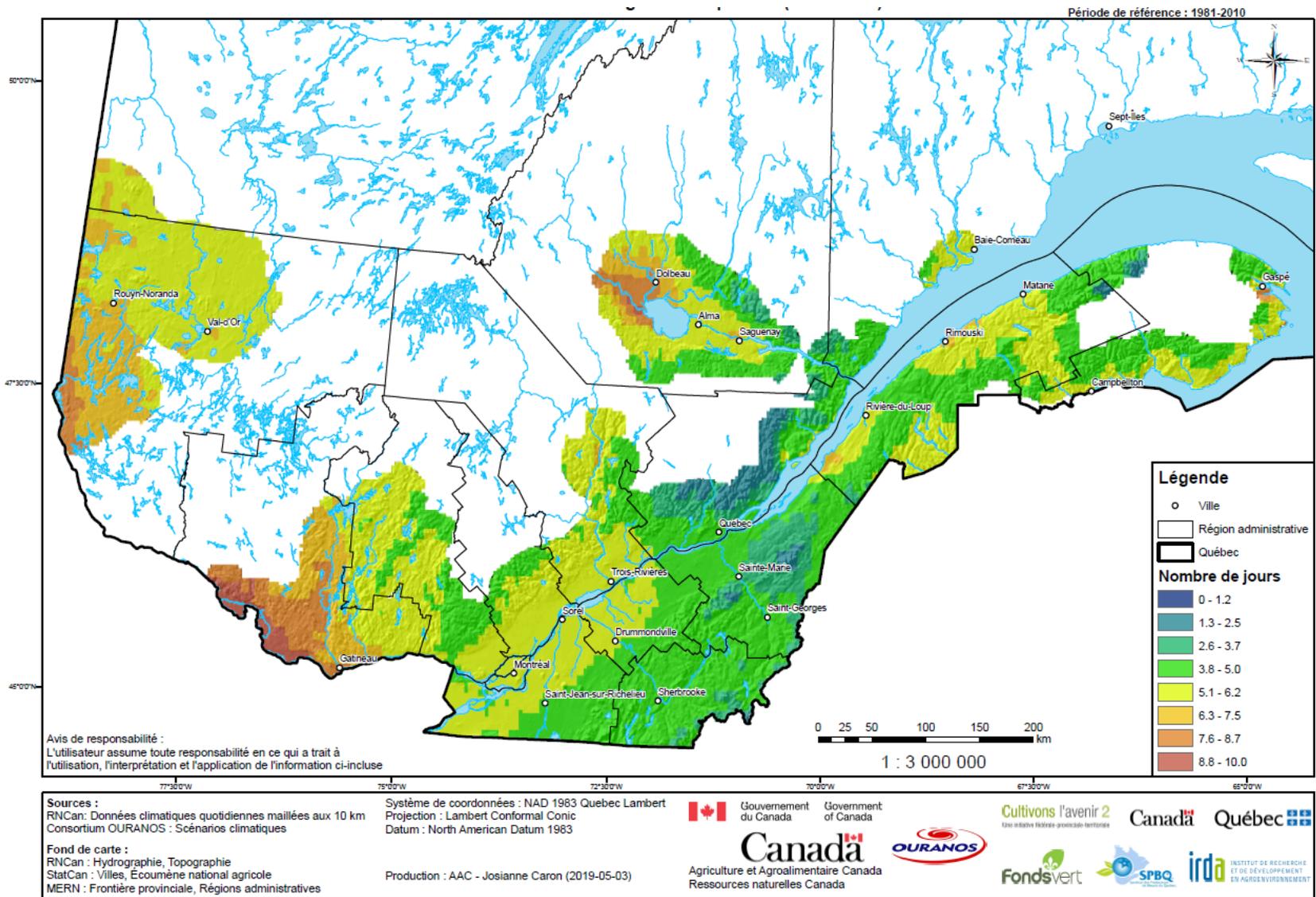


Figure 48. Nombre de jours où le bilan hydrique est 0 chez le bleuët nain ($RFU = 20 \text{ mm}$, $Kc = 0,45$), de la nouaison à la récolte : Scénario de changement supérieur (2041-2070).

Indices hydriques associés à l'année de végétation (période de l'émergence des ramets au 31 octobre) de la culture du bleuet nain au Saguenay Lac-St-Jean en climat actuel (1981-2010) et futur (2041-2070).

Six indices hydriques associés à l'année de végétation de la culture du bleuet nain ont été retenus et ont été analysés en climat actuel et futur. Ces indices visent à évaluer l'impact des changements climatiques sur les quantités de précipitations, l'évapotranspiration moyenne calculée selon l'équation Baier-Robinson modifiée et le bilan hydrique du sol pendant l'année de végétation du bleuet nain. Ces indices sont présentés au Tableau 47 et les points importants à noter sont énoncés ci-dessous. Les différences fournies entre le climat actuel et futur sont calculées à partir des valeurs centrales (moyennes) de chacun des intervalles obtenus des cartes pour la région productrice de bleuets nains du Saguenay Lac-St-Jean.

- Le total des précipitations augmenterait de 0 à 109 mm.
- L'évapotranspiration quotidienne moyenne augmenterait de 0,2 à 0,6 mm/jour.
- Le bilan hydrique quotidien moyen diminuerait de 0,0 à 2,2 mm/jour avec une RFU de 20 mm et de 0,0 à 3,3 mm/jour avec une RFU de 40 mm.
- Le nombre de jours où le bilan hydrique quotidien serait de 0 mm augmenterait de 2,3 à 9,0 jours avec une RFU de 20 mm et de 0,0 à 5,1 jours avec une RFU de 40 mm.

Tableau 47. Indices hydriques associés à l'année de végétation (période de l'émergence des ramets au 31 octobre) de la culture du bleuet nain au Saguenay Lac-St-Jean en climat actuel (1981-2010) et futur (2041-2070).

Indices	Climat de référence (1981-2010)	Scénario CC inférieur (2041-2070)	Scénario CC supérieur (2041-2070)
Total des précipitations de l'émergence des ramets au 31 octobre (mm) *	413 – 522 (Figure 49)	413 – 522 (Figure 50)	523 – 631 (Figure 51)
Évapotranspiration quotidienne moyenne de l'émergence des ramets au 31 octobre (mm) *	2,9 - 3,4 (Figure 52)	3,1 - 3,6 (Figure 53)	3,4 - 3,9 (Figure 54)
Bilan hydrique quotidien moyen de l'émergence des ramets au 31 octobre (RFU = 20 mm, Kc = 0.45) (mm) *	14,2 - 16,0 (Figure 55)	14,2 - 16,0 (Figure 56)	11,6 - 14,2 (Figure 57)
Bilan hydrique quotidien moyen de l'émergence des ramets au 31 octobre (RFU = 40 mm, Kc = 0.45) (mm)	31,1 - 34,4	31,1 - 34,4	27,8 - 31,1
Nombre de jours où le bilan hydrique = 0 mm de l'émergence des ramets au 31 octobre (RFU = 20 mm, Kc = 0.45) *	4,6 - 9,0 (Figure 58)	4,6 - 13,5 (Figure 59)	9,1 - 22,5 (Figure 60)
Nombre de jours où le bilan hydrique = 0 mm de l'émergence des ramets au 31 octobre (RFU = 40 mm, Kc = 0.45)	0,0 - 2,5	0,0 - 2,5	2,6 - 10,0

*Indice illustré sous forme de carte du Québec agricole.

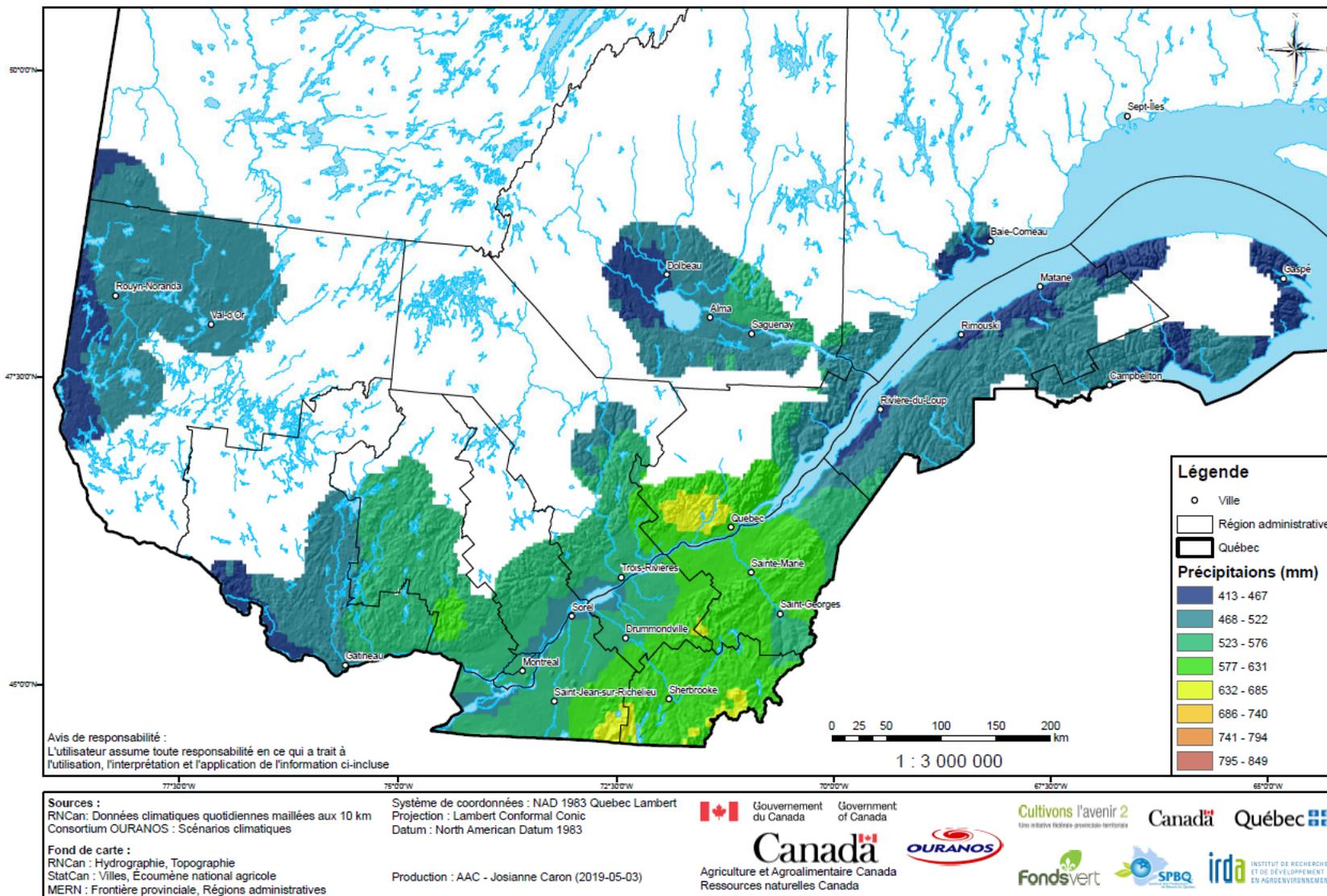


Figure 49. Total des précipitations de l'émergence des ramets au 31 octobre chez le bleuet nain, basé sur la période 1981-2010.

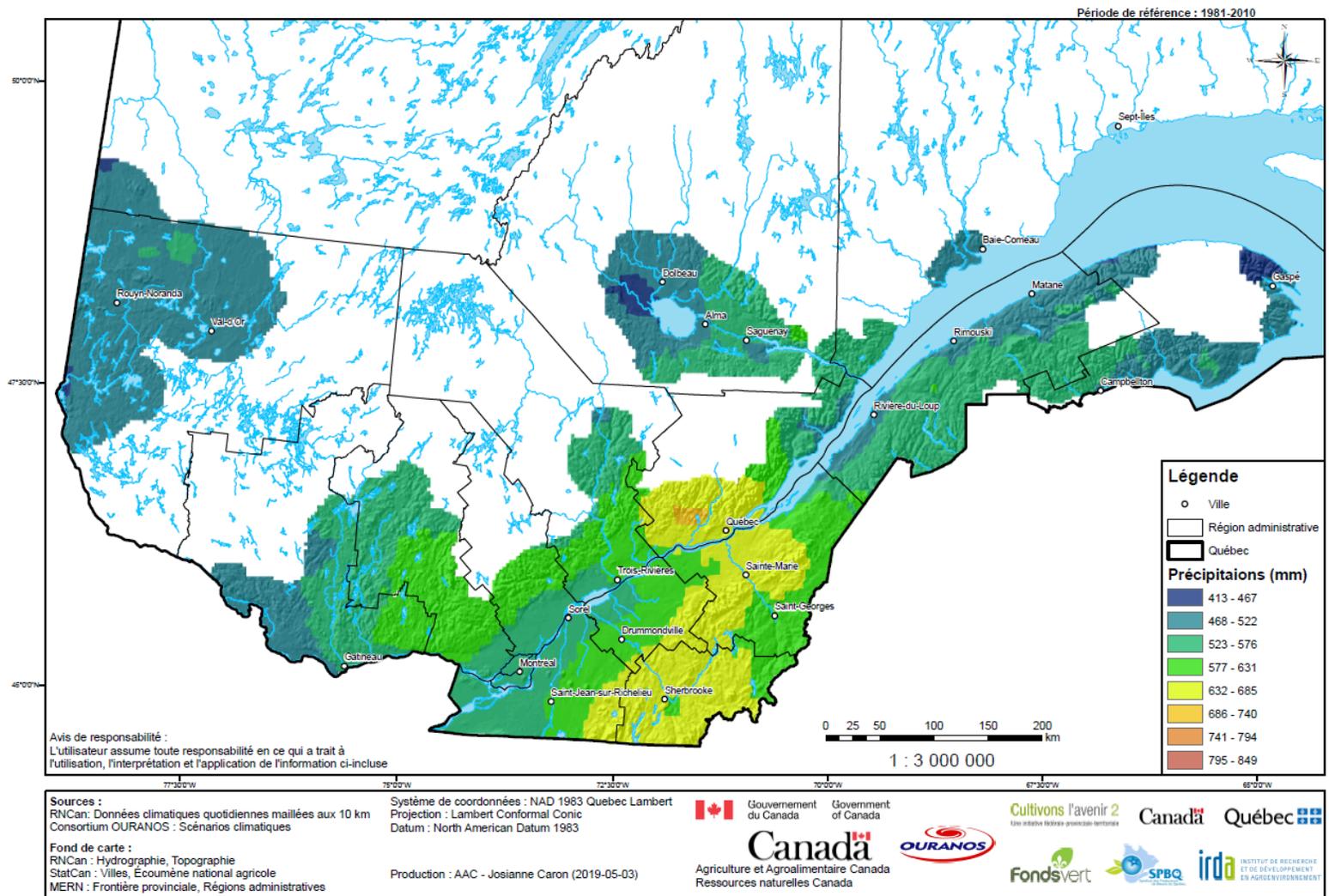


Figure 50. Total des précipitations de l'émergence des ramets au 31 octobre chez le bleuet nain : Scénario de changement inférieur (2041-2070).

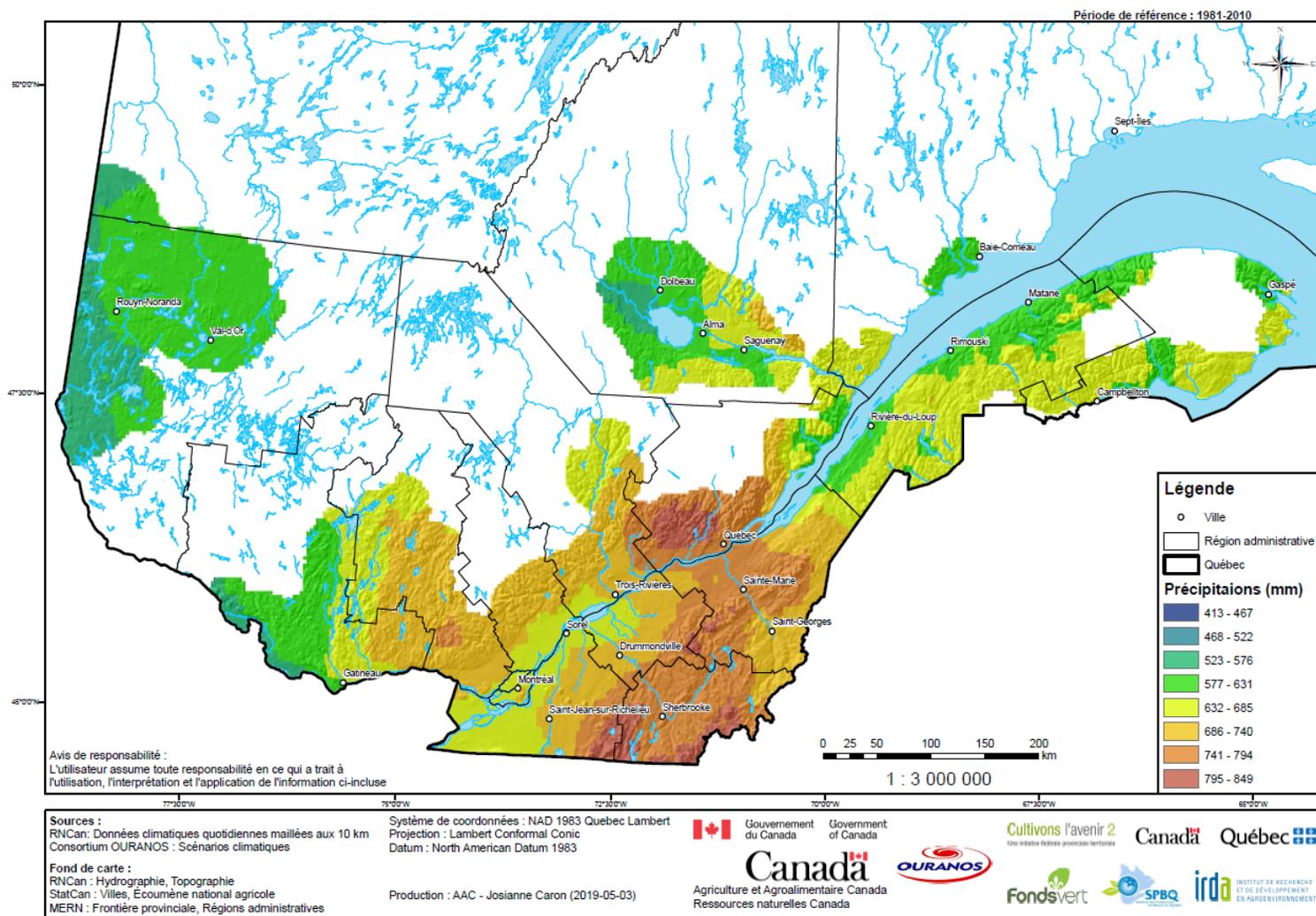


Figure 51. Total des précipitations de l'émergence des ramets au 31 octobre chez le bleuet nain : Scénario de changement Supérieur (2041-2070).

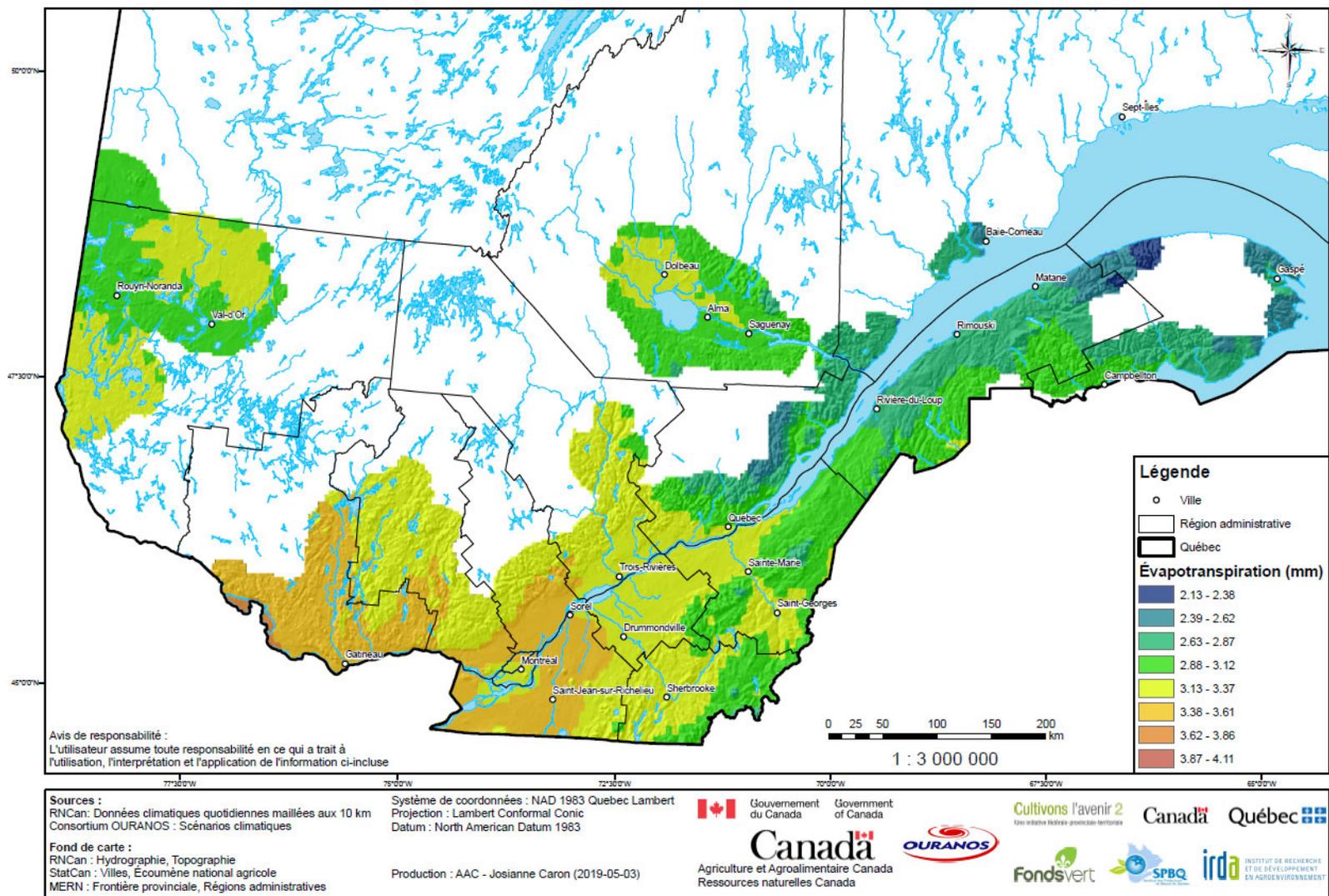


Figure 52. Évapotranspiration quotidienne moyenne chez le bleuet nain, de l'émergence des ramets au 31 octobre, basée sur la période 1981-2010.

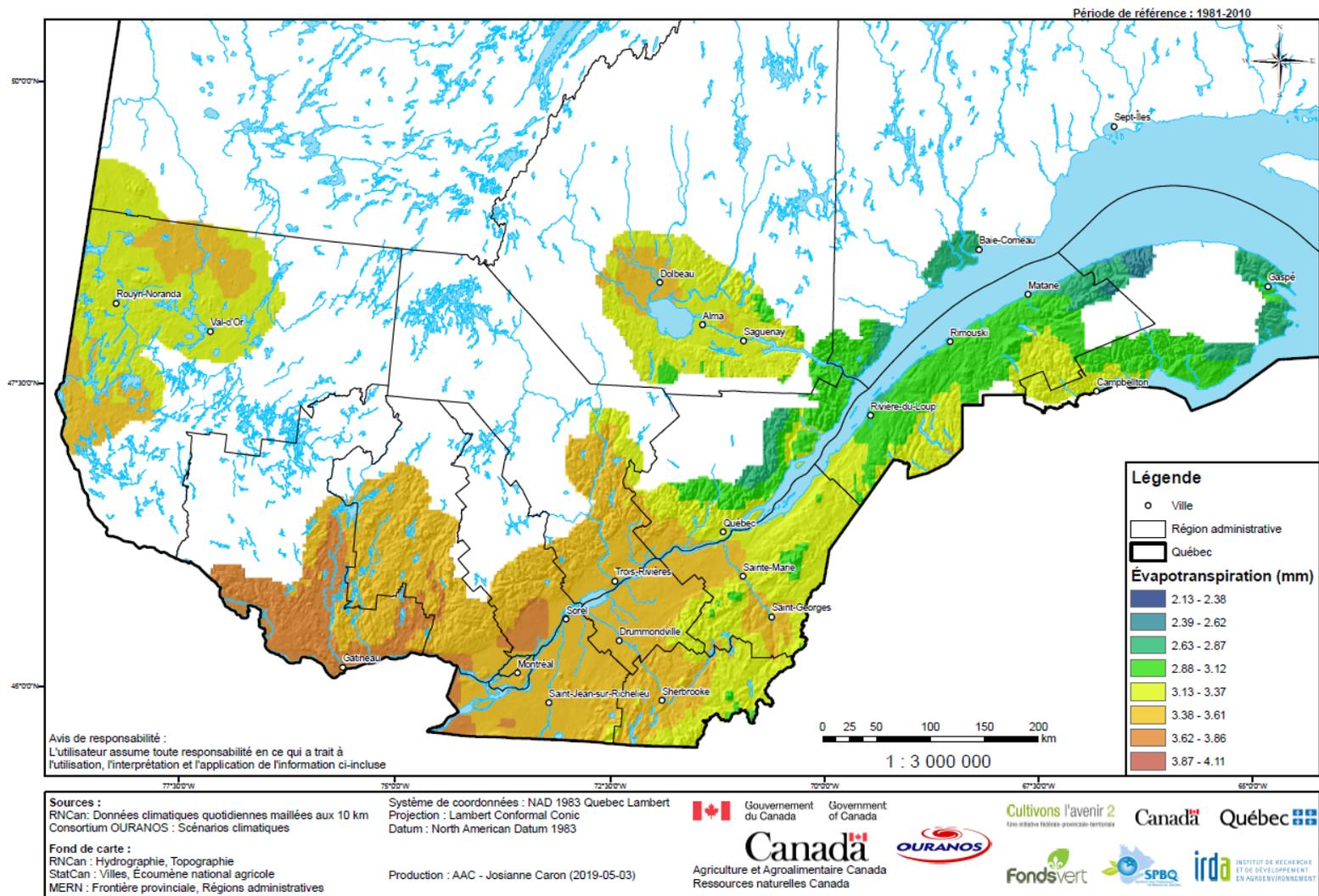


Figure 53. Évapotranspiration quotidienne chez le bleuet nain, de l'émergence des ramets au 31 octobre : Scénario de changement inférieur (2041-2070).

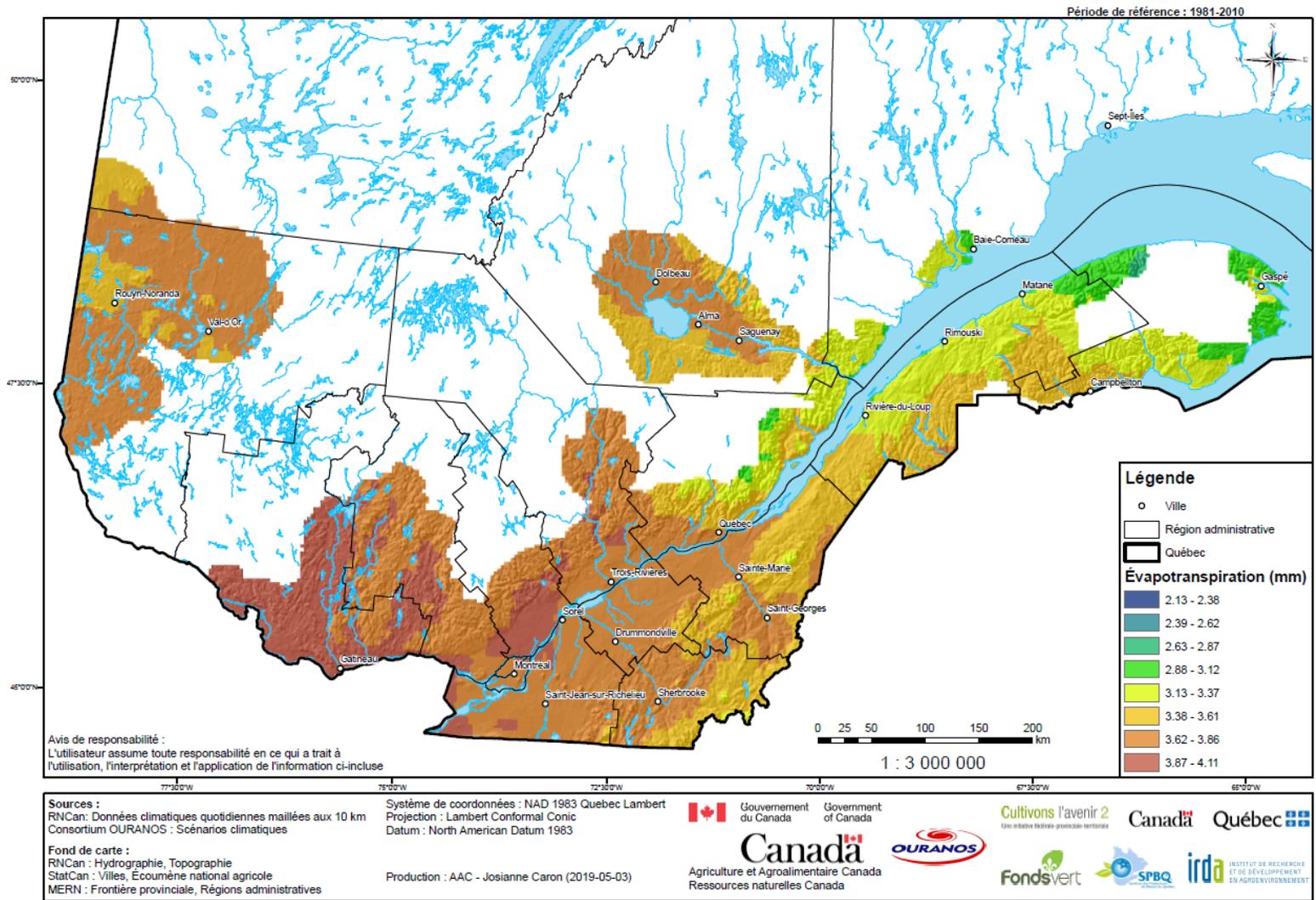


Figure 54. Évapotranspiration quotidienne chez le bleuet nain, de l'émergence des ramets au 31 octobre : Scénario de changement supérieur (2041-2070).

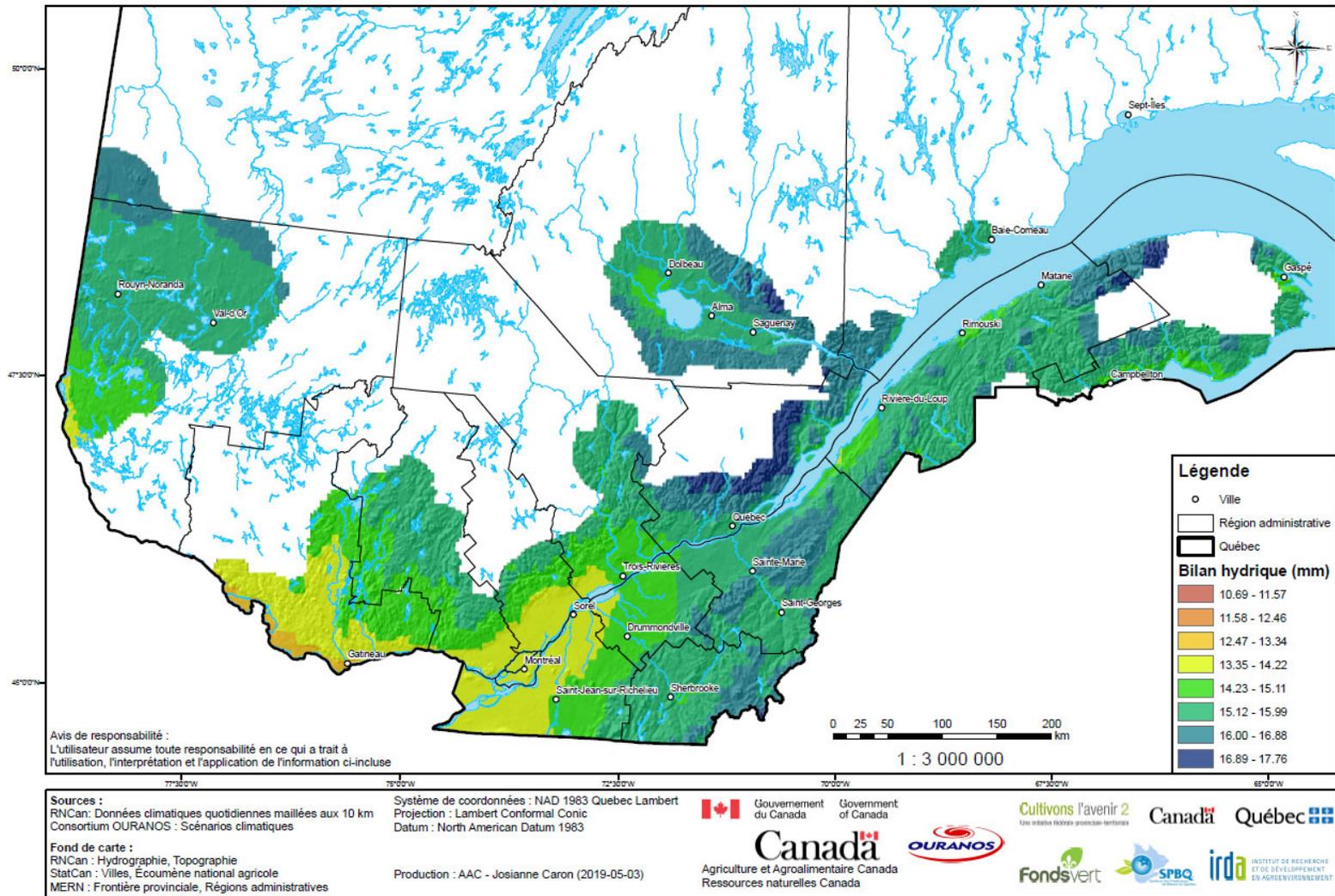


Figure 55. Bilan hydrique quotidien moyen chez le bleuët nain (RFU = 20 mm, Kc = 0,45), de l'émergence des ramets au 31 octobre, basé sur la période 1981-2010.

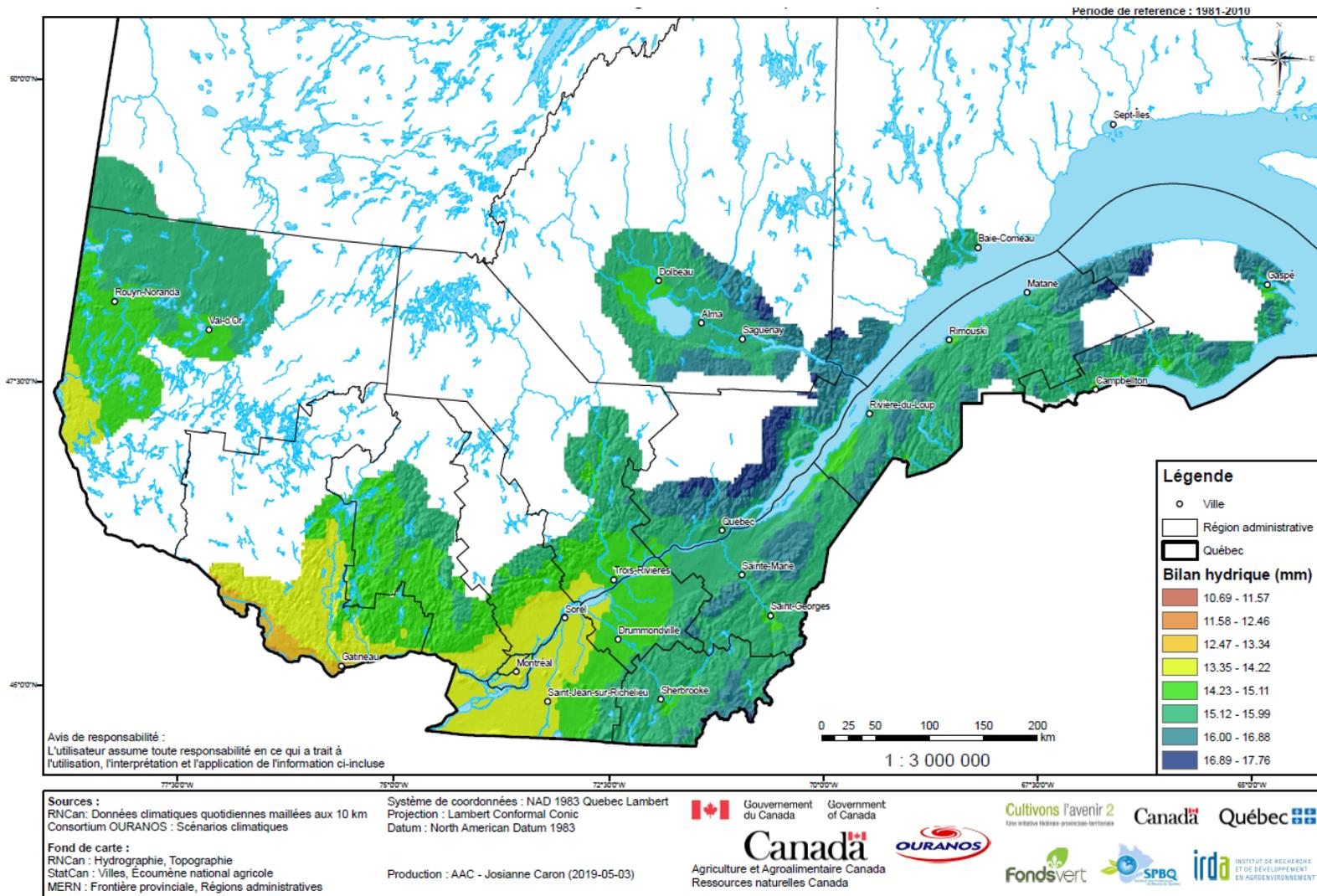


Figure 56. Bilan hydrique quotidien moyen chez le bleuet nain (RFU = 20 mm, Kc = 0,45), de l'émergence des ramets au 31 octobre : Scénario de changement inférieur (2041-2070).

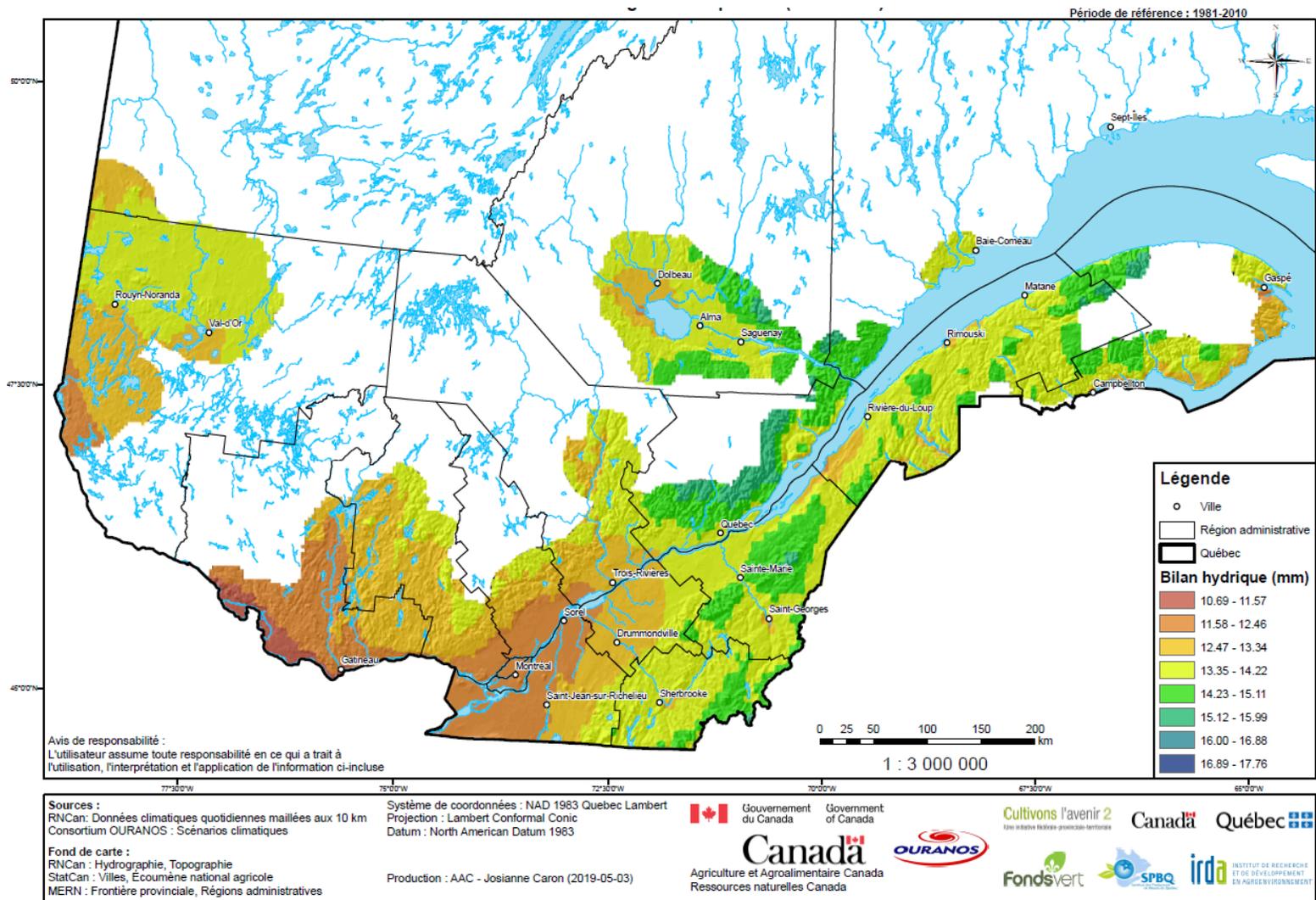


Figure 57. Bilan hydrique quotidien moyen chez le bleuet nain ($RFU = 20 \text{ mm}$, $Kc = 0,45$), de l'émergence des ramets au 31 octobre : Scénario de changement supérieur (2041-2070).

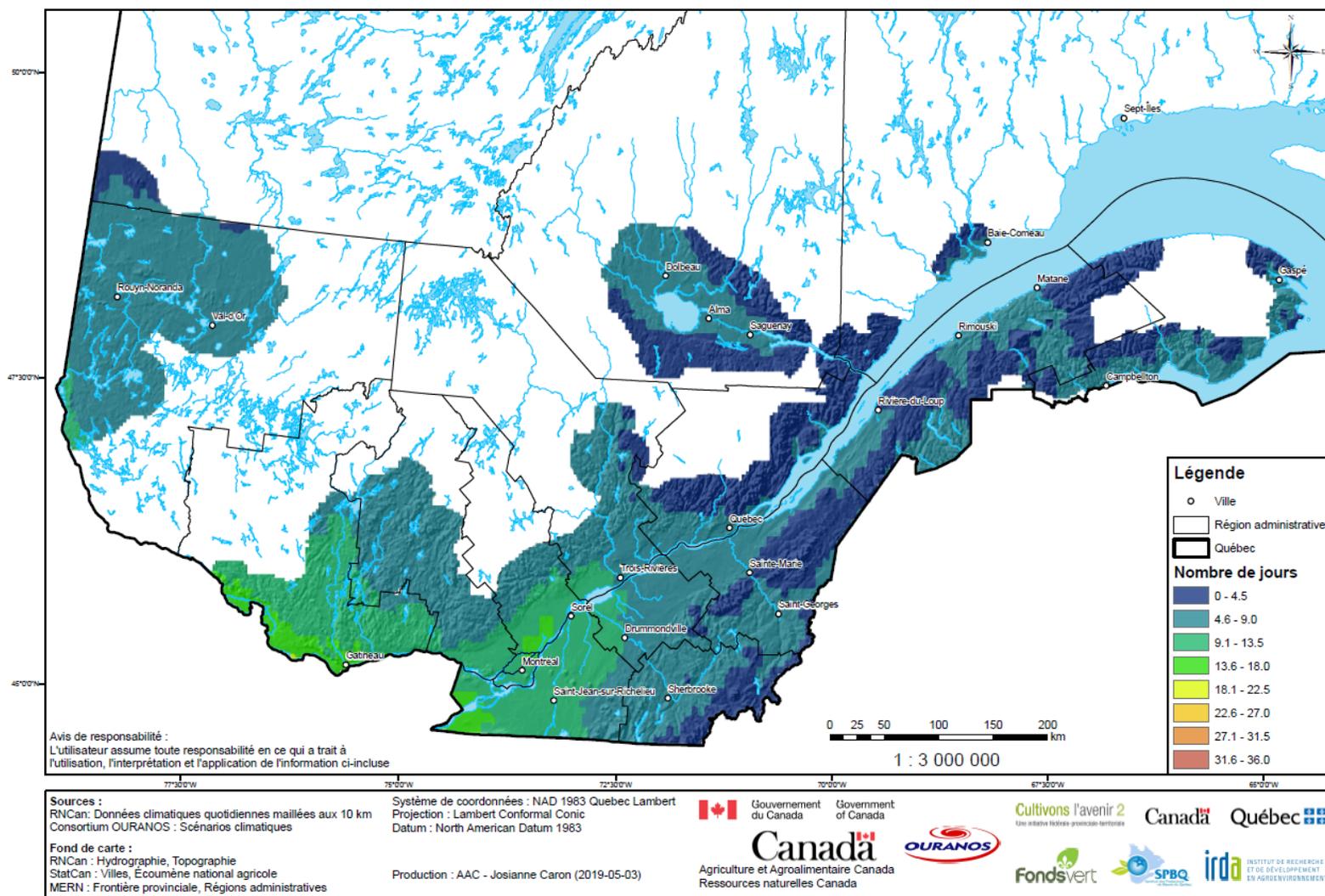


Figure 58. Nombre de jours où le bialn hydrique est 0 chez le bleuët nain (RFU = 20 mm, Kc = 0,45), de l'émérgence des ramets au 31 octobre, basé sur la période 1981-2010.

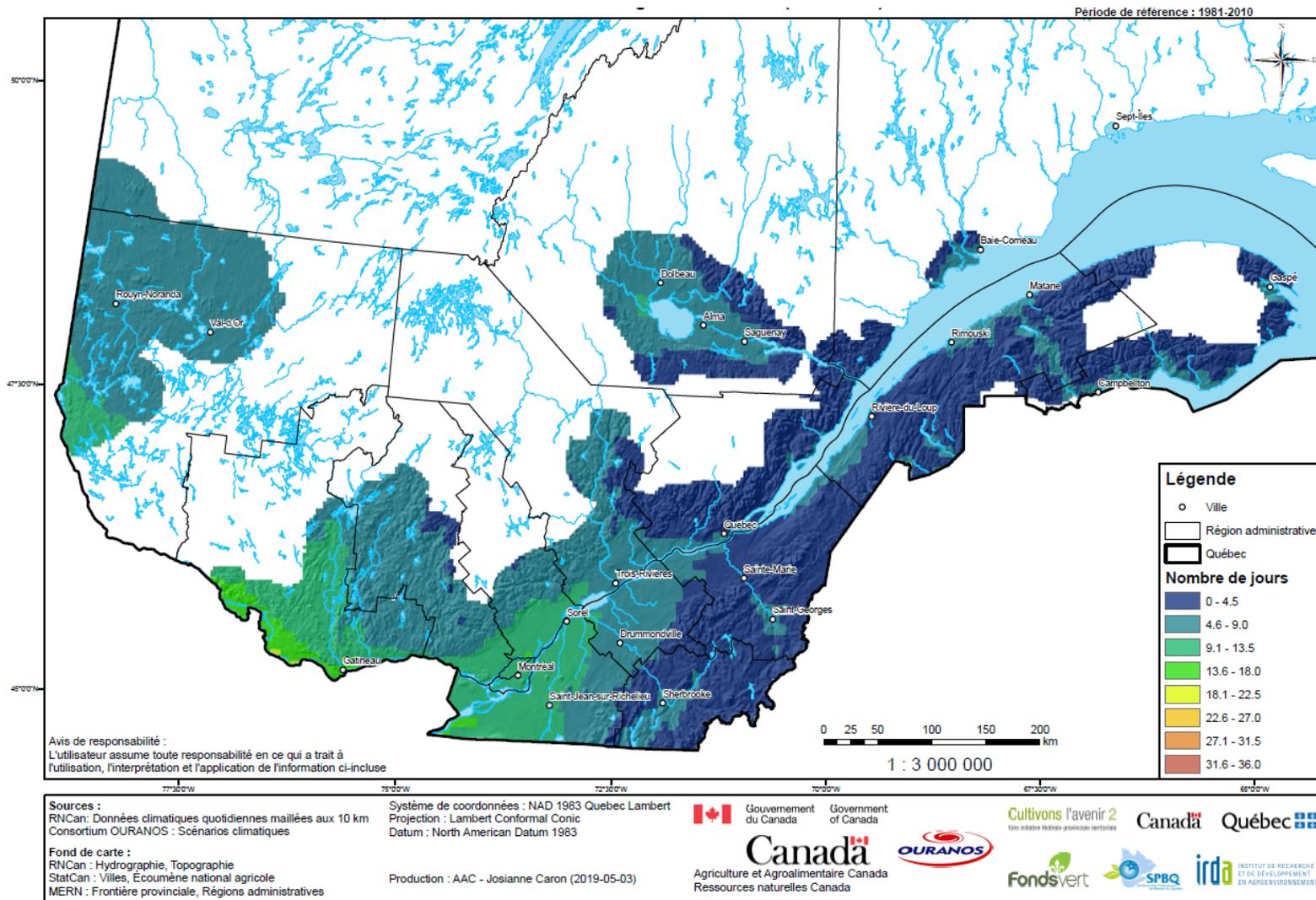


Figure 59. Nombre de jours où le bialn hydrique est 0 chez le bleuët nain (RFU = 20 mm, Kc = 0,45), de l'émergence des ramets au 31 octobre : Scénario de changement inférieur (2041-2070).

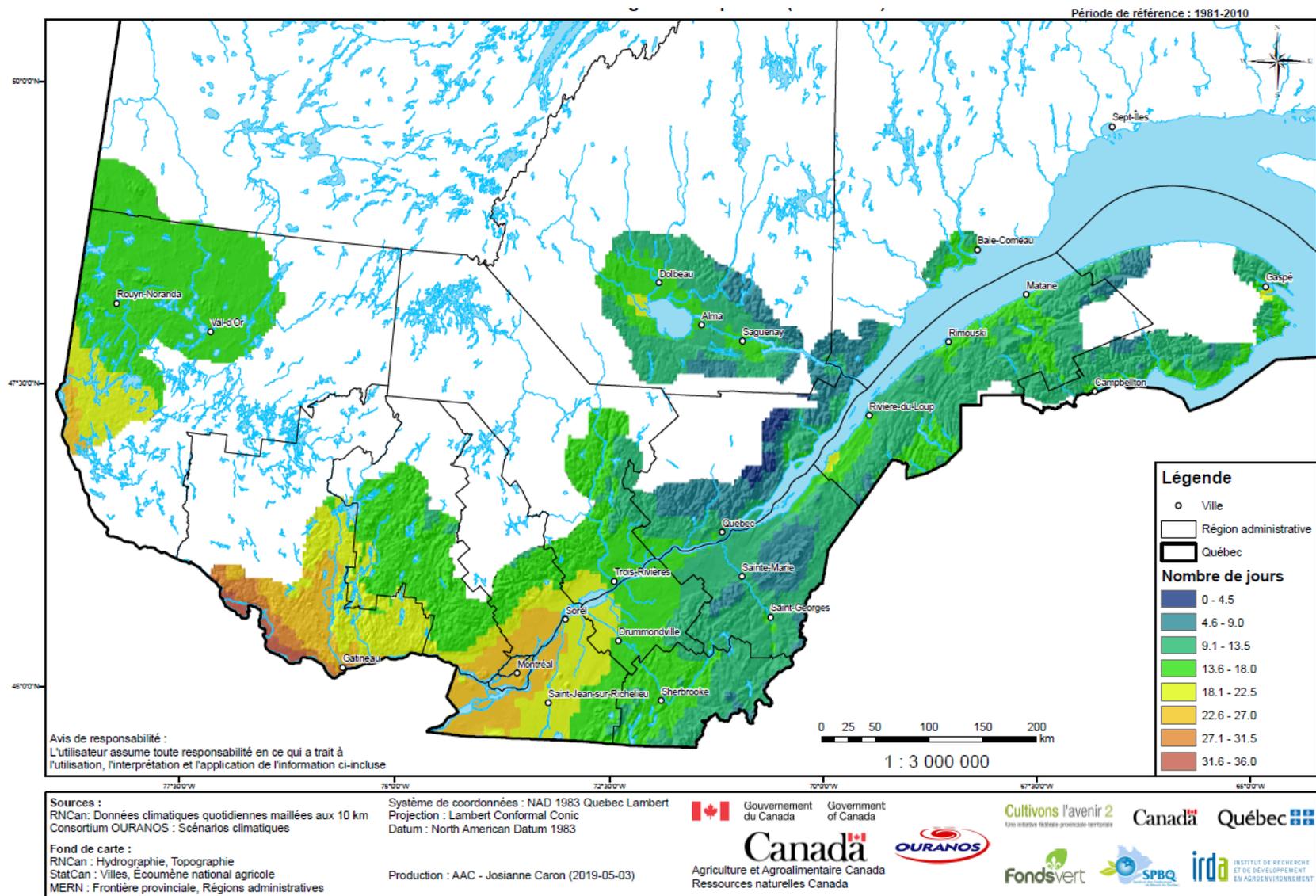


Figure 60. Nombre de jours où le bialn hydrique est 0 chez le bleuët nain (RFU = 20 mm, Kc = 0,45), de l'émergence des ramets au 31 octobre : Scénario de changement supérieur (2041-2070).

Volet 3. Analyser la rentabilité de l'irrigation en climat actuel et futur

Coûts de possession et d'opération

En fonction de la méthode décrite (section Méthodologie), les coûts de possession (CP) et les coûts d'opération (CO) sont présentés au Tableau 48, et ce, pour différentes superficies de bleuetières.

Notes :

Ces superficies ont été choisies selon le maximum plausible pour une unité de pompage (40 ha) et aussi pour tenir compte de superficie plus petite. Certaines combinaisons présentées dans ce tableau ne sont pas « réalistes ou souhaitables ». Par exemple, 400 000 \$ pour couvrir 10 ha est une combinaison à éviter. Comme il existe une diversité de possibilités (types de systèmes, neuf, usagé, etc.) il a été convenu de laisser l'ensemble des combinaisons.

Tableau 48. Coûts de possession et d'opération d'un système d'irrigation dans la production de bleuets nains cultivés.

Coût d'acquisition du système d'irrigation	Coût de possession et d'opération annuels					
	Coûts de possession annuels	Coûts d'opération annuels	Coûts totaux annuels	10 ha	20 ha	40 ha
50 000 \$	4 435 \$	4 435 \$	8 870 \$	887 \$/ha	443 \$/ha	222 \$/ha
100 000 \$	8 869 \$	8 869 \$	17 740 \$	1 774 \$/ha	887 \$/ha	443 \$/ha
200 000 \$	17 738 \$	17 738 \$	35 480 \$	3 548 \$/ha	1 774 \$/ha	887 \$/ha
400 000 \$	35 476 \$	35 476 \$	70 950 \$	7 095 \$/ha	3 548 \$/ha	1 774 \$/ha

Selon le coût d'acquisition initial et la superficie cultivée, les coûts totaux annuels varient entre 222 \$/ha et 7 095 \$/ha, mais comme mentionné dans la note, certaines combinaisons ne font partie du « monde des possibles ».

Prenons en exemple les deux scénarios suivants :

Deux systèmes d'irrigation (neuf, taxes non incluses) ont été retenus comme exemple et la superficie à couvrir est de 20 ha.

Un premier qui répond à l'objectif de protection contre le gel, soit un système qui doit fonctionner simultanément sur l'ensemble de la superficie à protéger. Ce système peut aussi être utilisé contre le stress hydrique. Le premier système alimente 600 gicleurs avec une pompe à essence de 225 HP via des tuyaux enfouis en polyéthylène haute densité connue sous l'acronyme anglais HDPE. Le coût de ce système, installation non incluse, est évalué à 236 710 \$. Le coût de possession annuel et d'opération annuel (coût totaux annuels) sera de 41 988 \$ (20 994 \$+ 20 994 \$) ou 2100 \$/ha.

Le second système est un canon enrouleur alimenté avec une pompe de type PTO. Ce type de pompe est activée par la prise de force du tracteur. Ce système peut couvrir 20 ha, mais seulement contre le stress hydrique. Le coût de ce système est évalué à 84 010 \$. Le coût de possession annuel et d'opération annuel (coût totaux annuels) sera de 14 902 \$ (7451 \$ + 7451 \$) ou 745 \$/ha.

Seuil de rentabilité

Tel que mentionné précédemment, les seuils de rentabilité sont déterminés en fonction des coûts totaux et du prix du bleuet nain cultivé, selon le calcul de l'équation 4. Le Tableau 49, le Tableau 50 et le Tableau 51 présentent tous les résultats selon différents scénarios de superficies et de prix du bleuet. Au moment de produire ce rapport, le prix du bleuet tend à se rapprocher de 0,55 \$/kg. Ce prix est variable annuellement et les valeurs présentées sont représentatives de l'intervalle observé dans le passé. Évidemment, les gains de rendement à obtenir diminuent au fur et à mesure que le prix du bleuet et que les superficies augmentent. Par exemple, pour un système dont le coût d'acquisition se chiffre à 100 000 \$ et pour un prix du bleuet de 1,10 \$/kg, il faut que le gain de rendement soit de 1 610, 805 et 402 kg/ha pour des bleuetières de 10, 20 et 40 ha respectivement. Ces mêmes résultats diminuent lorsque le prix du bleuet augmente.

Tableau 49. Seuil de rentabilité en termes de gain de rendement à obtenir annuellement pour rentabiliser l'irrigation sur une bleuetière de 10 ha.

<i>Prix du bleuet (\$/kg)</i>	<i>0,55</i>	<i>1,10</i>	<i>1,65</i>	<i>2,20</i>
Coût d'acquisition du système d'irrigation	Gain de rendement (kg/ha)			
50 000 \$	1 610	805	537	402
100 000 \$	3 219	1 610	1 073	805
200 000 \$	6 439	3 219	2 146	1 610
400 000 \$	12 877	6 439	4 292	3 219

Tableau 50. Seuil de rentabilité en termes de gain de rendement à obtenir annuellement pour rentabiliser l'irrigation sur une bleuetière de 20 ha.

<i>Prix du bleuet (\$/kg)</i>	<i>0,55</i>	<i>1,10</i>	<i>1,65</i>	<i>2,20</i>
Coût d'acquisition du système d'irrigation	Gain de rendement (kg/ha)			
50 000 \$	805	402	268	201
100 000 \$	1 610	805	537	402
200 000 \$	3 219	1 610	1 073	805
400 000 \$	6 439	3 219	2 146	1 610

Tableau 51. Seuil de rentabilité en termes de gain de rendement à obtenir pour rentabiliser l'irrigation sur une bleuetière de 40 ha.

<i>Prix du bleuet (\$/kg)</i>	<i>0,55</i>	<i>1,10</i>	<i>1,65</i>	<i>2,20</i>
Coût d'acquisition du système d'irrigation	Gain de rendement (kg/ha)			
50 000 \$	402	201	134	101
100 000 \$	805	402	268	201
200 000 \$	1 610	805	537	402
400 000 \$	3 219	1 610	1 073	805

Les seuils de rentabilité en termes absolus (kg/ha) procurent une information nécessaire et valable, mais celle-ci peut être enrichie lorsqu'elle est mise en parallèle aux rendements de base moyens déjà obtenus par une entreprise. En effet, un gain de rendement de 500 kg/ha ne représente pas le même « effort » à consentir pour une entreprise qui obtient déjà 5 000 kg/ha que pour celle qui en obtient 3 000 kg/ha. Les gains de rendement en termes relatifs, soit en pourcentage du rendement de base moyen, sont tous présentés en annexe au Tableau 54. Cette matrice permet au lecteur de situer rapidement le gain de rendement relatif à obtenir en fonction du coût d'acquisition du système d'irrigation, de la superficie de la bleuetière, du prix du bleuet et du rendement de base moyen. Les gains de rendement varient d'un niveau très faible (1 %) à un niveau irréaliste (300 %).

Assurance-récolte

Dans l'agriculture québécoise, l'assurance-récolte est l'outil de gestion du risque privilégié contre les risques naturels, dont les risques climatiques, et ce depuis plusieurs années. L'investissement dans un système d'irrigation peut présenter une alternative aux producteurs de bleuets nains cultivés pour gérer les risques climatiques, notamment le gel et la sécheresse.

La Figure 61, la Figure 62 et la Figure 63 offrent un portrait de l'évolution de l'assurance-récolte individuelle de la production de bleuets au Québec. Les données présentées ne sont pas tirées des dossiers d'entreprises individuelles, mais elles sont plutôt calculées à partir des données agrégées présentées sur le site Internet de la Financière agricole du Québec (FADQ)². On constate d'abord la grande variabilité des indemnités versées au cours des années (Figure 61). Alors que les conditions des années 2010, 2014 et 2015 ont déclenché des interventions du programme de plusieurs millions de dollars, les autres années ont procuré des indemnités plus faibles (< 100 \$/ha).

La Figure 62 illustre l'évolution du niveau de cotisation par hectare en production et en regard de la valeur assurée³. Le niveau de cotisation par ha varie en général entre 35 et 45 \$/ha et comme on peut s'y attendre, les sommets de cotisation ont été enregistrés lors des années qui

² <https://www.fadq.qc.ca/statistiques/assurance-recolte/statistiques-annuelles/>.

³ Le niveau de cotisation, quelle que soit l'unité de mesure dans laquelle il est exprimé, n'inclut que la part de cotisation du producteur, soit 40 % de la cotisation totale. La part de 60 % restante est assumée par les gouvernements. Dans le reste du texte, lorsqu'il est mention de la cotisation, il est toujours seulement question de la part du producteur.

suivent celles de fortes indemnités. Il est important de mentionner ici que ces données ne doivent pas être comparées au dossier individuel d'un producteur puisqu'elles ont été compilées à partir des données agrégées rapportées par la FADQ. Cela dit, ces données relatives aux assurances agricoles peuvent être mises en parallèle aux coûts totaux d'un système d'irrigation dans la production de bleuets nains cultivés afin d'éclairer la décision du producteur. On voit, entre autres, que même lors de forts niveaux de cotisation pour le producteur (2011, 2012 et 2015), celle-ci s'élève à peine à 45 \$/ha. Ce coût est loin de celui estimé pour l'irrigation. En fait, il est déjà bien en deçà du seul coût de possession, et ce, quels que soient le coût d'acquisition initial et la superficie irriguée. Toutefois, il faut préciser que les taux de cotisation rapportés à la Figure 62 agrègent tous les niveaux de protection prévus à l'assurance-récolte, soit 60, 70 ou 80 % de la valeur assurée. Néanmoins, les niveaux de cotisations agrégés illustrés montrent que ceux-ci ont constamment diminué depuis le début des années 2010, en passant de plus de 6 % de la valeur assurée à moins de 4 % de la valeur assurée.

Cela dit, la décision d'investir dans un système d'irrigation dans la production de bleuets nains cultivés doit tenir compte de plusieurs facteurs, dont le ou les objectifs poursuivis avec l'irrigation et le niveau de protection souhaité par rapport au rendement probable, de même que la tolérance au risque du producteur, entre autres. À cet effet, la Figure 63 montre que même lors des années d'indemnités d'assurance relativement fortes entre 2007 et 2018, celles-ci sont plutôt loin des valeurs assurées et encore plus loin des valeurs de production totale prévisibles⁴. Ces années d'indemnités plus fortes ne couvraient sûrement pas toute la valeur assurée du fait que les pertes étaient partielles et ce facteur est aussi à considérer dans la décision d'investir dans l'irrigation, à savoir que les pertes affectent rarement la totalité de la production.

⁴ Il est important de distinguer les concepts de valeurs assurées et de valeurs de production totale prévisibles. La valeur assurée correspond à la portion de la valeur de production totale prévisible, elle-même basée sur des rendements probables individuels, que le producteur souhaite assurer. Dans le cadre du programme d'assurance-récolte, le producteur a la possibilité d'assurer 60, 70 ou 80 % de sa valeur de production totale prévisible.

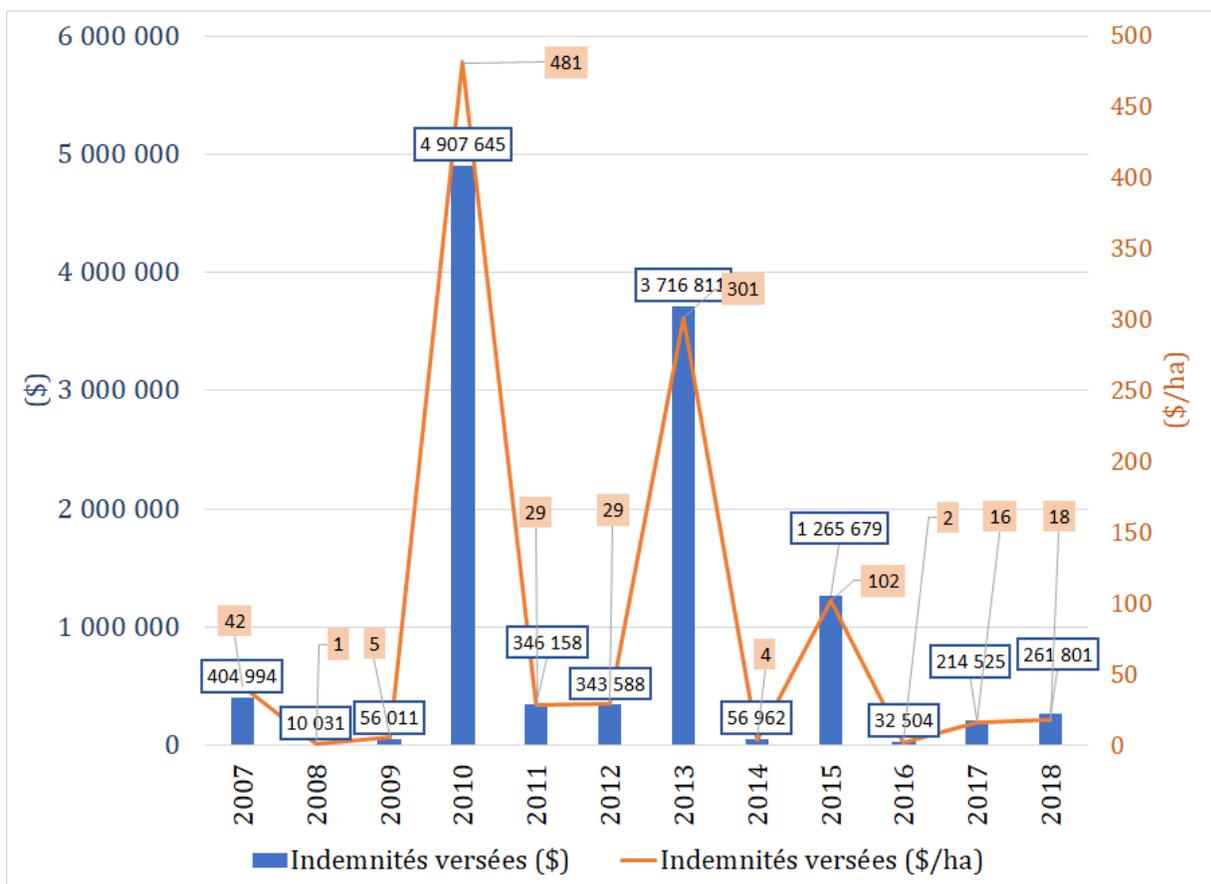


Figure 61. Indemnités versées (totales et \$/ha) au programme d'assurance-récolte individuelle du bleuet, Québec 2007-2018.

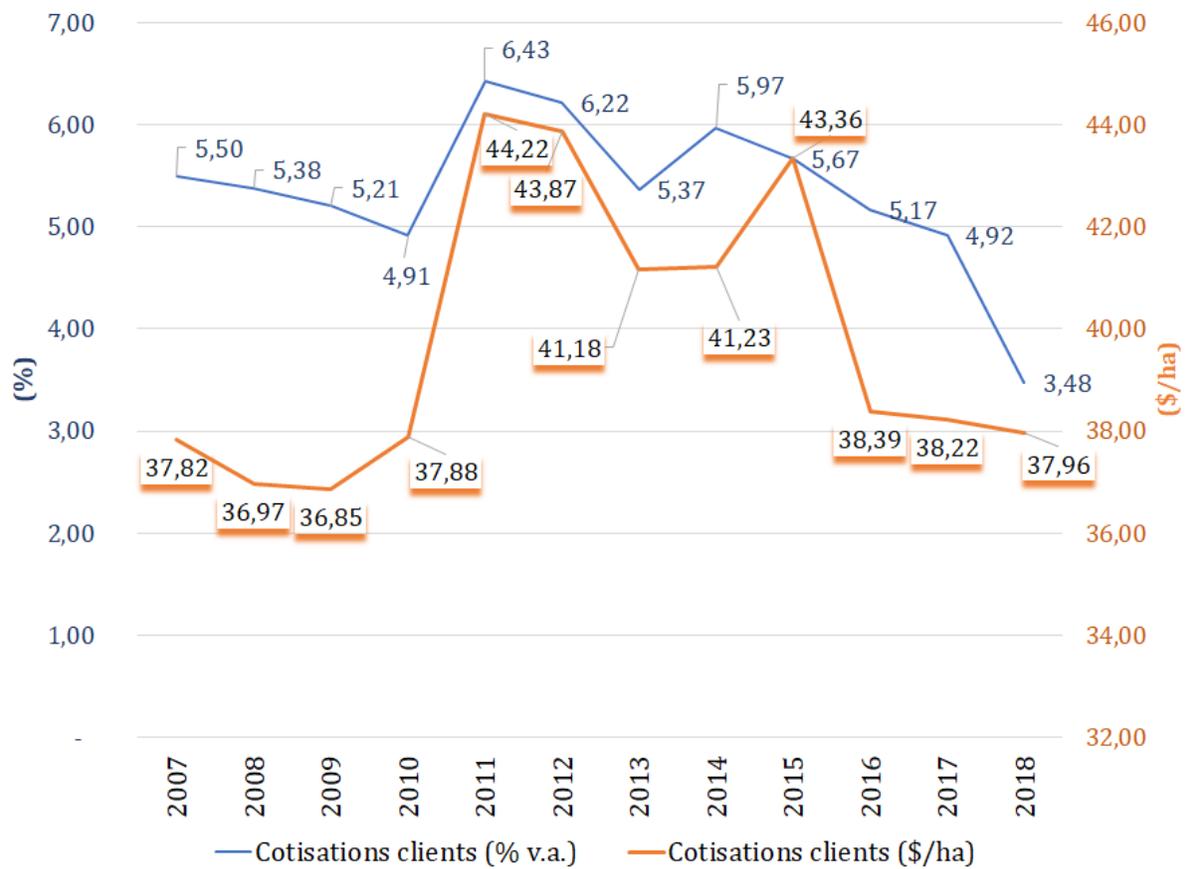


Figure 62. Niveau de cotisation (% de la valeur assurée et \$/ha) des clients à l'assurance-récolte individuelle du bleuët, Québec 2007-2018.

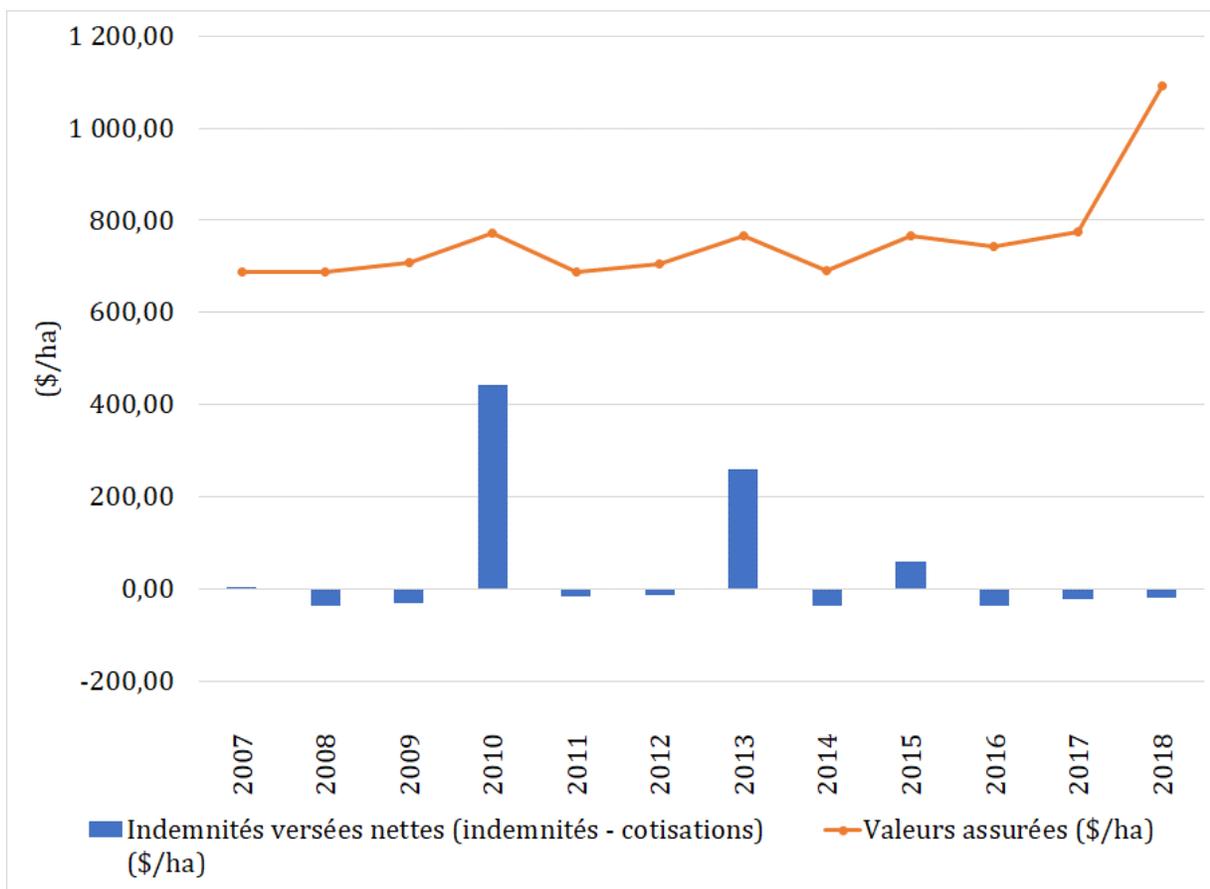


Figure 63. Indemnités versées nettes [indemnités - cotisations (\$/ha)] et valeurs assurées à l'assurance-récolte de la production de bleuets.

6. Analyse et discussion

Volet 1. Développer des connaissances et des outils pour raisonner l'irrigation en fonction du stress hydrique et du risque de gel des fleurs

Impact de l'irrigation sur les facteurs à l'étude

L'analyse à un facteur fixe pour les données ayant trait aux fruits, soit le poids total/2 m², le poids moyen/fruit, le taux en matières sèches et le degré en Brix, (Tableau 19 et Tableau 20; Tableau 26 et Tableau 27; Tableau 32 et Tableau 33) n'a pas généré de différence significative, peu importe le facteur, l'année ou le site. Même constat pour l'analyse ayant trait au nombre moyen de bourgeons floraux sur 10 tiges et la teneur en N des feuilles.

L'analyse s'est poursuivie à l'aide de contrastes réalisés sur le potentiel de rendement (nombre moyen de bourgeons floraux) et sur le poids total en fruits récoltés/2 m². L'approche retenue a été de former des groupes de traitements d'intérêts et de les comparer à l'aide de contrastes.

Les quatre premiers groupes d'intérêts formés l'ont été dans le but de vérifier si les interventions avec l'irrigation contre le gel des fleurs (déclenchement selon une consigne de température de l'air) a eu un impact sur le poids total en fruits récoltés (Tableau 21). Le 1^{er} groupe est composé des traitements qui ont la consigne A et qui sont protégés du gel des fleurs (T2 et T6), le 2^e, ceux qui ont la consigne A et qui ne sont pas protégés du gel des fleurs (T10 et T14). Les 3^e et 4^e groupes formés pour l'occasion sont respectivement composés de l'ensemble des traitements qui sont protégés du gel des fleurs (T1 à T8) et de l'ensemble des traitements qui ne le sont pas (T9 à T16).

Aucune différence significative n'a été mesurée en 2016 et 2017 à $p \leq 0,1$ (Tableau 22). En 2018, une différence significative à $p \leq 0,1$ a été mesurée en faveur de l'ensemble des traitements protégés du gel (T1 à T8 vs T9 à T16), au site Saint-David-de-Falardeau. Toutefois, pour le groupe de traitements spécifiques à la consigne A (T2 et T6 vs T10 et T16), aucune différence significative n'a été observée. Pour la même saison, une différence significative a aussi été mesurée au site Ascension-de-Notre-Seigneur, mais à la faveur des traitements qui ont la consigne A et qui n'ont pas été protégés du gel des fleurs. Alors qu'aucune différence significative n'a été mesurée lorsque l'ensemble des traitements protégés et non protégés (T1 à T8 vs T9 à T16) ont été comparés. Enfin, les deux sites ont des réponses à l'irrigation contre le gel des fleurs qui sont opposées.

En 2016, la consigne de -2°C n'a pas été atteinte, ce qui va de pair avec l'absence de différence significative. La consigne a été atteinte à 3 et 4 reprises en 2017 et 2018 respectivement au site Ascension-de-Notre-Seigneur (Tableau 11) et à 2 et 3 reprises en 2017 et 2018 respectivement au site Saint-David-de-Falardeau (Tableau 10). Davantage d'épisodes ont été déclenchés en 2018. Le Tableau 14 renseigne sur la température minimale de l'air qui a été atteinte au niveau du couvert végétal, dans les zones non protégées, lors des épisodes d'irrigation contre le gel des fleurs. De plus, au minimum atteint, la température de l'air ambiant mesurée par la station au même moment est aussi présentée. Les températures minimales mesurées laissent à penser qu'il soit très peu probable que les fleurs aient pu geler dans les zones non protégées. Même

que la consigne n'a pas toujours été atteinte lors d'une irrigation. Dans la pratique, il aurait été impossible de déclencher l'irrigation à la consigne précise. Le temps relié aux déplacements et les préparatifs entourant le déclenchement du ou des systèmes doivent être considérés. Cela implique d'anticiper l'atteinte de la consigne. Dans les faits, le responsable était averti si la température de l'air au niveau du couvert végétal atteignait 2°C. À ce moment, les prévisions météorologiques des prochaines heures étaient consultées et une décision était prise et le système était généralement déclenché avant que la température atteigne -2 °C. Par ailleurs, en aucun cas il ne s'est formé de glace sur le couvert végétal lors d'un épisode d'irrigation. Conséquemment, peu d'importance est accordée aux différences significatives qui ont été mesurées.

Précisions : La formation des prochains groupes de traitements d'intérêt n'a pas tenu compte du traitement d'irrigation contre le gel des fleurs. Ainsi, les T1 à T8 sont considérés « identiques » à leur vis-à-vis non protégés T9 à T16 (Tableau 3). Cela permet de doubler le nombre de répétitions pour chacun des huit traitements considérés pour l'analyse des résultats ayant trait à l'irrigation contre le stress hydrique.

Contrastes et potentiel de rendement

Pour chacun des sites et pour chacun des champs en végétation (2015, 2016 et 2017), le potentiel de rendement, évalué à l'automne avec le nombre moyen de bourgeons floraux sur 10 tiges, a été utilisé pour valider si un impact de l'irrigation en saison de végétation avait pu être atténué ou masqué par d'autres facteurs non mesurés, dans l'éventualité où une différence se serait exprimée en comparant le nombre moyen de bourgeons.

En 2015, la première année du projet, seulement le T6 et le T14 ont reçu un épisode d'irrigation contre le stress hydrique. Par conséquent, tous les traitements n'ayant pas reçu d'irrigation ont été regroupés ensemble et comparés au groupe composé des T6 et T14 (Tableau 23). En 2016 et 2017, les 10 traitements où l'irrigation contre le stress hydrique n'était pas permise en végétation ont été regroupés (T1 à T5 et T9 à T13) et comparés à chacun des groupes formés par les traitements où l'irrigation contre le stress hydrique était permise en végétation et en production, et ce, pour la consigne A (T6 et T14), la consigne B (T7 et T15) et la consigne C (T8 et T16).

Pour l'ensemble des contrastes effectués (Tableau 23, Tableau 29 et Tableau 35) une seule différence significative a été obtenue en 2017, au site Ascension-de-Notre-Seigneur, pour le contraste (T1 à T5 et T9 à T13) vs (T6 et T14) à $p \leq 0,1$. Dans ce cas, le nombre moyen de bourgeons floraux sur 10 tiges est de 42,6 pour le groupe de traitements où l'irrigation était permise en végétation et en production, comparativement à 35,8 pour le groupe de traitements où l'irrigation n'était permise qu'en saison de production. Un second contraste est près du seuil à $p \leq 0,1$, celui où tous les traitements non irrigués en végétation (T1 à T5 et T9 à T13) versus tous les traitements où l'irrigation était permise, sans égard à la consigne (T6 à T8 et T14 à T15).

Contrastes et rendement en fruits

Maintenant, en ce qui a trait aux contrastes effectués avec le poids total en fruits récolté, les groupes de traitements d'intérêt formés avaient d'abord comme objectif de valider s'il y avait un impact d'irriguer contre le stress hydrique en saison de production seulement ou en saison de végétation et de production. Pour y parvenir, la consigne A a été retenue, car c'est avec elle que le nombre d'épisodes d'irrigation a été le plus élevé. Donc, les premiers groupes de traitements formés ont été les T6 et T14 (consigne A, irrigation en végétation et production) et les T2 et T10 (Consigne A, irrigation en production seulement) (Tableau 24). Aucune différence significative n'a été observée pour le contraste entre ces deux groupes pour les saisons de production 2016 et 2018, soit pour les champs 1 de chacun des sites (Tableau 25 et Tableau 37). L'analyse s'est donc poursuivie en formant quatre groupes qui sont les suivants : l'ensemble des traitements de la consigne B (T3, T7, T11 et T15), de la consigne C (T4, T8, T12 et T16), les témoins (T1, T5, T9 et T13) et l'ensemble des traitements irrigués (tous sauf les témoins T1, T5, T9 et T13). Aucune différence significative n'a été observée, peu importe le contraste réalisé et Tableau 37).

Pour le champ 2, qui a été en production une seule fois (2017), des différences significatives à $p \leq 0,1$ ont été observées pour les deux sites en ce qui a trait au groupe T6 et T14 (A irrigation en Végé + Prod) vs T2 et T10 (A irrigation Prod) (Tableau 31). Pour le site Saint-David-de-Falardeau, le groupe de traitements T6 et T14 est « anormalement bas » ce qui explique les cinq contrastes qui sont significatifs. À L'Ascension-de-Notre-Seigneur, le groupe de traitements T6 et T14 (A irrigation en Végé + Prod) a un poids total en fruits récoltés significativement plus élevé que le groupe formé des T2 et T10 (A irrigation Prod). De plus, le groupe T6 et T14 (A irrigation en Végé + Prod) est significativement plus élevé que le groupe « Tout B » (T3, T7, T11 et T15).

Maintenant, l'absence quasi totale de différence significative en ce qui a trait au poids en fruits récolté, ne peut s'expliquer par l'absence d'épisodes d'irrigation. Hormis pour la saison en végétation de 2015, où seulement la consigne A a été atteinte et à une seule reprise tard en saison, pour les saisons suivantes, les consignes ont été atteintes à plusieurs reprises (Tableau 10 et Tableau 11). L'année 2016 a été celle où le plus grand nombre d'épisodes d'irrigation contre le stress hydrique a été effectué. Par exemple, la consigne A a été atteinte à 6 reprises en 2016 à L'Ascension-de-Notre-Seigneur.

À l'aide des équipements de mesure en place, le nombre de jours où le statut hydrique du sol d'une parcelle irriguée a été différent (plus humide) de celui d'une parcelle témoin non irriguée a été comptabilisé. Les résultats de cet exercice présenté aux Tableau 17 et Tableau 18, quoique variable selon la saison et la consigne, confirme que la culture a été soumise à des statuts hydriques du sol qui ont été différents des témoins non irrigués.

Parmi les facteurs qui ont pu nuire à l'obtention de différences significatives entre les traitements, il y a la « nature » même d'une bleuétière. Contrairement à la quasi-totalité des productions fruitières maraîchères exploitées de façon commerciale et « intensive », où le matériel végétal utilisé pour la production provient de l'extérieur du champ en culture et est génétiquement similaire, une bleuétière est composée de plants indigènes. Par conséquent, elle est composée d'une multitude de plants génétiquement différents les uns des autres. Les rendements ont été très variables d'une parcelle à l'autre, comme le confirment les erreurs

types mesurées (Tableau 19 et Tableau 20; Tableau 26 et Tableau 27; Tableau 32 et Tableau 33).

Y a-t-il eu des conditions propices au stress hydrique durant le projet ?

Le rendement est une excellente façon de mesurer l'impact d'un facteur. Dans ce cas-ci, la bleuetière a été soumise à différents régimes hydriques afin de vérifier s'il y avait un impact sur le rendement en fruits. Est-ce que les plants qui ont été les plus à risque de subir un stress hydrique, soit les témoins non irrigués (T1, T5, T9 et T13), en ont effectivement subi un? Le suivi effectué avec les sondes TDR permet d'évaluer cela. La plus longue période sans précipitations a été de 13 jours et elle a eu lieu du 19 juin au 1^{er} juillet 2018. Le prélèvement en eau de la culture (parcelles témoins) a été rapporté graphiquement à la Figure 11, pour le site Saint-David-de-Falardeau et à la Figure 13, pour le site de l'Ascension-de-Notre-Seigneur. Pour évaluer si la culture a subi un stress hydrique durant cette période, la valeur quotidienne de prélèvement en eau de la culture a été comparée à celle de l'évapotranspiration (ET_p) mesurée par la station météorologique. Le résultat de cet exercice est présenté pour chacun des sites à la Figure 12 et à la Figure 14. Les variations de l' ET_p sont bien « suivies » par le prélèvement en eau de la culture. Une augmentation de l' ET_p qui ne peut être suivi par le prélèvement suggère une contrainte de prélèvement en eau pour la culture qui peut être interprété comme un stress hydrique.

Autonomie d'un champ selon la RFU du sol

Les prélèvements en eau de la culture qui ont été évalués à l'aide de sondes TDR démontrent un prélèvement en eau qui est faible comparativement à d'autres cultures. Ces sondes mesurent la variation de la teneur en eau du sol, soit une augmentation ou une diminution. Dans le cas de la diminution, il s'agit du prélèvement en eau de la culture et des pertes en eau à la surface du sol par évaporation. En ce qui a trait à une bleuetière « mature », les pertes en eau sont surtout attribuables au prélèvement par la culture, car la totalité de la surface du sol est protégée en permanence par la culture et l'accumulation de matière organique.

Par exemple, pour la pomme de terre, il est habituel de mesurer un prélèvement (pertes en eau par transpiration et évaporation) de plus de 5 mm par jour lorsque cette culture est à son plein développement (Boivin et coll., 2018). La situation observée pour le bleuet diminue de beaucoup le risque que cette culture subisse un stress hydrique. En prenant un ET_p moyen de 3,8 mm (294 mm/78 jours) (Tableau 8) et un coefficient cultural (K_c) de 0,39 pour le champ 1 en production en 2018 à Saint-David-de-Falardeau (Tableau 15) cela fait un prélèvement de 1,5 mm par jour. En considérant un sol avec une RFU de 20 et 40 mm, cela prendrait respectivement 13 et 26 jours pour épuiser cette réserve. De plus, selon la période de la saison considérée, le nombre de jours d'autonomie en eau pourrait être plus élevé. En effet, tel qu'illustré de la Figure 16 jusqu'à la Figure 21, le prélèvement en eau quotidien de la culture est maximal dans la première moitié de la saison et diminue constamment par la suite. Les probabilités qu'un épisode de pluie ait lieu entre-temps sont plus élevées que pour une pomme de terre qui épuiserait ces RFU en 4 et 8 jours.

Est-ce que le prélèvement en eau pourrait être plus élevé?

Est-ce que les prélèvements en eau pourraient être plus élevés? La Figure 22 et la Figure 23 fournissent une partie de la réponse. Ces dernières indiquent une relation entre des K_c plus élevés et un poids en fruits plus élevé et inversement. Conséquemment, un rendement supérieur à ceux mesurés pourrait fort probablement avoir un impact à la hausse sur le prélèvement en eau de la culture. Maintenant, est-ce que les rendements mesurés expriment le plein potentiel d'une bleuetière? Il est plausible de penser que non du fait qu'aucun intrant de synthèse n'est utilisé en saison de production.

Outils de gestion de l'irrigation

Le tensiomètre est un outil d'aide à la décision qui est utilisé dans les cultures qui sont irriguées. De plus, les tensiomètres dont les mesures peuvent être consultées à distance sont très utiles pour la gestion de l'irrigation en contexte de protection contre le gel. Toutefois, pour la gestion de l'irrigation contre le stress hydrique, le nombre d'unités nécessaire pour couvrir de grandes superficies peut rapidement devenir élevé. Ces appareils sont très précis et sont un très bon indicateur de l'état hydrique du sol. Leur limite est qu'ils mesurent le sol à un endroit précis d'un champ donné. Le volume de sol mesuré par un tensiomètre peut être de l'ordre de 2,5 litres. Par ailleurs, la variabilité observée pour les rendements l'est fort probablement aussi pour le prélèvement en eau de culture. Dans un contexte où les superficies à couvrir sont très

grandes et que les sources de variabilité sont aussi très élevées, utiliser le bilan hydrique comme un outil d'aide à la décision est tout à fait pertinent.

Une approche dite « hybride » serait un bon compromis entre précision et coût et maximise les avantages de chacun des outils. Cette approche, comme décrite dans Boivin et coll. (2018), privilégie plus d'un outil d'aide à la décision (ex. bilan hydrique, tensiomètres, sondes TDR) pour déterminer le moment où déclencher une irrigation. Par exemple, le bilan hydrique serait utilisé en combinaison avec quelques tensiomètres installés dans des endroits représentatifs.

Volet 2. Impact d'un climat en évolution sur le synchronisme fleur-gel et le bilan hydrique

Modèles bioclimatiques pour prédire le développement phénologique du bleuet nain

Dans le cadre de ce projet, deux modèles phénologiques pour le bleuet nain ont été développés à partir de jeux de données recueillies dans différentes régions du Québec de 2009 à 2016. Ces deux modèles sont maintenant implantés dans le logiciel CIPRA. Le premier modèle débute son cumul des degrés-jours à partir du 1^{er} mars, tandis que le deuxième débute son cumul à la date où l'épaisseur de neige devient inférieure à 10 cm. Ces modèles donnent des résultats fort acceptables, mais le deuxième (neige < 10 cm) est le plus précis. Bien que plus précis, ce modèle requiert les données météorologiques de l'année précédente. Afin d'être utilisé avec CIPRA, un module est disponible pour déterminer la dernière date où le couvert de neige est supérieur ou égal à 10 cm. Il est aussi possible de fournir manuellement la date d'observation de couverture de neige.

Le développement de tels modèles phénologiques a été une étape importante dans le processus de l'étude de l'impact des changements climatiques sur la culture du bleuet nain. Tous les indices associés au synchronisme fleur-gel, aux bilans hydriques en années de production et de végétation, et au rendement en fruits, intègrent des prédictions des stades phénologiques.

Impact d'un climat en évolution sur le synchronisme fleur-gel

En climat de référence, la date moyenne d'atteinte de la pleine floraison se situe entre le 9 et le 17 juin (Tableau 44). Selon un scénario de changement climatique inférieur ou supérieur, les dates moyennes d'atteinte de pleine floraison seraient respectivement atteintes de 9 à 32 jours plus tôt et de 12 à 40 jours plus tôt. Maintenant, en ce qui a trait au nombre de jours où la température minimale de l'air est inférieure à 0° C pendant la floraison, il est actuellement de 1,0 à 1,9 (Tableau 45). Ce nombre sera respectivement de 0,0 à 0,9 et de 1,0 à 2,9 en climat futur, pour le scénario inférieur et supérieur. En conséquence, les projections des scénarios climatiques utilisées n'indiquent pas de changements majeurs dans les indices associés au synchronisme fleur-gel. Tant le dernier gel printanier que la période de floraison du bleuet nain arriveront plus tôt au printemps.

Impact d'un climat en évolution sur le bilan hydrique

En année de production et pour la période comprise entre la nouaison et la récolte, les précipitations totales pourraient demeurer semblables ou diminuer jusqu'à 32 mm (Tableau 46). Alors que l'évapotranspiration quotidienne moyenne pourrait augmenter de 0,4 à 1,0 mm/jour. Durant la même période, le nombre de jours où la réserve en eau facilement utilisable pourrait être complètement épuisée (RFU 20 mm), pourrait passer de 1,3 à 3,7 jour actuellement, à de 5,1 à 8,7 jours dans un contexte de changement supérieur. Sans surprise, ce nombre de jours diminue avec une RFU de 40 mm. Avec une telle RFU, le nombre de jours où cette dernière est épuisée est actuellement de 0,0 à 1,9 jour et pourrait atteindre de 2,0 à 4,9 jours en contexte de changement supérieur.

En année de végétation, la période considérée est plus grande, car elle débute à l'émergence des ramets et se termine au 31 octobre. Actuellement, le nombre de jours où la RFU s'épuise totalement (RFU = 0) est de 0,0 à 9,0, selon que la RFU soit de 40 ou 20 mm (Tableau 47). En climat futur et avec une RFU de 20 mm, le nombre de jours où la RFU est épuisée pourrait être de 22,5 jours en scénario supérieur. Pour un site avec une RFU de 40 mm, ces changements (contexte supérieur) n'augmentent pas beaucoup le risque que la culture subisse un stress hydrique. Toutefois, avec une RFU de 20 mm, ce risque devient important.

Modèle bioclimatique pour estimer le rendement en fruits

Pour le modèle de prédiction du rendement en fruits, correspondant au jour suivant le stade « fruit mature - récolte », les variables sélectionnées expliquent 63,6% de la variabilité du rendement. Toutefois, pour l'année 1998, ce modèle a estimé un rendement largement supérieur à la réalité. Il semble qu'un gel des fleurs à $-3,5^{\circ}\text{C}$ durant le stade pleine floraison du bleuet nain aurait causé des pertes de rendement très importantes, puisque les fleurs exposées à cette température ne produisent pas de fruits (Hicklenton et coll., 2002). Un gel majeur comme en 1998 n'est pas pris en compte par le modèle. D'ailleurs, l'exercice a été réalisé en retirant l'année 1998 et le modèle expliquait 82,4% de la variabilité du rendement. En 2013, le rendement prédit était aussi supérieur à celui qui a été observé. Il y a eu deux jours où la température minimum de l'air a été de 0,3 et $0,2^{\circ}\text{C}$ durant les stades boutons floraux et pleine floraison. Étant donné que ce sont des températures de gel potentiel, elles ne sont pas totalement prises en compte par les variables météo sélectionnées. Il est plus difficile d'expliquer des prédictions inférieures aux rendements observés, comme en 1991, 2009 et 2016. En 2009, il y a eu dix jours de gel d'intensité modérée du débourrement au début de la floraison donc peut-être qu'il y a eu peu de dommages. Même si le rendement prédit en 2016 est inférieur de 604 kg/ha au rendement observé, il est le rendement annuel le plus élevé tout comme dans la réalité.

L'utilisation de variables associées à la période de floraison augmente de façon importante le pourcentage de la variabilité expliquée par le modèle, donc cela confirme que cette période est un moment déterminant pour le rendement. C'est surtout le gel durant la floraison qui est à surveiller. À l'inverse, ce qu'il se passe l'année précédant la récolte semble avoir un faible impact sur le rendement. Pour la période hivernale, l'épaisseur de neige n'a pas été non plus un facteur déterminant pour le rendement. Au cours des années utilisées pour développer ce modèle, les variables associées à l'épaisseur de neige pendant l'hiver se sont avérées peu

limitantes pour causer des dommages aux bourgeons et ainsi limiter le rendement. À ce stade-ci, il est donc risqué d'obtenir des projections de rendement du bleuets nain dans un climat futur (2041-2070), car cette couverture de neige risque de changer de façon importante pour la région du Saguenay Lac-St-Jean... et le modèle bioclimatique dans sa forme actuelle ne répondra pas adéquatement à ces changements.

Volet 3. Analyser la rentabilité de l'irrigation en climat actuel et futur

La présente analyse économique se veut davantage un complément d'information qu'une analyse de rentabilité. Néanmoins, elle offre les outils pour les producteurs de bleuets nains cultivés et leurs conseillers pour prendre une décision éclairée au regard de l'investissement dans un système d'irrigation.

À la lumière de cette information, les perspectives de rentabilité relatives à l'irrigation des bleuets nains cultivés sont plutôt faibles en raison du coût élevé de l'irrigation en regard de l'alternative qui s'offre aux producteurs, soit l'assurance-récolte. Toutefois, certaines réserves doivent être émises. Tout d'abord, l'assurance-récolte ne protège jamais des risques sur toute la valeur de la production prévisible en raison des taux de couverture partiels (80 % ou moins). Aussi, pour les entreprises dont le rendement individuel probable est déjà élevé ou très élevé, par rapport à la moyenne de l'industrie, le système d'irrigation peut présenter une option intéressante pour deux raisons principales. Premièrement, la meilleure couverture à l'assurance-récolte, soit 80 % de la valeur de production totale prévisible, laisse 20 % de cette valeur sans assurance et donc, plus vulnérable aux risques climatiques. Par conséquent, l'entreprise qui enregistre des rendements probables, mais élevés, de 5 000 kg/ha en moyenne dans ses bleuetières peut voir une partie de la valeur de sa production sans protection s'il n'y a pas de système d'irrigation. À un niveau de prix de marché faible, comme c'est le cas dans les dernières années (0,55 \$/kg), cela peut se chiffrer à 550 \$/ha⁵. De plus, pour cette entreprise aux forts rendements, le seuil de rentabilité à atteindre est moindre en termes de gains de rendement. En effet, comme on peut le constater dans la matrice en annexe au Tableau 54, plus le rendement de base est élevé et plus il est facile de rentabiliser l'irrigation dans la production, en termes relatifs. Toutefois, même à un rendement de 5 000 kg/ha, l'investissement peut être très difficile à rentabiliser si le coût d'acquisition est plutôt élevé et que les superficies sont petites.

En tenant tous ces éléments en considération, l'analyse pourrait être approfondie en étudiant, selon différents marchés (ex. : transformation, frais, autocueillette) différentes combinaisons de système d'irrigation et de différents plans de couverture d'assurance-récolte. En effet, il existe probablement un optimum selon le type d'entreprises, ses rendements probables et ses superficies pour une combinaison d'irrigation et de produits d'assurance. De futurs travaux pourraient ainsi se pencher sur l'élaboration d'un outil dynamique permettant aux producteurs et aux conseillers d'évaluer la rentabilité de chaque option sur chaque entreprise individuellement.

⁵ 5 000 kg/ha x 20 % x 0,55 \$/kg = 550 \$/ha

7. Conclusion et recommandations

La pertinence d'adopter ou non l'irrigation, tout comme celle de déclencher un épisode, implique un raisonnement qui doit être alimenté par une diversité de facteurs. Le premier devrait être de bien cerner le ou les objectifs de l'irrigation, qui peuvent être différents d'une entreprise à l'autre, et même d'un champ à l'autre. La protection contre le gel des fleurs et/ou des fruits, viser le rendement potentiel de la culture, s'assurer d'approvisionner son marché, adopter une approche dite « d'assurance-récolte » où l'on intervient seulement en conditions extrêmes de stress hydrique ou même la fertigation, sont tous des objectifs qui impliquent un raisonnement qui peut aboutir à justifier la prise d'une décision qui peut être ou sembler en contradiction avec d'autres facteurs considérés.

Le niveau du risque de subir un stress hydrique, auquel est exposée la bleuetière, doit aussi être considéré et évalué. Dans les contextes étudiés, ce risque a été faible. De 2015 à 2018, quatre champs ont été utilisés pour réaliser le projet où un total de six cycles de production a été complété. Les deux sites situés Saint-David-de-Falardeau sont en production depuis 1998 et 2002 et la texture du sol varie du loam sableux au sable. À l'Ascension-de-Notre-Seigneur, les deux champs sont en production depuis 2007 et la texture du sol varie du sable à sable loameux. Rarement, la diminution quotidienne de la teneur en eau du sol, rapportée en mm, n'a dépassé 50 % de l'évapotranspiration potentielle (ET_p) mesurée sur le site. En s'appuyant sur les observations faites entre la valeur du K_c et le rendement mesuré, il est raisonnable de croire que la valeur du K_c pourrait être plus élevée et qu'il pourrait se rapprocher de la valeur d' ET_p . Ce rapport entre la diminution de la teneur en eau du sol et l' ET_p peut aussi être utilisé comme un coefficient cultural (K_c), entre autres utile, pour estimer la hauteur d'eau utilisée par la culture. De tels coefficients ont été mesurés pour différentes périodes et pour l'année en végétation et en production. Globalement, pour la période comprise entre le 4 juin et la récolte, les K_c mesurés sont de l'ordre de 0,20 à 0,61 et les valeurs les plus élevées sont reliées aux rendements les plus élevés. De plus, cette tendance s'observe déjà durant l'année de végétation, à savoir qu'un K_c plus élevé en végétation serait un indicateur d'un rendement plus élevé en année de production.

Avec les quatre régimes hydriques qui ont été à l'étude et le suivi du statut hydrique du sol qui a été fait en continu, il est possible d'affirmer que la réserve en eau du sol facilement utilisable par la culture (RFU) était au-delà de 30 mm pour l'ensemble des sites. La texture du sol et la profondeur d'enracinement influencent grandement cette réserve, alors que la vitesse à laquelle cette réserve s'épuise est dépendante de l'évapotranspiration de la culture (ET_c), soit les pertes par évaporation à la surface du sol et par transpiration, via la plante. Sommairement, la quantité d'eau prélevée par la culture dépend certainement de celle-ci, mais aussi de son stade de développement et de l' ET_p de la journée. Les résultats de ce projet indiquent que cette réserve en eau s'épuise plus lentement avec le bleuet nain que pour d'autres cultures.

Aucune contrainte de prélèvement en eau n'a été observée durant les essais, même pour les traitements non irrigués. De plus, aucun impact des régimes hydrique à l'étude n'a été mesuré sur le rendement en fruits. Un facteur qui semble impliqué dans cette impossibilité à mesurer l'impact des différents régimes hydriques est la grande variabilité du rendement qui a été mesurée à l'intérieur des champs où le projet a été réalisé. Il y avait autant de parcelles

irriguées et non irriguées qui se retrouvaient à la limite inférieure, qu'à la limite supérieure. D'autres facteurs, plus « puissants » que le régime hydrique semble expliquer cette variation de rendement. Un impact du stress hydrique mesurable aurait permis de déterminer des valeurs de RFU pour ces sites. Deux valeurs de RFU ont quand même été identifiées afin de poursuivre l'étude du risque de stress hydrique en climat actuel et futur. Une valeur de 20 mm a été retenue pour une RFU qui pourrait être représentative d'un site où la texture du sol est un sable et une seconde valeur de 40 mm, pour des sols un peu plus lourds, comme un loam.

En climat actuel (1981 à 2010) pour l'année en production et avec une RFU de 40 mm, l'analyse arrive aux mêmes constats que les résultats obtenus sur le terrain, soit un risque faible de subir un stress hydrique. Avec une RFU de 20 mm, le risque augmente un peu, avec un nombre de jours où la RFU serait épuisée à 1,3 et 3,7. En scénario de changement climatique (2041 à 2070), ce nombre de jours pourrait être de 1,3 à 5,0 (scénario inférieur) et de 5,1 à 8,7 (scénario supérieur). En année de végétation (émergence au 31 octobre) la période est plus grande et le cela se répercute sur le nombre de jours où la RFU pourrait être épuisée. En climat actuel, une RFU de 20 mm pourrait être épuisée de 4,6 à 9,0 jours par saison et en climat futur de 4,6 à 13,5 jours (scénario inférieur) et de 9,1 à 22,5 jours (scénario supérieur). Même si ces 22,5 jours où la culture subit un stress hydrique ne sont pas consécutifs, un tel contexte pourrait possiblement affecter négativement la formation des bourgeons floraux.

Actuellement, l' ET_c est plutôt faible, mais il est raisonnable de penser que le potentiel est plus élevé. Advenant que cela se valide, l'épuisement de la RFU serait plus rapide, ce qui augmenterait le risque que la culture subisse un stress hydrique. En climat actuel (1981 à 2010), l' ET_p quotidienne (nouaison à la récolte) est de 3,9 à 4,6 mm. En climat futur, ces valeurs pourraient être de 4,3 à 5,0 mm (scénario inférieur) et de 5,0 à 5,4 mm (scénario supérieur). Le K_c utilisé pour l'analyse est de 0,45. Donc, actuellement, en absence d'apport d'eau, la RFU diminue de 1,8 à 2,1/jour, ce qui est va de pair avec ce qui a été observé. En climat futur, la RFU pourrait s'épuiser de 1,9 mm et même jusqu'à 2,4 mm/jour. Maintenant, si la valeur du K_c augmente, à 0,75, ça pourrait aller jusqu'à 4,1 mm/jour.

Maintenant, en ce qui a trait au synchronisme fleur-gel, le risque a été évalué en évaluant le nombre de jours où la température minimale de l'air durant la floraison atteint une valeur inférieure à 0°C. Ce nombre est actuellement (1981 à 2010) de 1,0 à 1,9. En climat futur il pourrait être de 0,0 à 0,9 (scénario inférieur) ou de 1,0 à 2,9 (scénario supérieur). En ce qui a trait à ces conditions lors de la maturation des fruits, le nombre de jours est de 0,0 à 0,9, peu importe la période ou le scénario. Donc, les risques de gel ne changeront pas de manière significative en climat futur.

Les informations qui précèdent sont spécifiques à la région considérée par les essais terrain. Toutefois, en consultant les cartes qui sont présentées dans ce document, il est possible d'obtenir le même type d'information selon la région.

En considérant que les différents régimes hydriques n'ont pas mené à des différences significatives de rendement, l'analyse économique qui a été présentée consiste davantage à offrir un complément d'information sur les coûts de l'irrigation et les seuils de rentabilité à atteindre, en termes de gain de rendement, pour rentabiliser l'investissement. Les deux scénarios présentés impliquent pour le premier, un investissement de 236 709 \$ dans un système d'irrigation par aspersion, avec une pompe à essence, à l'état neuf pour la protection

contre le gel sur 20 ha. Seulement pour atteindre le seuil de rentabilité associé à l'achat, avec un prix de vente du bleuet à 0,55 \$/kg, il faut obtenir un gain annuel de rendement de 3219 kg/ha. Ce système peut aussi être utilisé contre le stress hydrique.

Le deuxième scénario implique un investissement de 84 010 \$ pour l'achat d'un canon enrouleur neuf avec une pompe de type PTO. Le seuil de rentabilité pour ne couvrir que le prix d'achat, en termes de gain en rendement annuel, serait de 1369 kg/ha, à un prix de vente du bleuet de 0,55 \$/kg).

Cela dit, dans le contexte actuel (coût de l'assurance, prix des bleuets, coût des systèmes d'irrigation), il semble que l'investissement dans un système d'irrigation n'est pas avantageux par rapport à l'assurance-récolte, si la finalité de ce système est essentiellement ou uniquement la gestion des risques climatiques.

Toutefois, le prix de vente du bleuet, les conditions d'accès à l'assurance récolte et aussi les rendements, sont des facteurs qui peuvent grandement varier dans un horizon relativement court. Par conséquent, la réflexion ayant trait à la décision d'adopter ou non l'irrigation devrait s'appuyer sur plus d'un scénario. Toujours à court terme, si le risque de stress hydrique est plutôt faible, certains scénarios de changements climatiques indiquent que ce risque va augmenter dans le futur et pourrait devenir important, surtout pour les sites qui ont une RFU de 20 mm.

Recommandations

Identifier le ou les objectifs de l'irrigation.

- Il s'agit principalement, dans le cadre du bleuet nain, de se demander si l'irrigation sera utilisée comme protection contre le gel et/ou contre le stress hydrique. D'autres objectifs comme la fertigation, la qualité, viser un rendement optimal ou une approche « assurance-récolte » pourrait aussi être considérés.

Évaluer le niveau du risque de stress hydrique auquel est exposée la culture.

- Cette démarche est à faire à l'échelle du champ et de l'entreprise. Ce risque augmente en présence d'un sol sableux, d'une faible RFU, d'une productivité élevée ou encore d'une concentration géographique des superficies en production.
- Par exemple, avec une RFU de 20 mm et un prélèvement en eau moyen quotidien de 2,1 mm, il faudrait 10 jours sans précipitations pour que la culture subisse un stress hydrique.

Évaluer le niveau du risque de dommage des fleurs dû au gel.

- Ce risque est actuellement plutôt faible et selon le scénario de changements climatiques utilisé, ce risque demeurera faible. Cependant, selon l'emplacement de la bleuetière et l'aménagement de cette dernière, ce risque pourrait être plus élevé.

Réaliser des essais à petites échelles avant d'adopter l'irrigation.

- Même si le niveau du risque identifié est élevé, des essais à petites échelles devraient toujours être réalisés avant d'investir des sommes importantes dans un système d'irrigation utilisé contre le stress hydrique.

Utilisez des outils d'aide à la décision tant pour gérer l'irrigation que pour évaluer la pertinence d'adopter cette pratique.

- Le tensiomètre est un outil d'aide à la décision qui est utile pour connaître le moment où la consigne de déclenchement de l'irrigation est atteinte. Ce dernier, tout comme la sonde TDR, est utile pour évaluer la RFU et identifier une consigne de déclenchement.
- Le bilan hydrique est un outil d'aide à la décision qui est adapté au contexte du bleuet nain, soit de grandes superficies et une variabilité importante. Le bilan hydrique est aussi utile pour évaluer le niveau du risque de stress hydrique. À l'aide d'une valeur de RFU et d'un K_c , il est possible d'utiliser les données historiques ayant trait aux conditions météorologiques (ET_p et précipitations) et de vérifier à combien de reprises la RFU se serait épuisée.

S'assurer que la source d'approvisionnement en eau sera suffisante.

- La présence d'un cours ne suffit pas. Il faut connaître le volume d'eau qui sera nécessaire pour couvrir les superficies qui seront irriguées et aussi, s'assurer de la qualité et s'informer de la réglementation qui encadre les prélèvements.

Choisir le bon système d'irrigation.

- Si l'objectif principal est la protection contre le gel, il faut se concentrer sur les systèmes d'irrigation qui sont fixes. Cependant, si l'objectif est une approche « assurance-récolte », un système mobile, comme un canon avec enrouleur, est plus approprié.

En contexte irrigué, prioriser les champs les plus productifs.

- Les probabilités de rentabiliser les investissements faits pour l'irrigation seront plus élevées avec les champs qui ont le plus grand potentiel de rendement.

Tenir compte des risques de dommages hivernaux.

- Quoique l'irrigation ne puisse pas diminuer ce risque, celui-ci devrait être considéré. Le nombre de jours avec une couverture de neige inférieure à 10 cm pendant la période hivernale augmentera dans le futur. Tout comme le nombre de jours où la température du sol à 5 cm sera plus chaude que -5°C pendant la période hivernale. L'utilisation de brise-vent, comme dans d'autres cultures fruitières, pourrait favoriser une couverture de neige plus élevée.

8. Références

Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). 2012. Profil de la culture du bleuet nain au Canada. Consulté le 9 décembre 2014, tiré de http://publications.gc.ca/collections/collection_2012/agr/A118-10-31-2012_-fra.pdf.

Agrinova, CRAAQ, MAPAQ, Club Conseil Bleuets. 2016. Guide de production du bleuets sauvage.

Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes et M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration - Guidelines for computing crop requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No 56. Rome.

American Society of Civil Engineering (ASCE). 1990. Evaporation and irrigation water requirement. ASCE manuals and reports on Engineering Practice No 70. ASCE.

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. *Can. J. Plant Sci.* 45:276-284.

Bergeron, L. 1995. Effet de la teneur en eau du sol sur le rendement et la qualité des fruits du bleuets nain. Mémoire de maîtrise, Université du Québec. Avril. 68 p.

Boivin, C. et coll. 2018. Gestion raisonnée de l'irrigation – Guide technique. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. 312 p.

Boivin, C. et C. Landry. 2011. Impact du pilotage raisonné de l'irrigation sur l'efficacité fertilisante azotée et le rendement en pomme de terre. Rapport de recherche, IRDA. 45 p.

Boivin, C., J. Vallée, P.-O. Martel et D. Bergeron. 2016. Application et validation d'une stratégie d'irrigation dans la culture du bleuets nain. Rapport final remis au MAPAQ. IRDA. 38 p.

Brinen, G.H., S.A. Bienert et T.E. Crocker. Current status of the blueberry industry in Alachua County and delineation of problem areas associated with soil acidity as affected by high pH irrigation water. *Proc. Fla. State Hort.* 99: 200-202.

Cappiello, P.E. et Dunham, S.W. 1994. Seasonal variation in low-temperature tolerance of *Vaccinium angustifolium* Ait. *HortScience* 29(4):302-304.

Centre d'étude sur les coûts de production en agriculture (CECPA). 2016. Liste des durées de vie utile des actifs utilisées pour les études de coûts de production. CECPA, 7 pages.

Centre de références en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2015. Loyer annuel - Fonds de terre, bâtiments, machinerie et équipement (AGDEX 824/825a). CRAAQ, 2 pages.

Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ). 1988. Méthodes d'analyse des sols, des fumiers et des tissus végétaux. CPVQ. Québec. Agdex 533, méthode SS-1.

Dalton, T., A. Files et D. Yarborough. 2002. Investment ownership and operating cost of supplemental irrigation systems for Maine wild blueberries. *Maine. Agr. For. Agr. Expt. Sta. Tech. bul.* 183.

- Desjardins, E.-C. 2012. Étude sur l'entomofaune et l'irrigation par aspersion en bleuetières semi-cultivées. Thèse doctorat. Université du Québec à Montréal. 145 p.
- Edwards, W. 2015. Estimating Farm Machinery Costs - PM 710 (A3-29). Iowa State University – Extension and Outreach, 11 pages.
- Ehlenfeldt, M.K., L.J. Rowland, E.L. Ogden et B.T. Vinyard. 2012. Cold-hardiness, acclimation, and deacclimation among diverse blueberry genotypes. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 137:31-37.
- Farooque, A., F. Abbas, Q.U. Zaman, A. Madani, D.C. Percival et M. Arshad, “Soil Nutrient Availability, Plant Nutrient Uptake, and Wild Blueberry (*Vaccinium angustifolium* Ait.) Yield in Response to N-Viro Biosolids and Irrigation Applications,” *Applied and Environmental Soil Science*, vol. 2012, Article ID 638984, 7 pages, 2012.
- Forest Lavoie. 2014a. Plan stratégique du secteur québécois des bleuets sauvages 2014-2018. 17 p.
- Forest Lavoie. 2014b. Tableau de bord sur les marchés des bleuets sauvages du Québec. No.3 Vol. 2. Forest Lavoie conseil pour le SPBQ.
- Fortin, L., Lamontagne, M. et Pagé, C. (s.d.). Gestion de la neige à l'aide de brise-vent. Feuille de renseignements sur le bleuet sauvage A.4.1, Ministère de l'Agriculture, de l'Aquaculture et des Pêches du Nouveau-Brunswick. 5 p.
- Gauthier, N.W. et Kaiser, C. (2013). *Midwest Blueberry Production Guide*. University of Kentucky, College of Agriculture, Food and Environment. Cooperative Extension Service, ID-210, Lexington, KY. 58 p.
- Gee, G.W. et J.W. Bauder, J.W. 1986. Particle-size analysis. p. 383-411. In A. Klute (ed) *Methods of soil analysis*. Part 1. ASA. Monograph No 9. 2nd edition. Madison, WI.
- Glass, V.M., D.C. Percival et J.T.A Proctor. 2005. Tolerance of lowbush blueberries (*Vaccinium angustifolium* Ait.) to drought stress. I. Soil water and yield component analysis. *Can. J. Plant Sci.* 85: 911-917.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). 2013: Résumé à l'intention des décideurs, *Changements climatiques 2013: Les éléments scientifiques*. Contribution du GIEC au cinquième Rapport d'évaluation du GIEC. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York (État de New York), É-U.
- Hall, I.V., Aalders, L.E. et McRae, K.B. 1982. Lowbush blueberry production in eastern Canada as related to certain weather data. *Canadian Journal of Plant Science* 62:809-812.
- Hepler, P.R. et A.A. Ismail. 1985. The split block design: A useful design for extension and research in lowbush blueberries. *HortScience*. 20:735-737.
- Hicklenton, P.R., J.Y.C. Reekie, K. MacKenzie, D. Ryan, L.J. Eaton, and P. Havard. 2002. Freeze damage and frost tolerance thresholds for flowers of the lowbush blueberry (*Vaccinium angustifolium* Ait). *Acta Hort.* 574:193-201.
- Hunt, J.F., C.W. Honneycutt, G. Starr et D. Yarborough. 2008. Evapotranspiration rates and crop coefficients for lowbush blueberry (*Vaccinium angustifolium*), *Int. J. Fruit sci.*, 8:4, 282-298.

- Girona, J. 2017. Une approche par traits fonctionnels pour améliorer les rendements du bleuet sauvage au Saguenay-Lac-Saint-Jean. Mémoire de maîtrise présenté au Département de biologie, Faculté des sciences, Université de Sherbrooke. 65 p.
- Ismail, A.A., J.M. Smagula et D.E. Yarborough. 1981. Influence of pruning method, fertilizer and terbacil on the growth and yield of the lowbush blueberry. *Can. J. Plant Sci.* 61:61-71.
- Kinsman, G. 1993. The History of the Lowbush Blueberry Industry in Nova Scotia: 1950-1990. Blueberry Producers' Association of Nova Scotia. 185 p.
- Meier, U. 2001. Growth Stages of Mono- and Dicotyledonous Plants: BBCH Monograph. Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry. Germany. 158 p.
- Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Pêcheries du Québec (MAPAQ). 2015. Statistiques régionales - Saguenay-Lac-Saint-Jean.
- Murphy, J.M., D.M.H. Sexton, D.N. Barnett, G.S. Jones, M.J. Webb, M. Collins et D.A. Stainforth. 2004. Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations. *Nature*. vol. 430, pp.768-772.
- Murphy, J. M., D. M. H. Sexton, G. J. Jenkins, P. M. Boorman, B. B. Booth, C.C Brown et R.A. Wood. 2009. UK Climate Projections Science Report: Climate change projections. Exeter: Met Office Hadley Centre. Tiré de <http://ukclimateprojections.defra.gov.uk>
- Ouranos. 2014. Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Partie 1 : Évolution climatique au Québec. Édition 2014. Montréal, Québec : Ouranos, 79 p.
- Percival, D., A. Murray et D. Stevens. 2003. Drought stress dynamics of wild blueberry (*Vaccinium angustifolium* Aiton). *Proc. XXVI IHC - Environmental stress*. Eds. K.K. Tanino et coll. *Acta Hort.* 618, ISHS 2003.
- Plouffe, D., G. Bourgeois, N. Beaudry, G. Chouinard et D. Choquette. 2014. CIPRA - Centre Informatique de Prévision des Ravageurs en Agriculture: Guide des cultures. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Site Web Agri-Réseau, Domaine Agroclimatologie. Bulletin technique, A42-119/2013F-PDF. 138 p.
- Powell, A.A. et D.G. Himelrick. 2000. Principles of freeze protection for fruit crops. Alabama Cooperative Extension System, ANR 1057B. 8 p.
- Privé, J.P., L. Russell, P. Hildebrand, N. Boyd, et D.C. Percival. 2012. Intelligent irrigation of lowbush blueberries in Atlantic Canada. *Acta Hort.* 926:471-476.
- Rochette, P., Bélanger, G., Castonguay, Y., Bootsma, A. et Mongrain, D. 2004. Climate change and winter damage to fruit trees in eastern Canada. *Canadian Journal of Plant Science* 84:1113-1125.
- Rohde, A. 2009. Bud Set - A Landmark of the Seasonal Growth Cycle in Poplar. Dans Gusta, L.V., Wisniewski, M.E., Tanino, K.K. *Plant Cold Hardiness: From the Laboratory to the Field*. CAB International, Wallingford, UK. pp. 91-98.
- Rowland, L.J., Ogden, E.L., Ehlenfeldt, M.K. et Arora, R. 2008. Cold tolerance of blueberry genotypes throughout the dormant period from acclimation to deacclimation. *HortScience* 43(7):1970-1974.
- Seymour, R.M., G. Starr et E. Yarborough. 2004. Lowbush blueberry (*Vaccinium angustifolium*) with irrigated and rain-fed conditions. *Small Fruits Review*, 3:1-2, 45-56.

- Statistique Canada. 2017. Production de fruits et de légumes, 2016. Tiré de : <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/170201/dq170201c-fra.htm>
- Topp, G.C., 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.
- Trevett, M.F. 1967. Irrigating lowbush blueberries the burn years. Univ. Maine Farm Res. 15:1-4.
- Vallée, J., C. Boivin, D. Bergeron, R. Audet et F. Chrétien. 2014. Comparaison et évaluation d'outils de gestion de l'irrigation. Rapport final remis au CDAQ. IRDA. 74 p.
- Vander Kloet, S.P. et K.B. McRae. 1998. Winter-hardiness trials of *Vaccinium corymbosum* L. in Nova Scotia. J. Plant Sci. 78:467-471.
- White, S.N., N.S. Boyd et R.C. Van Acker. 2012. Growing degree-day models for predicting lowbush blueberry (*Vaccinium angustifolium* Ait.) ramet emergence, tip dieback, and flowering in Nova Scotia, Canada. HortScience 47:1014-1021.
- Yarborough, D.E. et P.C. Bhowmik. 1988. Effect of hexazinone on weed populations and on lowbush blueberries in Maine. Acta Hort. 241: 344-349.
- Yarborough, D. 2015. Flower primordia development stage. Fact Sheet no. 216, University of Maine, Extension no. 2003. Consulté sur Internet en mai 2019: <https://extension.umaine.edu/blueberries/factsheets/irrigation/flower-primordia-development-stage/>
- Zapa, D.D. 2017. Développement d'un modèle prédictif de la productivité spatio-temporelle des plants de bleuets sauvages. Mémoire de maîtrise présenté au Département des sciences géographiques, cheminement géomatique, Faculté des sciences, Université de Sherbrooke. 104 p.

9. Annexes



Figure 64 : Dispositif expérimental (Champ 1), le 25 mai 2017 - Ascension-de-Notre-Seigneur.



Figure 65 : Gicleur Xcel-Wobbler® avec un régulateur de pression (12 psi) et une valve – Saint-David-de-Falardeau.



Figure 66 : Cylindre de PVC utilisé pour l'échantillonnage 0-15 cm (courbe de désorption en eau du sol).



Figure 67 : Installation en laboratoire pour déterminer les courbes de désorption en eau du sol – Complexe scientifique de Québec.

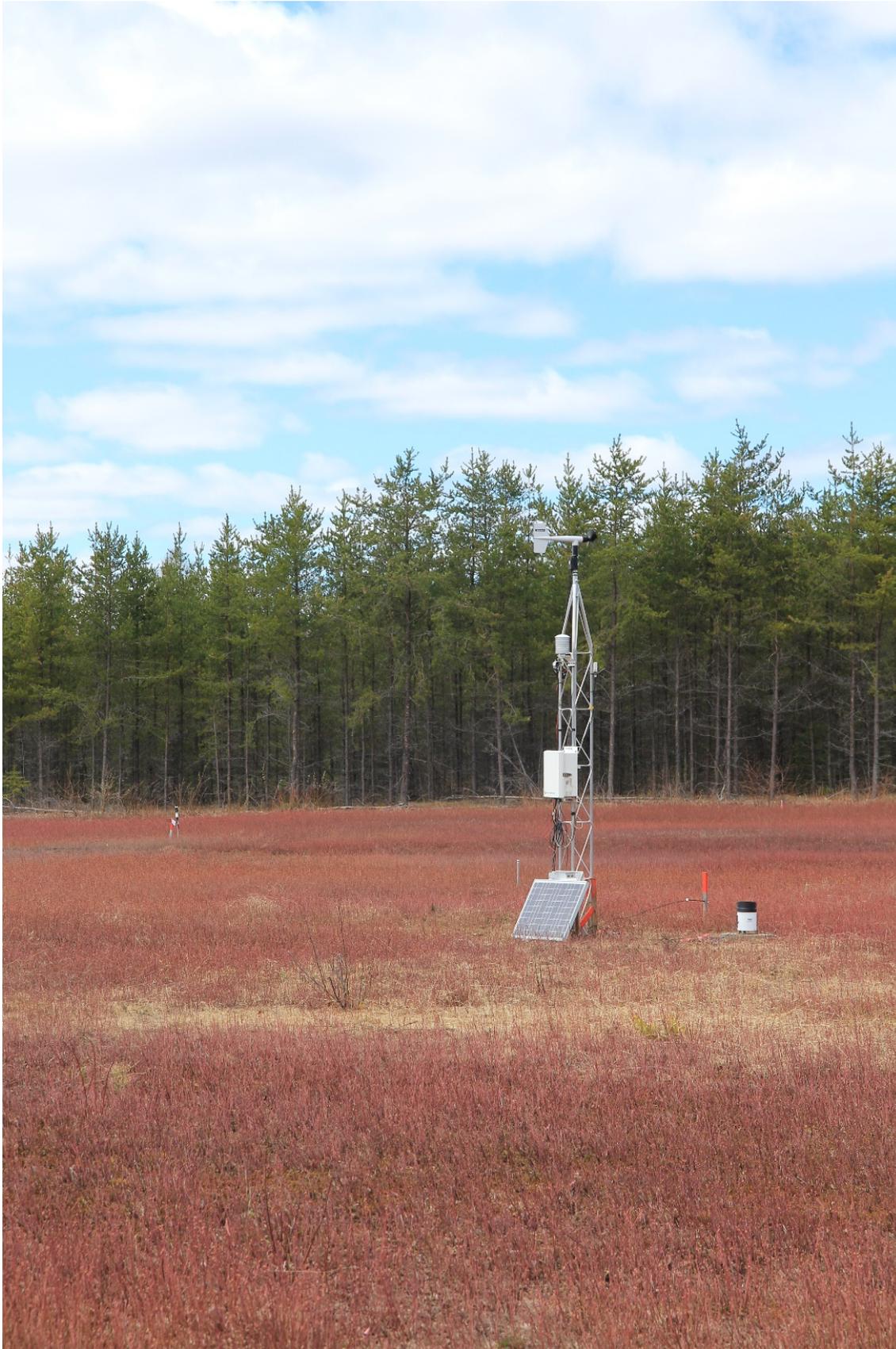


Figure 68 : Station météorologique - Saint-David-de-Falardeau.

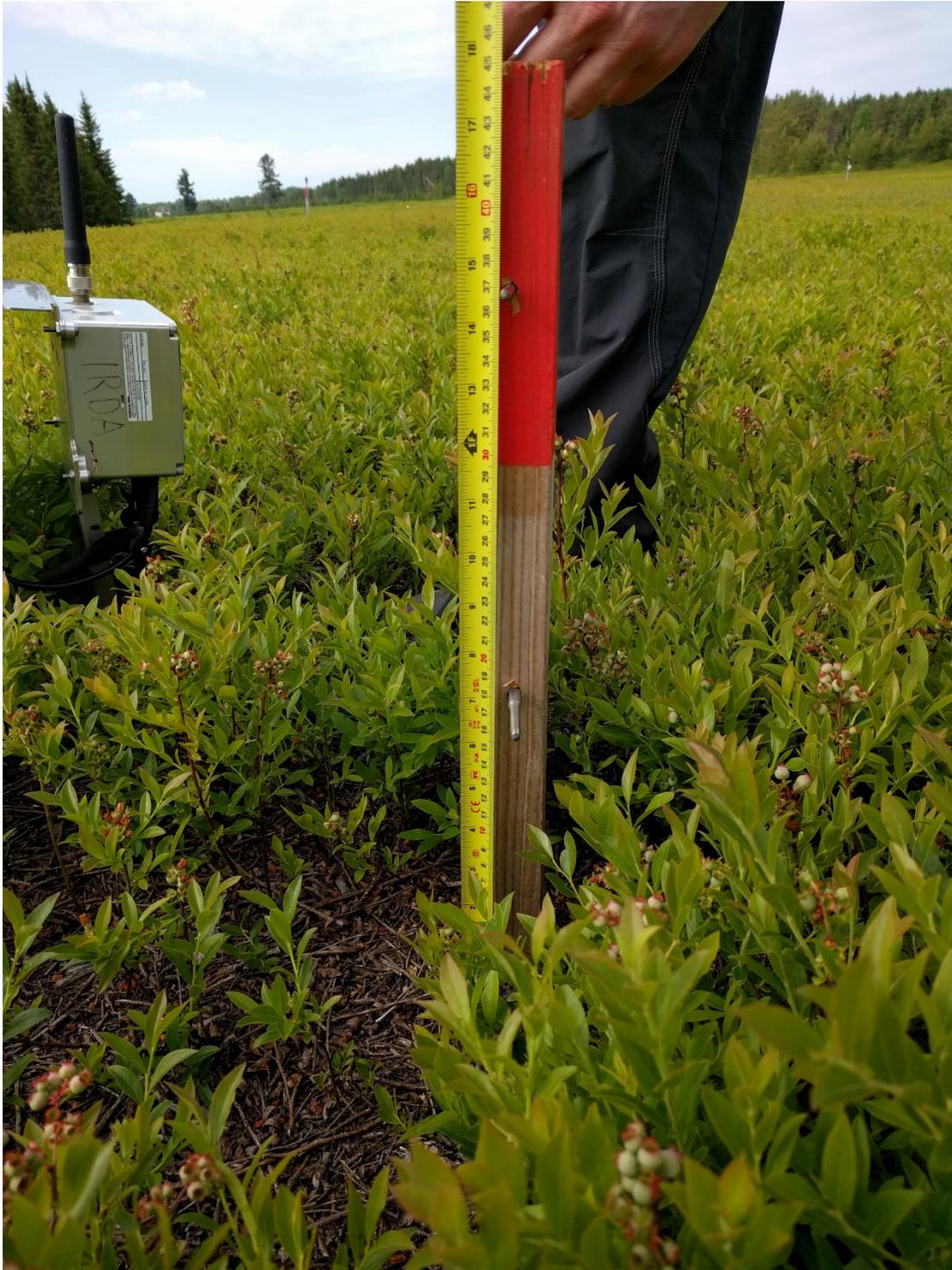


Figure 69 : Sondes de température installées à la hauteur et au-dessus des fleurs.



Figure 70. TX4 Web (Hortau) utilisé avec des sondes de température et des tensiomètres.

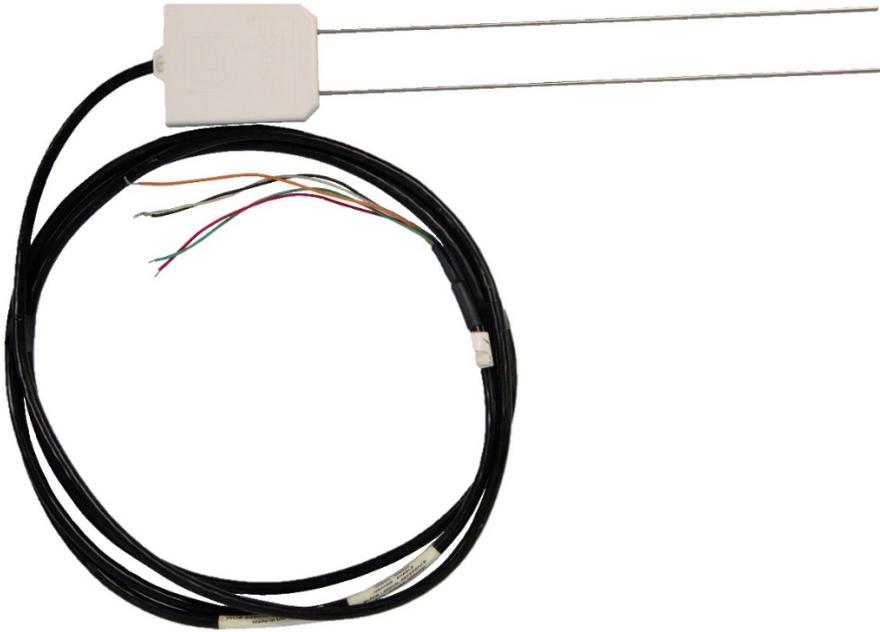


Figure 71 : Sonde TDR Campbell Scientific, CS625.



Figure 72 : Panier de type « patte d'ours » utilisé pour la récolte des fruits dans les parcelles.

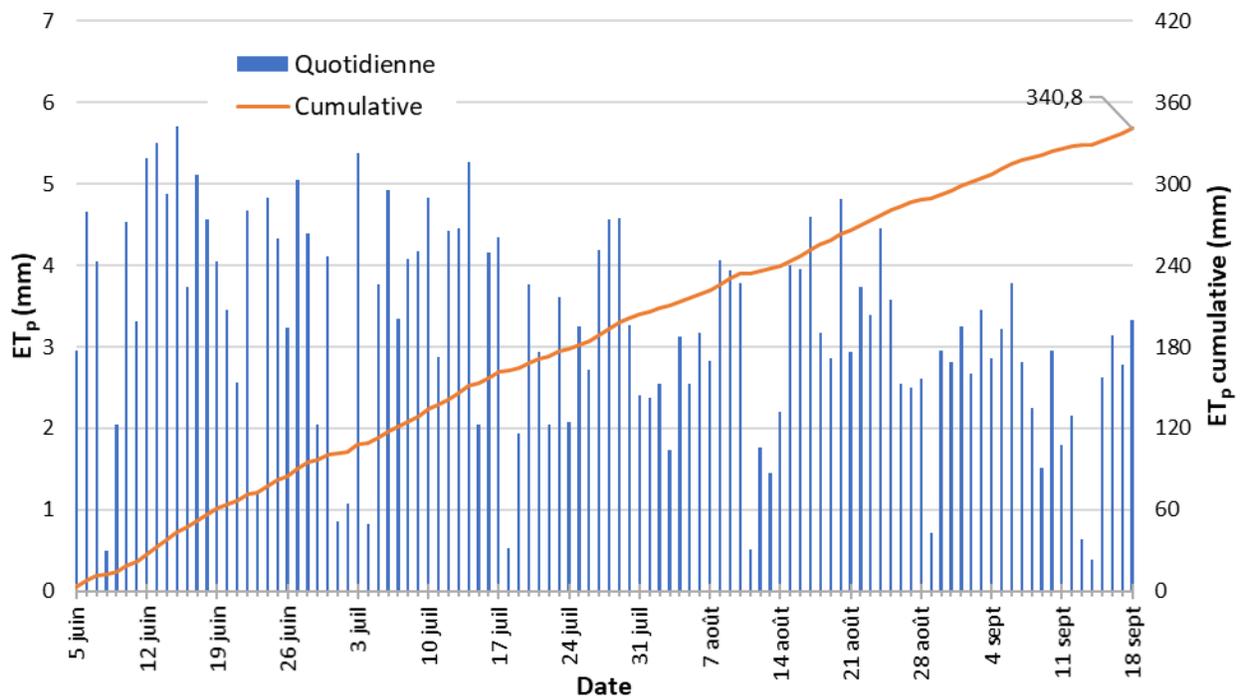


Figure 73 : Évapotranspiration potentielle quotidienne et cumulative sur le site à l'Ascension-de-Notre-Seigneur du 5 juin au 18 septembre 2015.

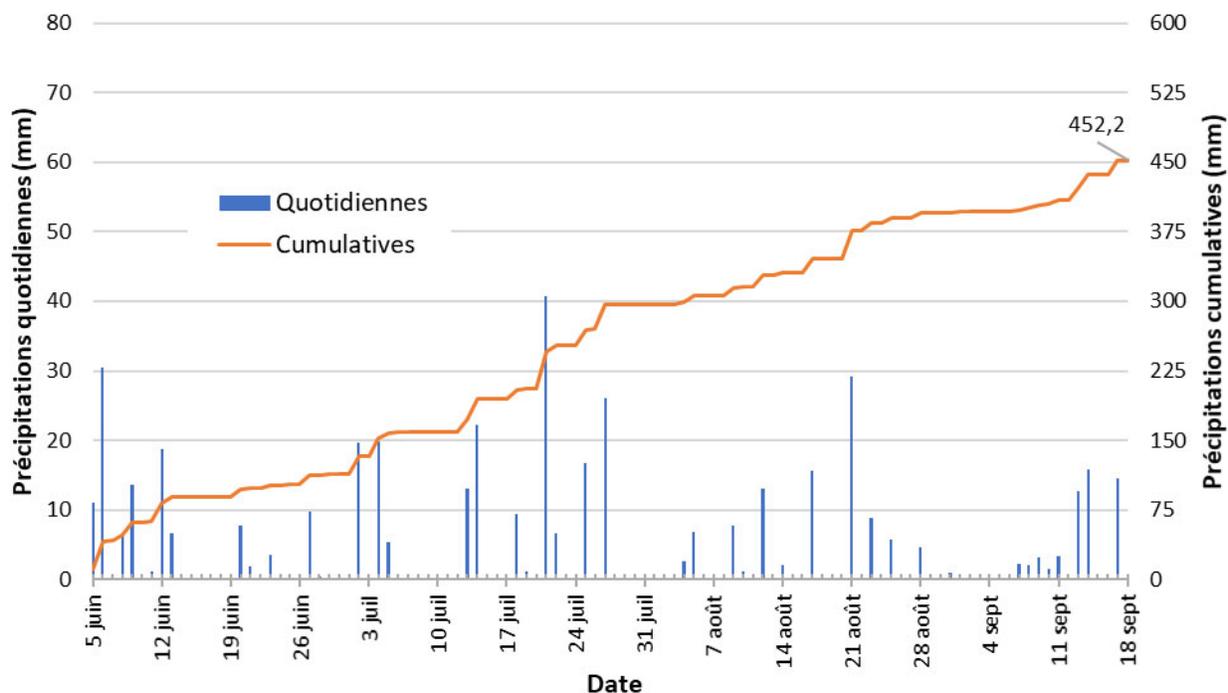


Figure 74 : Précipitations quotidiennes et cumulatives sur le site à l'Ascension-de-Notre-Seigneur du 5 juin au 18 septembre 2016.

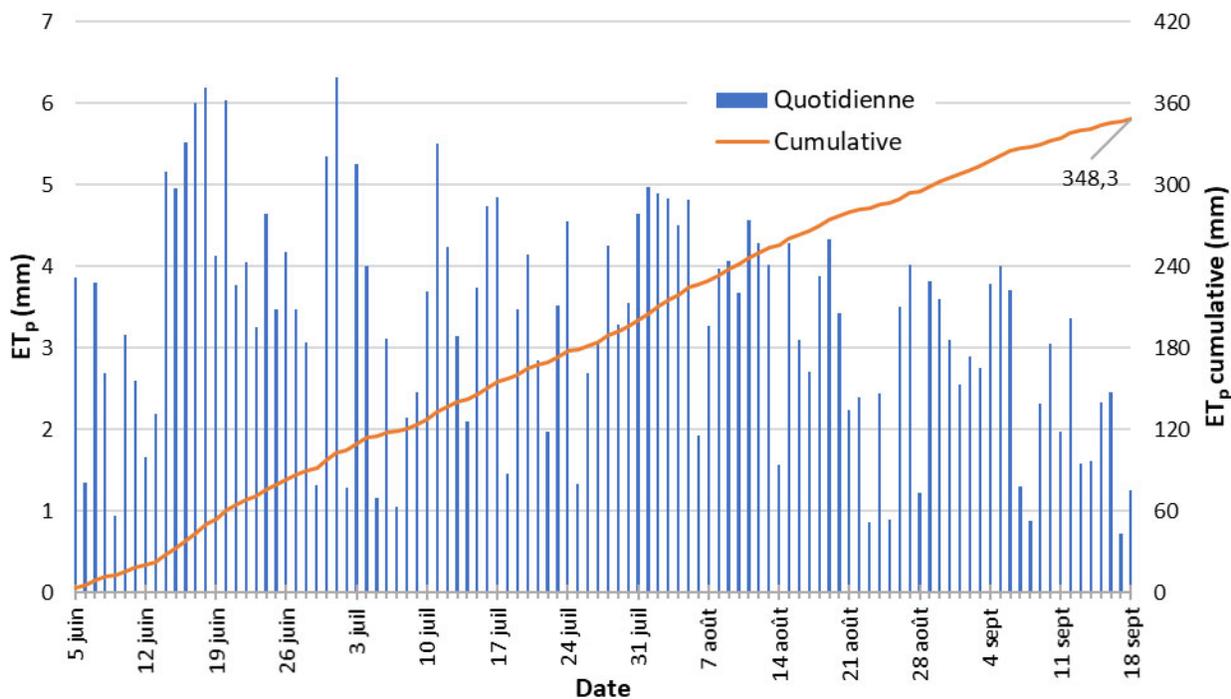


Figure 75 : Évapotranspiration potentielle quotidienne et cumulative sur le site à l'Ascension-de-Notre-Seigneur du 5 juin au 18 septembre 2016.

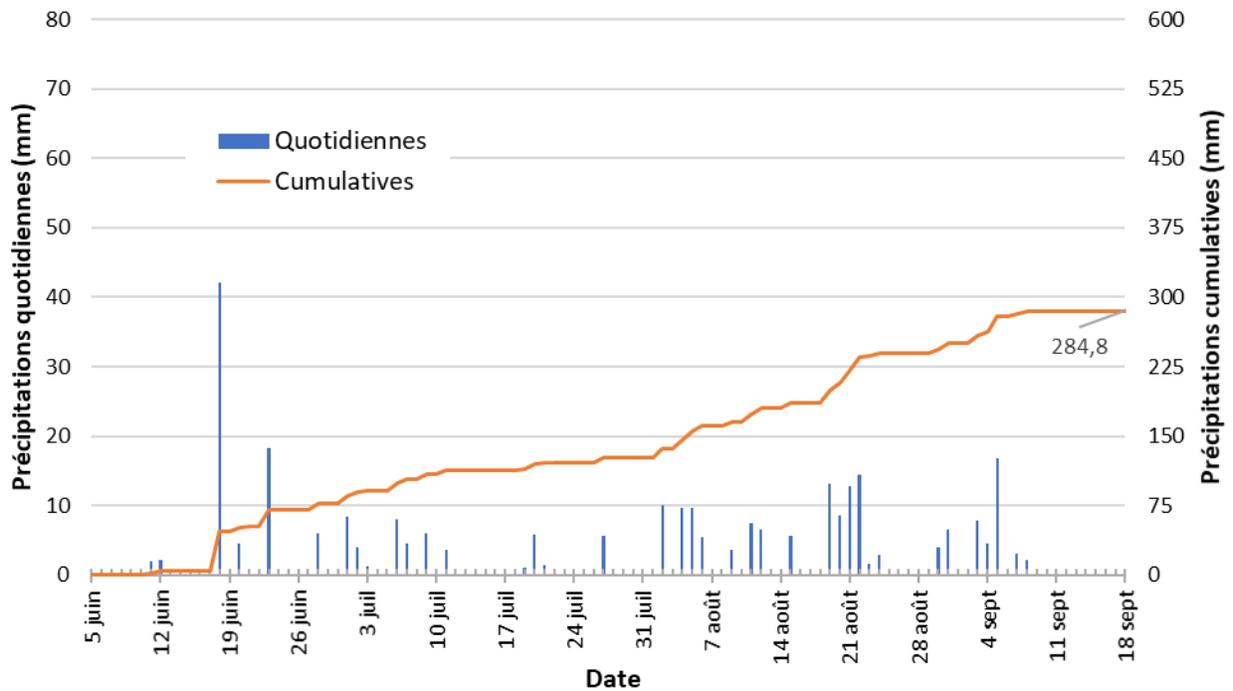


Figure 76 : Précipitations quotidiennes et cumulatives sur le site à l'Ascension-de-Notre-Seigneur du 5 juin au 18 septembre 2017.

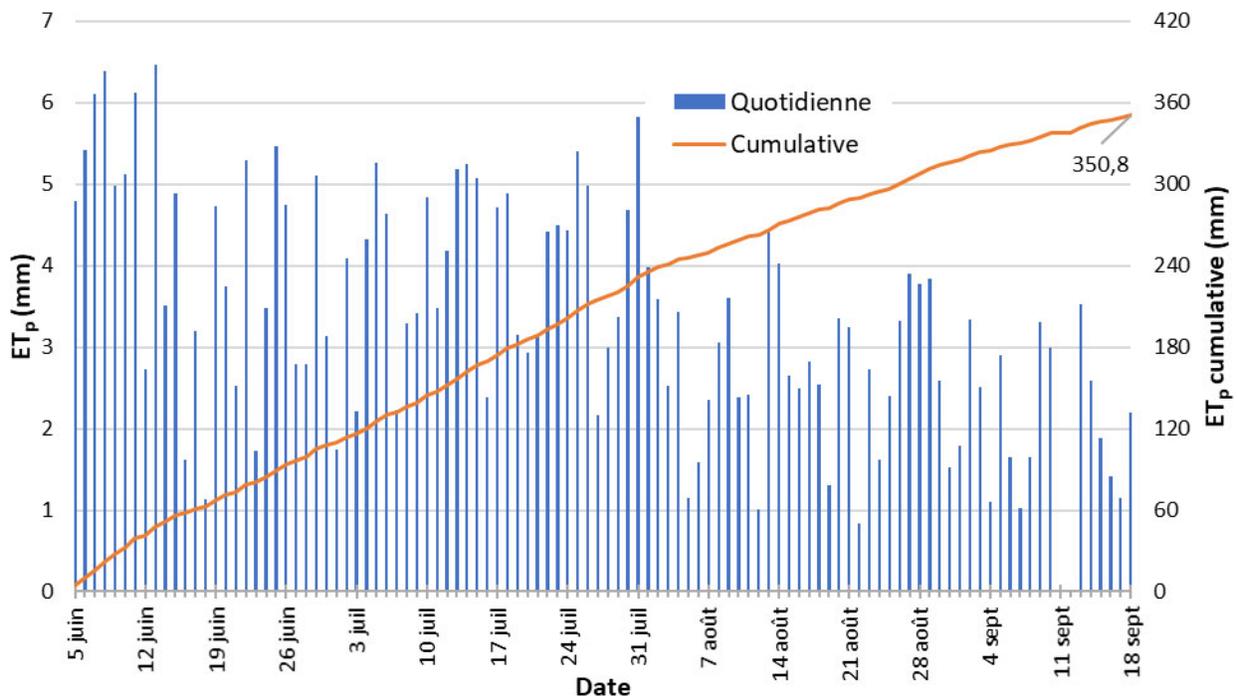


Figure 77 : Évapotranspiration potentielle quotidienne et cumulative sur le site à l'Ascension-de-Notre-Seigneur du 5 juin au 18 septembre 2017.

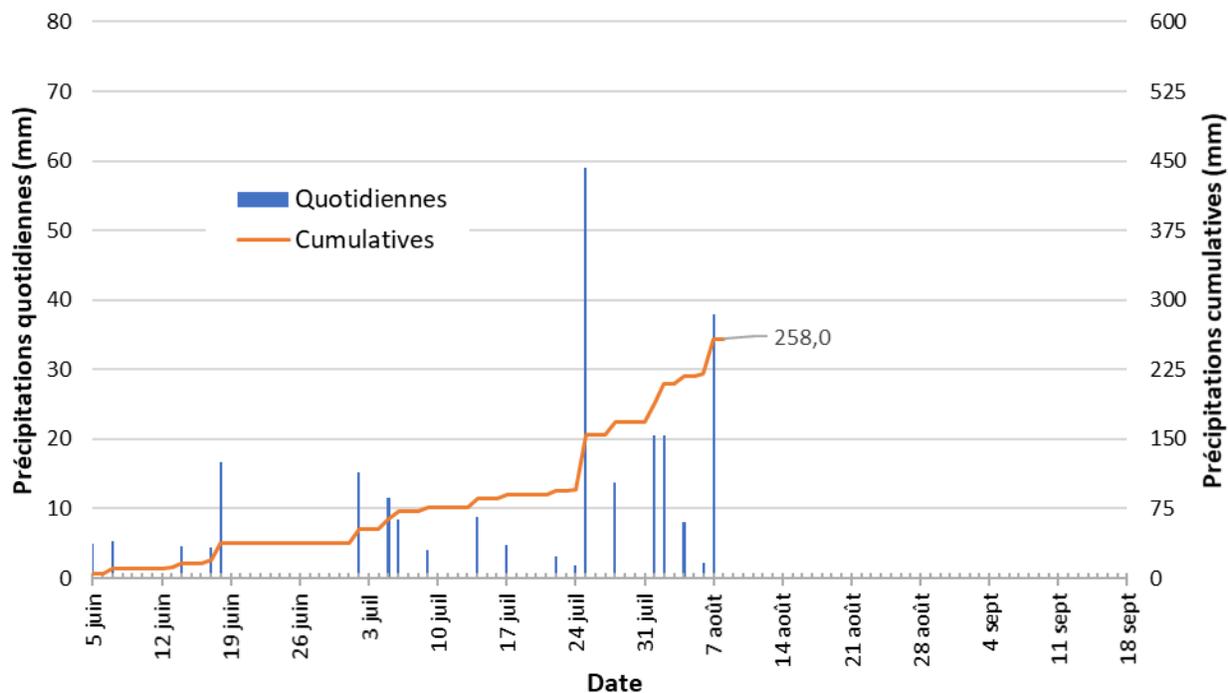


Figure 78 : Précipitations quotidiennes et cumulatives sur le site à l'Ascension-de-Notre-Seigneur du 5 juin au 8 août 2018.

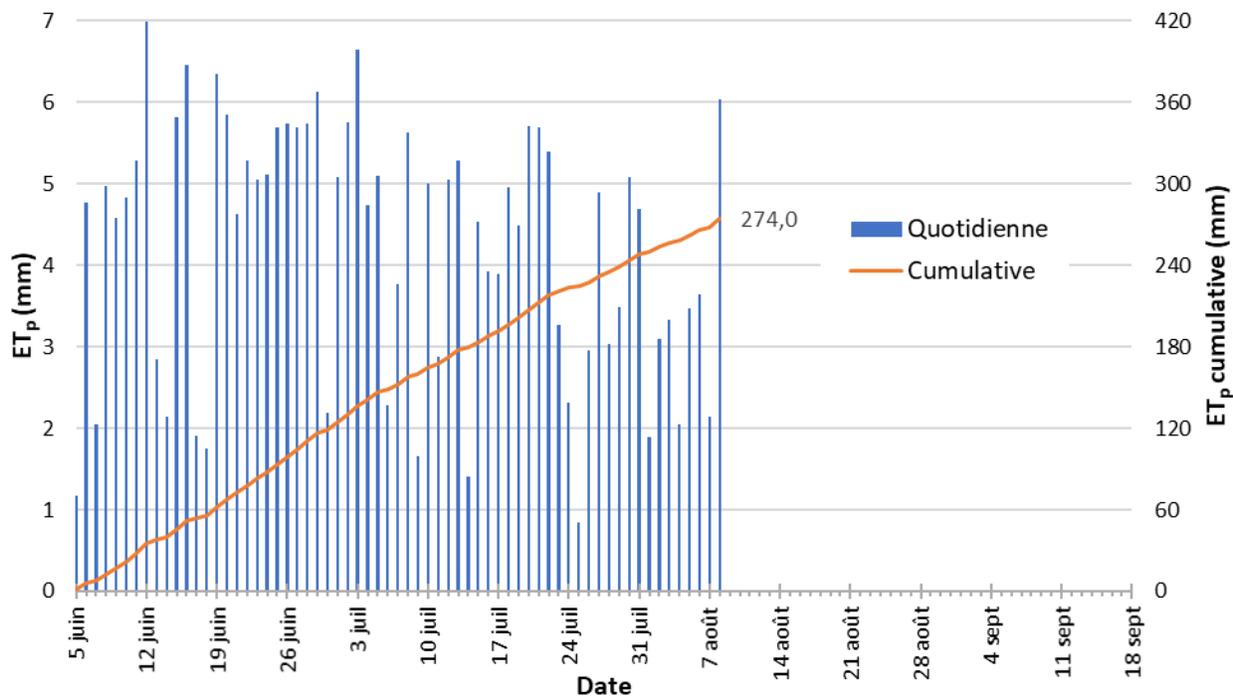


Figure 79 : Évapotranspiration potentielle quotidienne et cumulative sur le site à l'Ascension-de-Notre-Seigneur du 5 juin au 8 août 2018.

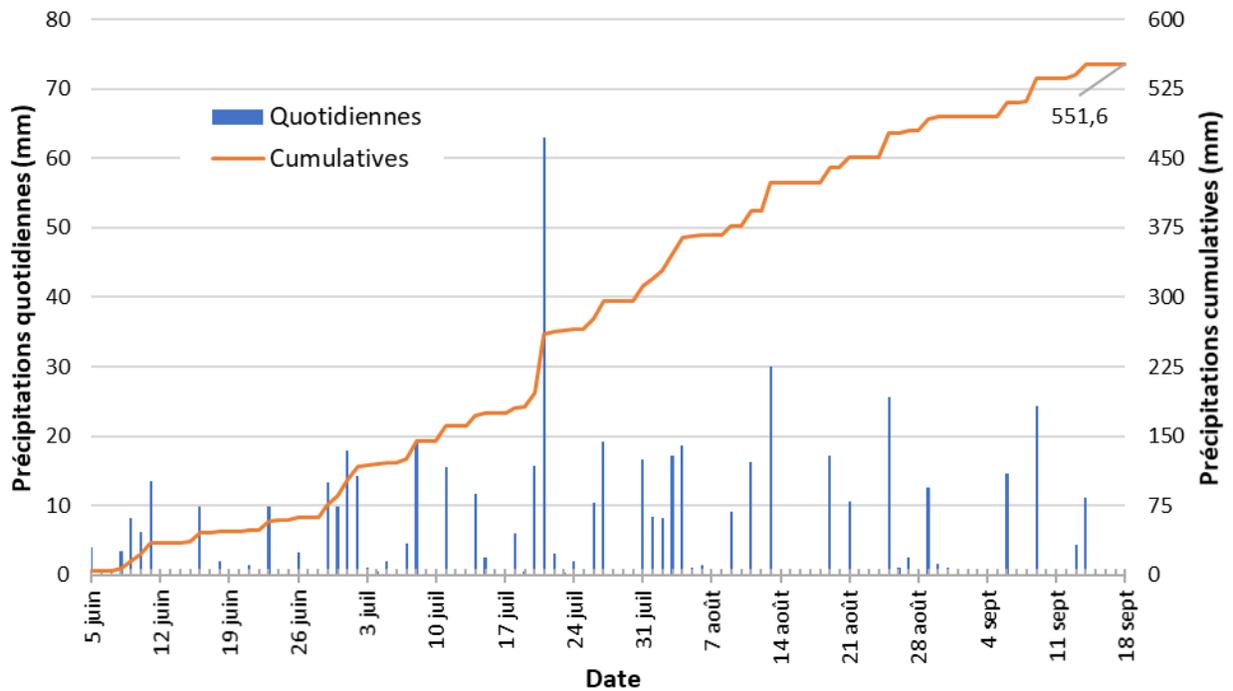


Figure 80 : Précipitations quotidiennes et cumulatives sur le site à Saint-David-de-Falardeau du 5 juin au 18 septembre 2015.

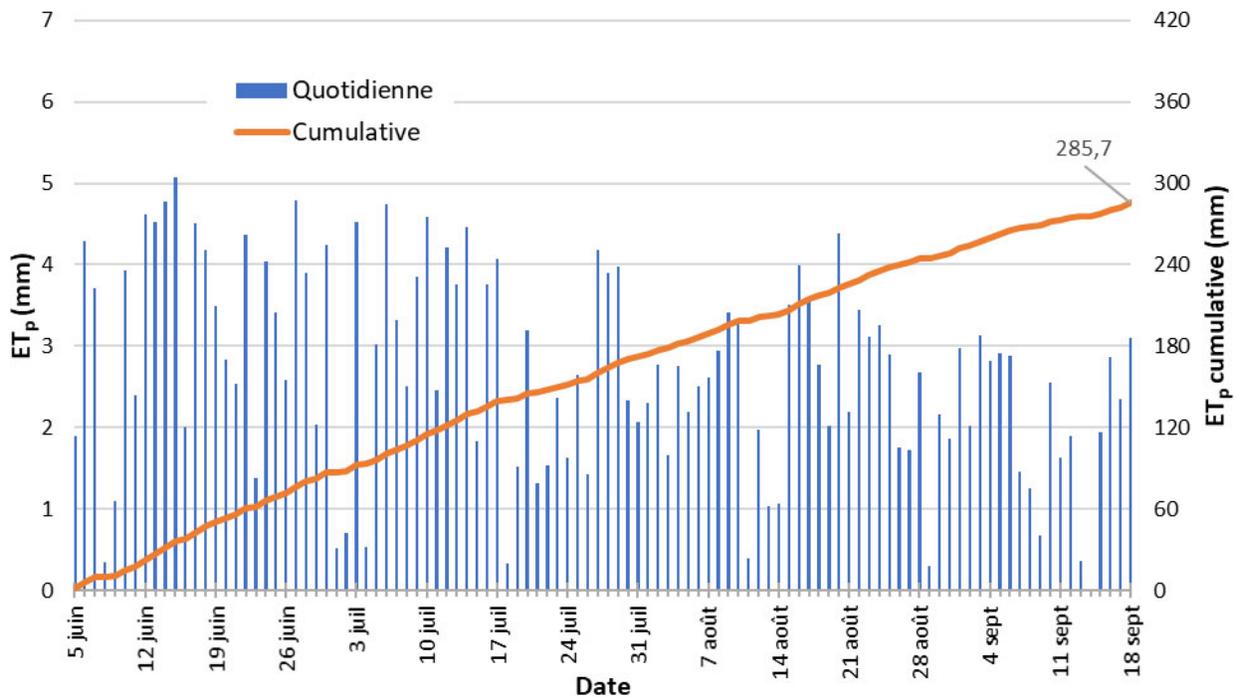


Figure 81 : Évapotranspiration potentielle quotidienne et cumulative sur le site à Saint-David-de-Falardeau du 5 juin au 18 septembre 2015.

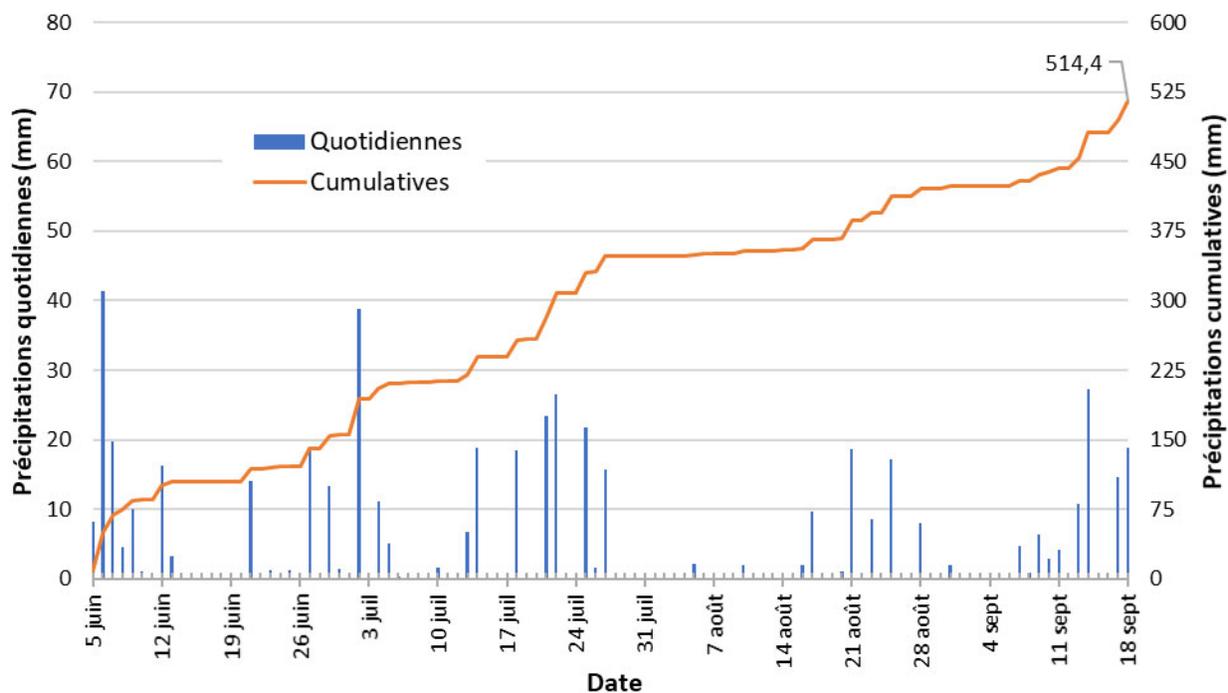


Figure 82 : Précipitations quotidiennes et cumulatives sur le site à Saint-Davide-de-Falardeau du 5 juin au 18 septembre 2016.

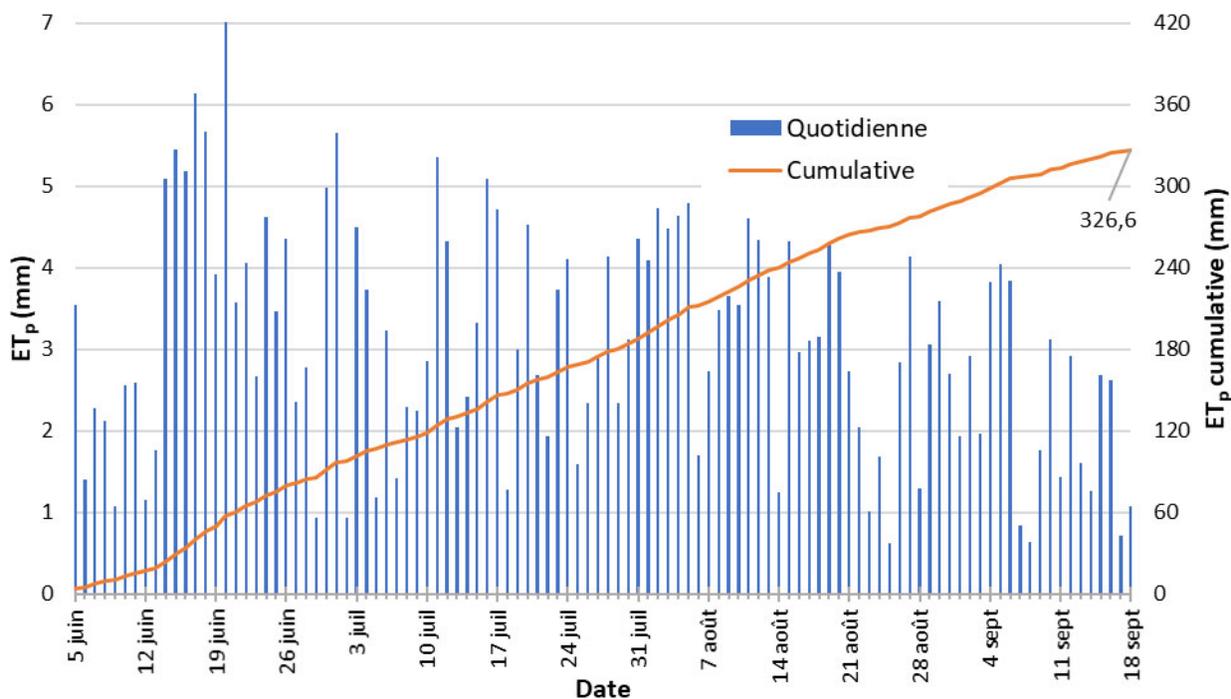


Figure 83 : Évapotranspiration potentielle quotidienne et cumulative sur le site à Saint-Davide-de-Falardeau du 5 juin au 18 septembre 2016.

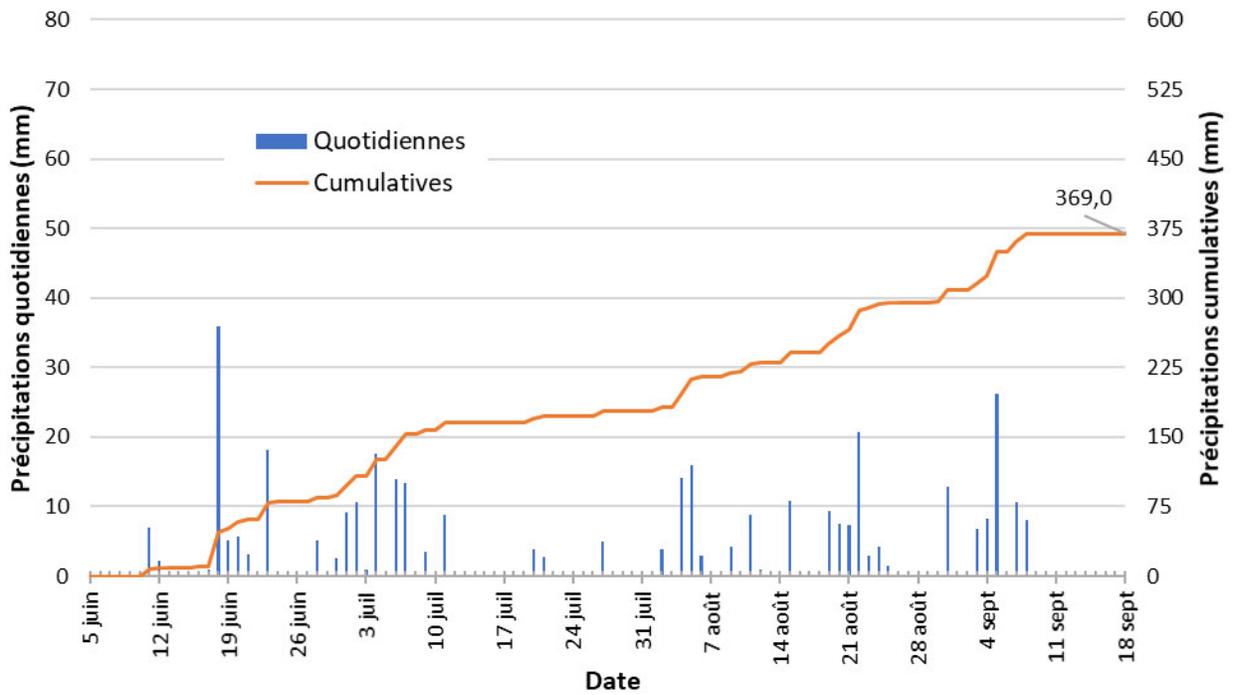


Figure 84 : Précipitations quotidiennes et cumulatives sur le site à Saint-Davide-de-Falardeau du 5 juin au 18 septembre 2017.

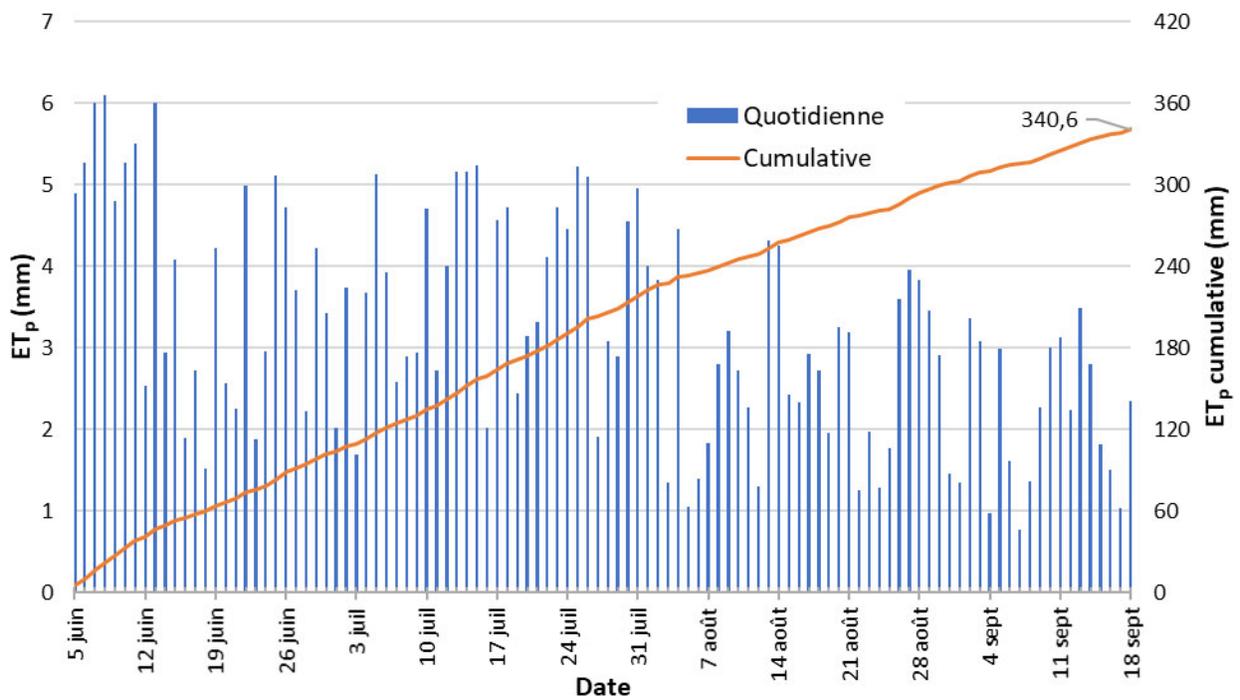


Figure 85 : Évapotranspiration potentielle quotidienne et cumulative sur le site à Saint-David-de-Falardeau du 5 juin au 18 septembre 2017.

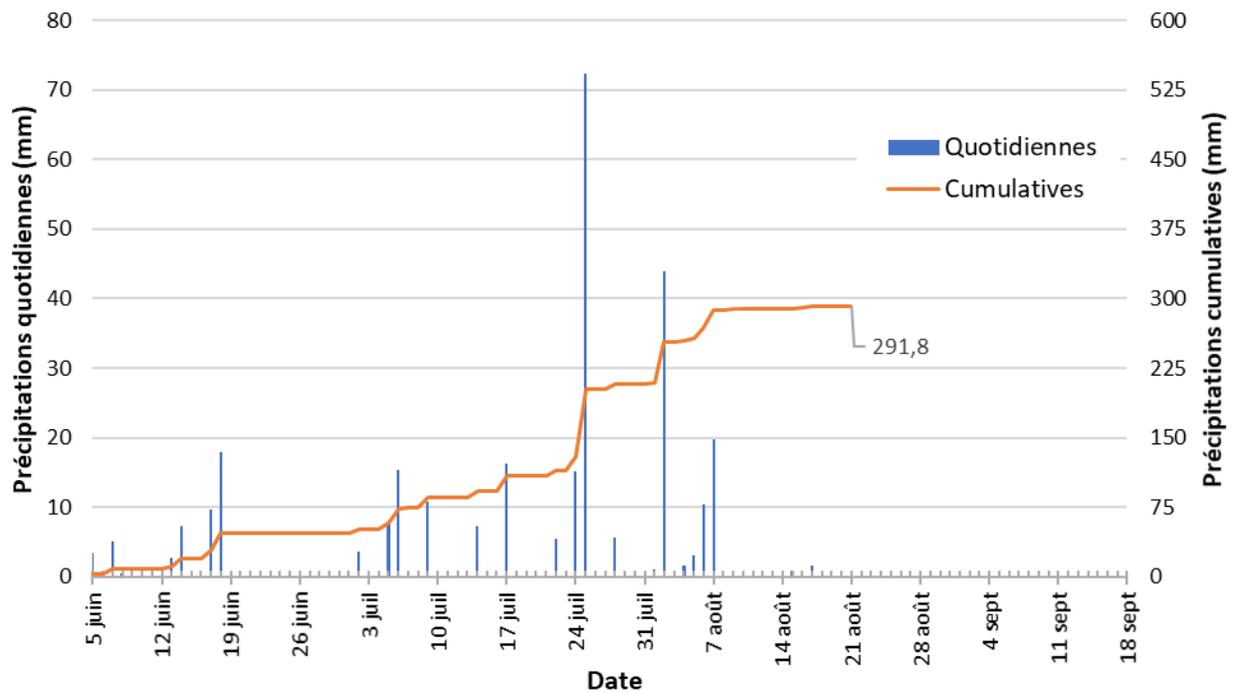


Figure 86 : Précipitations quotidiennes et cumulatives sur le site à Saint-David-de-Falardeau du 5 juin au 21 août 2018.

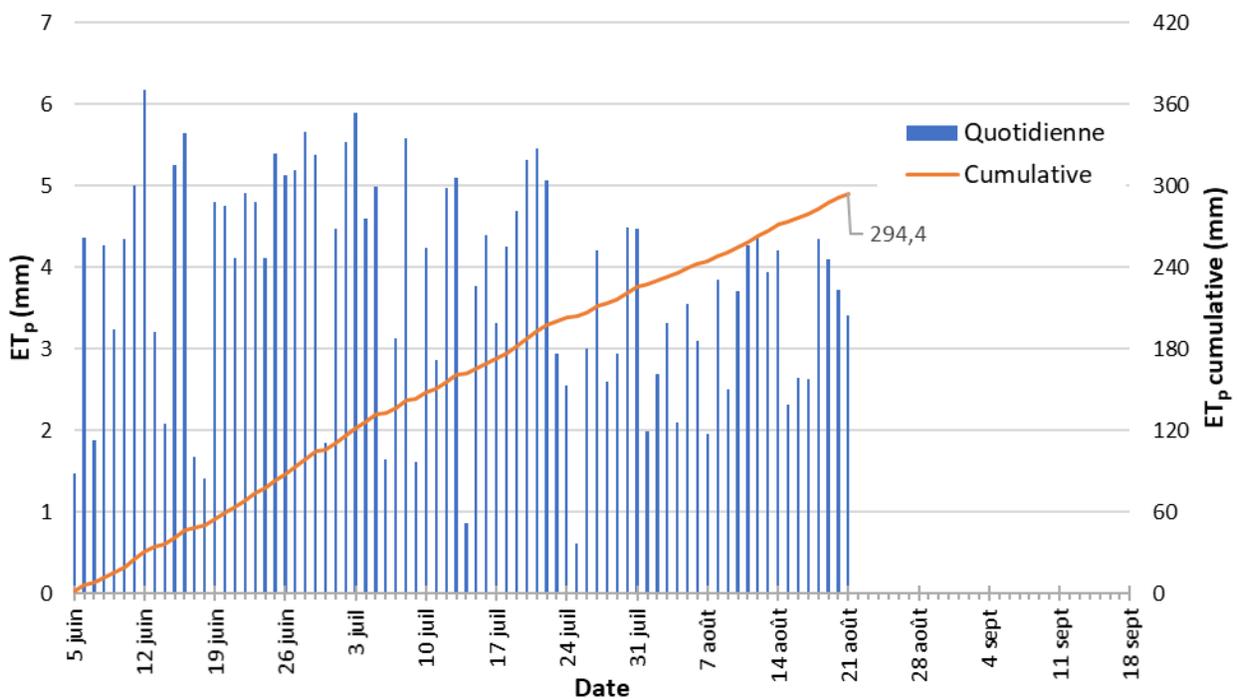


Figure 87 : Évapotranspiration potentielle quotidienne et cumulative sur le site à Saint-David-de-Falardeau du 5 juin au 21 août 2018.

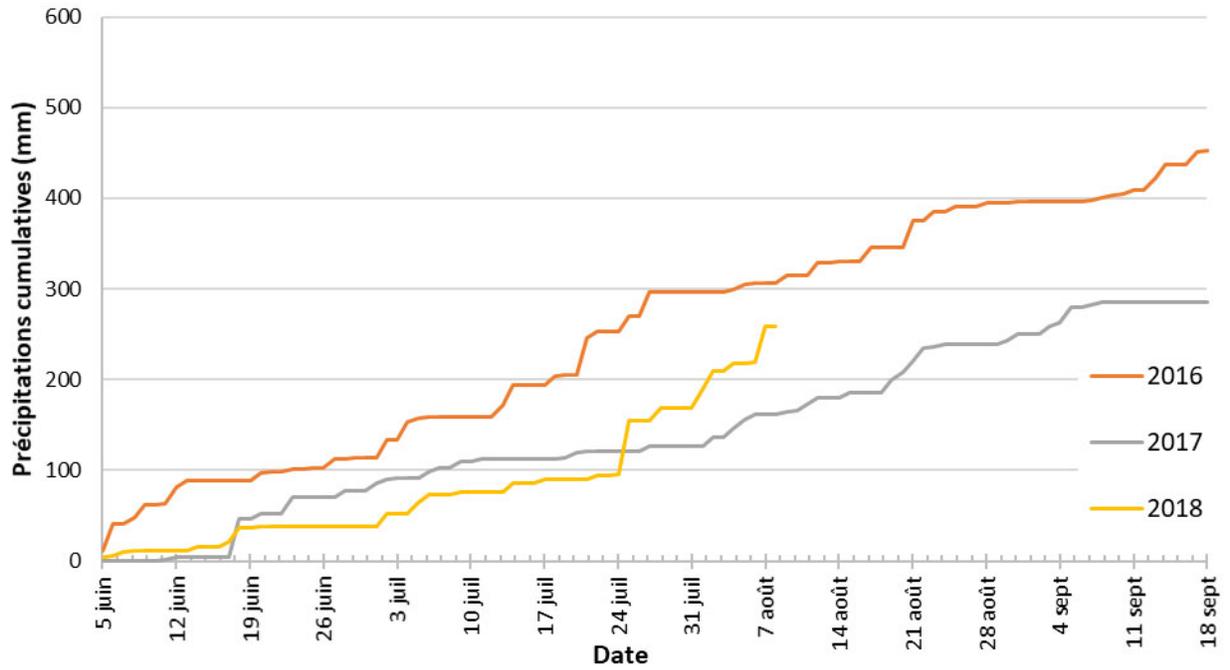


Figure 88. Précipitations cumulatives (mm) du 5 juin au 18 septembre au site de l'Ascension, 2015 à 2018.

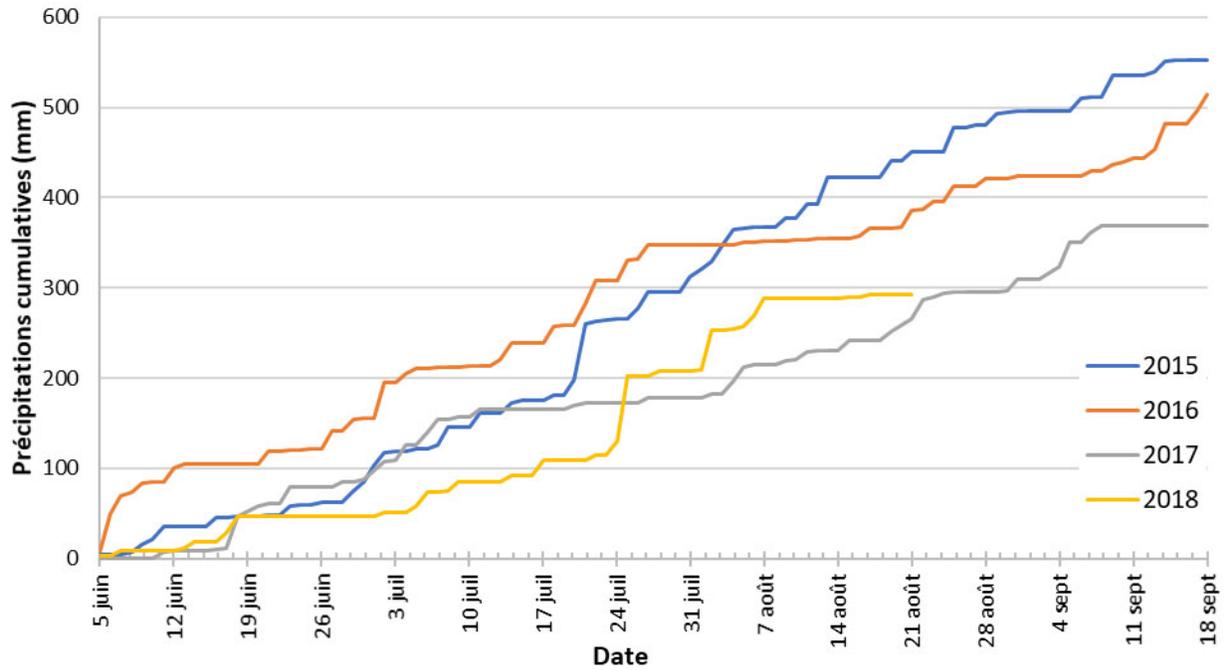


Figure 89. Précipitations cumulatives (mm) du 5 juin au 18 septembre au site de Falardeau, 2015 à 2018.

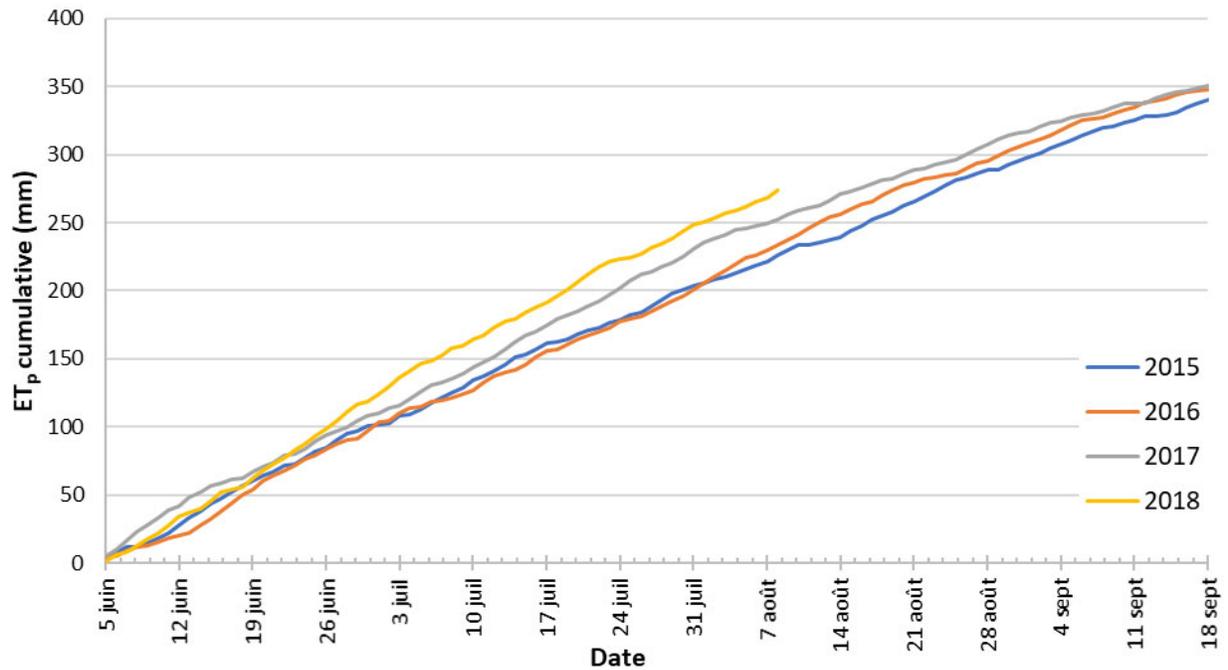


Figure 90. Évapotranspiration potentielle (mm) du 5 juin au 18 septembre au site de l'Ascension, 2015 à 2018.

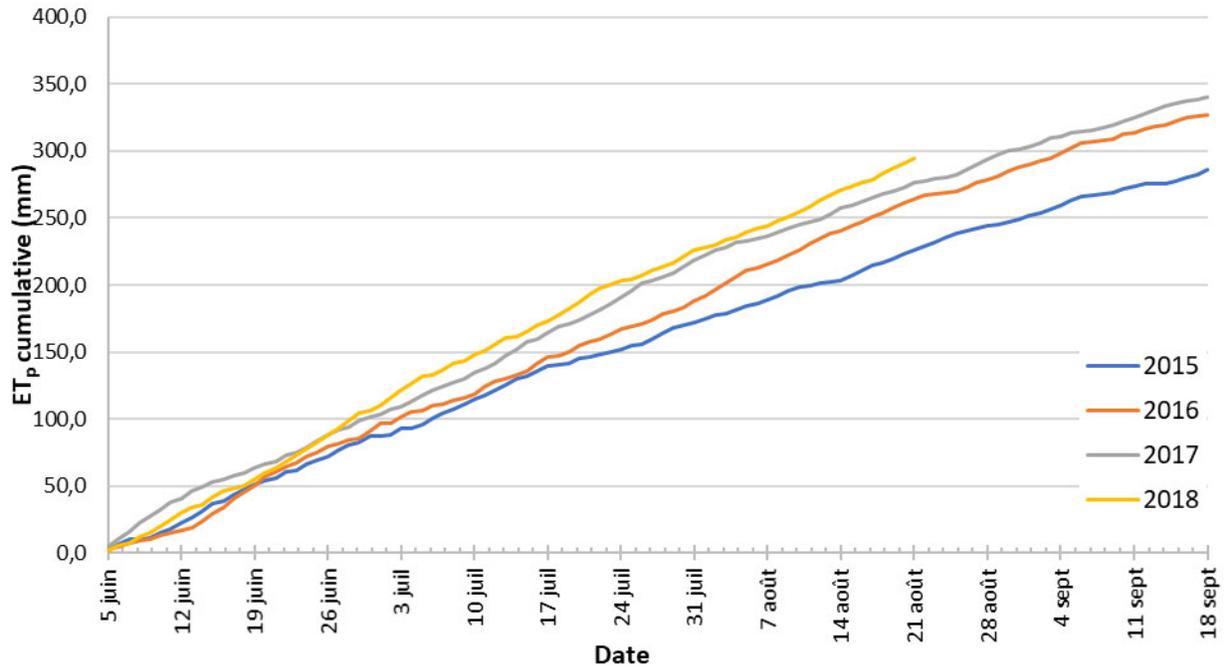


Figure 91. Évapotranspiration potentielle (mm) du 5 juin au 18 septembre au site de Falardeau, 2015 à 2018.

Tableau 52. Bilan hydrique réalisé avec un sol dont la RFU est de 20 mm avec les K_c et l' ET_p estimés et les précipitations mesurées du 5 juin au 16 septembre 2017 au champ 1 en végétation au site de l'Ascension-de-Notre-Seigneur.

Date Juin	RFU (mm)	ET_p (mm)	K_c	ET_c (mm)	Précipitations (mm)		RFU (mm)
					Totales	Valorisables	
	Début de journee						Fin de journee
5	20,0	4,8	0,38	1,8	0,0	0,0	18,2
6	18,2	5,4	0,38	2,1	0,0	0,0	16,1
7	16,1	6,1	0,38	2,3	0,0	0,0	13,8
8	13,8	6,4	0,38	2,4	0,0	0,0	11,4
9	11,4	5,0	0,38	1,9	0,0	0,0	9,5
10	9,5	5,1	0,38	1,9	0,0	0,0	7,5
11	7,5	6,1	0,38	2,3	2,0	2,0	7,2
12	7,2	2,7	0,38	1,0	2,2	2,2	8,4
13	8,4	6,5	0,38	2,5	0,0	0,0	5,9
14	5,9	3,5	0,38	1,3	0,0	0,0	4,6
15	4,6	4,9	0,38	1,9	0,0	0,0	2,7
16	2,7	1,6	0,38	0,6	0,2	0,2	2,3
17	2,3	3,2	0,38	1,2	0,4	0,4	1,5
18	1,5	1,1	0,38	0,4	42,0	18,9	20,0
19	20,0	4,7	0,38	1,8	0,2	0,2	18,4
20	18,4	3,7	0,38	1,4	4,6	3,0	20,0
21	20,0	2,5	0,38	1,0	0,8	0,8	19,8
22	19,8	5,3	0,38	2,0	0,0	0,0	17,8
23	17,8	1,7	0,38	0,7	18,2	2,8	20,0
24	20,0	3,5	0,38	1,3	0,2	0,2	18,9
25	18,9	5,5	0,38	2,1	0,0	0,0	16,8
26	16,8	4,8	0,38	1,8	0,0	0,0	15,0
27	15,0	2,8	0,38	1,1	0,0	0,0	13,9
28	13,9	2,8	0,38	1,1	6,0	6,0	18,9
29	18,9	5,1	0,38	1,9	0,0	0,0	16,9
30	16,9	3,1	0,38	1,2	0,4	0,4	16,1

Date Juillet	RFU (mm)	Et _p (mm)	K _c	Et _c (mm)	Précipitations (mm)		RFU (mm)
	Début de journée				Totales	Valorisables	Fin de journée
1	16,1	1,7	0,38	0,7	8,4	4,5	20,0
2	20,0	4,1	0,38	1,6	4,0	1,6	20,0
3	20,0	2,2	0,38	0,8	1,2	0,8	20,0
4	20,0	4,3	0,38	1,6	0,0	0,0	18,4
5	18,4	5,3	0,38	2,0	0,0	0,0	16,4
6	16,4	4,6	0,38	1,8	8,0	5,4	20,0
7	20,0	2,2	0,38	0,8	4,6	0,8	20,0
8	20,0	3,3	0,38	1,3	0,0	0,0	18,7
9	18,7	3,4	0,38	1,3	6,0	2,5	20,0
10	20,0	4,8	0,38	1,8	0,0	0,0	18,2
11	18,2	3,5	0,38	1,3	3,6	3,2	20,0
12	20,0	4,2	0,38	1,6	0,0	0,0	18,4
13	18,4	5,2	0,38	2,0	0,0	0,0	16,4
14	16,4	5,2	0,38	2,0	0,0	0,0	14,5
15	14,5	5,1	0,38	1,9	0,0	0,0	12,5
16	12,5	2,4	0,38	0,9	0,0	0,0	11,6
17	11,6	4,7	0,38	1,8	0,0	0,0	9,8
18	9,8	4,9	0,38	1,9	0,0	0,0	8,0
19	8,0	3,1	0,38	1,2	1,0	1,0	7,8
20	7,8	2,9	0,38	1,1	5,8	5,8	12,5
21	12,5	3,2	0,38	1,2	1,4	1,4	12,7
22	12,7	4,4	0,38	1,7	0,0	0,0	11,0
23	11,0	4,5	0,38	1,7	0,0	0,0	9,3
24	9,3	4,4	0,38	1,7	0,0	0,0	7,6
25	7,6	5,4	0,38	2,1	0,0	0,0	5,5
26	5,5	5,0	0,38	1,9	0,0	0,0	3,6
27	3,6	2,2	0,38	0,8	5,6	5,6	8,4
28	8,4	3,0	0,38	1,1	0,0	0,0	7,3
29	7,3	3,4	0,38	1,3	0,0	0,0	6,0
30	6,0	4,7	0,38	1,8	0,0	0,0	4,2
31	4,2	5,8	0,38	2,2	0,0	0,0	2,0

Date Août	RFU (mm)	Et _p (mm)	K _c	Et _c (mm)	Précipitations (mm)		RFU (mm)
					Totales	Valorisables	
	Début de journée						Fin de journée
1	2,0	4,0	0,38	1,5	0,0	0,0	0,5
2	0,5	3,6	0,38	1,4	10,0	10,0	9,1
3	9,1	2,5	0,38	1,0	0,0	0,0	8,2
4	8,2	3,4	0,38	1,3	9,6	9,6	16,5
5	16,5	1,2	0,38	0,4	9,6	4,0	20,0
6	20,0	1,6	0,38	0,6	5,4	0,6	20,0
7	20,0	2,4	0,38	0,9	0,0	0,0	19,1
8	19,1	3,1	0,38	1,2	0,0	0,0	17,9
9	17,9	3,6	0,38	1,4	3,6	3,4	20,0
10	20,0	2,4	0,38	0,9	0,6	0,6	19,7
11	19,7	2,4	0,38	0,9	7,4	1,2	20,0
12	20,0	1,0	0,38	0,4	6,6	0,4	20,0
13	20,0	4,4	0,38	1,7	0,0	0,0	18,3
14	18,3	4,0	0,38	1,5	0,0	0,0	16,8
15	16,8	2,6	0,38	1,0	5,6	4,2	20,0
16	20,0	2,5	0,38	0,9	0,0	0,0	19,1
17	19,1	2,8	0,38	1,1	0,0	0,0	18,0
18	18,0	2,5	0,38	1,0	0,6	0,6	17,6
19	17,6	1,3	0,38	0,5	13,2	2,9	20,0
20	20,0	3,3	0,38	1,3	8,6	1,3	20,0
21	20,0	3,2	0,38	1,2	12,8	1,2	20,0
22	20,0	0,8	0,38	0,3	14,4	0,3	20,0
23	20,0	2,7	0,38	1,0	1,6	1,0	20,0
24	20,0	1,6	0,38	0,6	2,8	0,6	20,0
25	20,0	2,4	0,37	0,9	0,0	0,0	19,1
26	19,1	3,3	0,37	1,2	0,0	0,0	17,9
27	17,9	3,9	0,37	1,4	0,0	0,0	16,4
28	16,4	3,8	0,37	1,4	0,0	0,0	15,0
29	15,0	3,8	0,37	1,4	0,0	0,0	13,6
30	13,6	2,6	0,37	1,0	4,0	4,0	16,7
31	16,7	1,5	0,37	0,6	6,6	3,9	20,0

Date Septembre	RFU (mm)	Et _p (mm)	K _c	Et _c (mm)	Précipitations (mm)		RFU (mm)
					Totales	Valorisables	
	Début de journée						Fin de journée
1	20,0	1,8	0,37	0,7	0,6	0,6	19,9
2	19,9	3,3	0,37	1,2	0,0	0,0	18,7
3	18,7	2,5	0,37	0,9	7,8	2,2	20,0
4	20,0	1,1	0,37	0,4	4,6	0,4	20,0
5	20,0	2,9	0,37	1,1	16,8	1,1	20,0
6	20,0	1,7	0,37	0,6	0,0	0,0	19,4
7	19,4	1,0	0,37	0,4	3,0	1,0	20,0
8	20,0	1,6	0,37	0,6	2,2	0,6	20,0
9	20,0	3,3	0,37	1,2	0,0	0,0	18,8
10	18,8	3,0	0,37	1,1	0,0	0,0	17,7
11	17,7	0,0	0,37	0,0	0,0	0,0	17,7
12	17,7	0,0	0,37	0,0	0,0	0,0	17,7
13	17,7	3,5	0,37	1,3	0,0	0,0	16,4
14	16,4	2,6	0,37	1,0	0,0	0,0	15,4
15	15,4	1,9	0,37	0,7	0,0	0,0	14,7
16	14,7	1,4	0,37	0,5	0,0	0,0	14,2

Tableau 53. Bilan hydrique réalisé avec un sol dont la RFU est de 40 mm avec les K_c et l' ET_p estimées et les précipitations mesurées du 5 juin au 16 septembre 2017 au champ 1 en végétation au site de l'Ascension-de-Notre-Seigneur.

Date Juin	RFU (mm)	ET_p (mm)	K_c	ET_c (mm)	Précipitations (mm)		RFU (mm)
					Totales	Valorisables	
	Début de journée						Fin de journée
5	40,0	4,8	0,38	1,8	0,0	0,0	38,2
6	38,2	5,4	0,38	2,1	0,0	0,0	36,1
7	36,1	6,1	0,38	2,3	0,0	0,0	33,8
8	33,8	6,4	0,38	2,4	0,0	0,0	31,4
9	31,4	5,0	0,38	1,9	0,0	0,0	29,5
10	29,5	5,1	0,38	1,9	0,0	0,0	27,5
11	27,5	6,1	0,38	2,3	2,0	2,0	27,2
12	27,2	2,7	0,38	1,0	2,2	2,2	28,4
13	28,4	6,5	0,38	2,5	0,0	0,0	25,9
14	25,9	3,5	0,38	1,3	0,0	0,0	24,6
15	24,6	4,9	0,38	1,9	0,0	0,0	22,7
16	22,7	1,6	0,38	0,6	0,2	0,2	22,3
17	22,3	3,2	0,38	1,2	0,4	0,4	21,5
18	21,5	1,1	0,38	0,4	42,0	18,9	40,0
19	40,0	4,7	0,38	1,8	0,2	0,2	38,4
20	38,4	3,7	0,38	1,4	4,6	3,0	40,0
21	40,0	2,5	0,38	1,0	0,8	0,8	39,8
22	39,8	5,3	0,38	2,0	0,0	0,0	37,8
23	37,8	1,7	0,38	0,7	18,2	2,8	40,0
24	40,0	3,5	0,38	1,3	0,2	0,2	38,9
25	38,9	5,5	0,38	2,1	0,0	0,0	36,8
26	36,8	4,8	0,38	1,8	0,0	0,0	35,0
27	35,0	2,8	0,38	1,1	0,0	0,0	33,9
28	33,9	2,8	0,38	1,1	6,0	6,0	38,9
29	38,9	5,1	0,38	1,9	0,0	0,0	36,9
30	36,9	3,1	0,38	1,2	0,4	0,4	36,1

Date Juillet	RFU (mm)	Et _p (mm)	K _c	Et _c (mm)	Précipitations (mm)		RFU (mm)
					Totales	Valorisables	
	Début de journée						Fin de journée
1	36,1	1,7	0,38	0,7	8,4	4,5	40,0
2	40,0	4,1	0,38	1,6	4,0	1,6	40,0
3	40,0	2,2	0,38	0,8	1,2	0,8	40,0
4	40,0	4,3	0,38	1,6	0,0	0,0	38,4
5	38,4	5,3	0,38	2,0	0,0	0,0	36,4
6	36,4	4,6	0,38	1,8	8,0	5,4	40,0
7	40,0	2,2	0,38	0,8	4,6	0,8	40,0
8	40,0	3,3	0,38	1,3	0,0	0,0	38,7
9	38,7	3,4	0,38	1,3	6,0	2,5	40,0
10	40,0	4,8	0,38	1,8	0,0	0,0	38,2
11	38,2	3,5	0,38	1,3	3,6	3,2	40,0
12	40,0	4,2	0,38	1,6	0,0	0,0	38,4
13	38,4	5,2	0,38	2,0	0,0	0,0	36,4
14	36,4	5,2	0,38	2,0	0,0	0,0	34,5
15	34,5	5,1	0,38	1,9	0,0	0,0	32,5
16	32,5	2,4	0,38	0,9	0,0	0,0	31,6
17	31,6	4,7	0,38	1,8	0,0	0,0	29,8
18	29,8	4,9	0,38	1,9	0,0	0,0	28,0
19	28,0	3,1	0,38	1,2	1,0	1,0	27,8
20	27,8	2,9	0,38	1,1	5,8	5,8	32,5
21	32,5	3,2	0,38	1,2	1,4	1,4	32,7
22	32,7	4,4	0,38	1,7	0,0	0,0	31,0
23	31,0	4,5	0,38	1,7	0,0	0,0	29,3
24	29,3	4,4	0,38	1,7	0,0	0,0	27,6
25	27,6	5,4	0,38	2,1	0,0	0,0	25,5
26	25,5	5,0	0,38	1,9	0,0	0,0	23,6
27	23,6	2,2	0,38	0,8	5,6	5,6	28,4
28	28,4	3,0	0,38	1,1	0,0	0,0	27,3
29	27,3	3,4	0,38	1,3	0,0	0,0	26,0
30	26,0	4,7	0,38	1,8	0,0	0,0	24,2
31	24,2	5,8	0,38	2,2	0,0	0,0	22,0

Date Août	RFU (mm)	Et _p (mm)	K _c	Et _c (mm)	Précipitations (mm)		RFU (mm)
	Début de journée				Totales	Valorisables	Fin de journée
1	22,0	4,0	0,38	1,5	0,0	0,0	20,5
2	20,5	3,6	0,38	1,4	10,0	10,0	29,1
3	29,1	2,5	0,38	1,0	0,0	0,0	28,2
4	28,2	3,4	0,38	1,3	9,6	9,6	36,5
5	36,5	1,2	0,38	0,4	9,6	4,0	40,0
6	40,0	1,6	0,38	0,6	5,4	0,6	40,0
7	40,0	2,4	0,38	0,9	0,0	0,0	39,1
8	39,1	3,1	0,38	1,2	0,0	0,0	37,9
9	37,9	3,6	0,38	1,4	3,6	3,4	40,0
10	40,0	2,4	0,38	0,9	0,6	0,6	39,7
11	39,7	2,4	0,38	0,9	7,4	1,2	40,0
12	40,0	1,0	0,38	0,4	6,6	0,4	40,0
13	40,0	4,4	0,38	1,7	0,0	0,0	38,3
14	38,3	4,0	0,38	1,5	0,0	0,0	36,8
15	36,8	2,6	0,38	1,0	5,6	4,2	40,0
16	40,0	2,5	0,38	0,9	0,0	0,0	39,1
17	39,1	2,8	0,38	1,1	0,0	0,0	38,0
18	38,0	2,5	0,38	1,0	0,6	0,6	37,6
19	37,6	1,3	0,38	0,5	13,2	2,9	40,0
20	40,0	3,3	0,38	1,3	8,6	1,3	40,0
21	40,0	3,2	0,38	1,2	12,8	1,2	40,0
22	40,0	0,8	0,38	0,3	14,4	0,3	40,0
23	40,0	2,7	0,38	1,0	1,6	1,0	40,0
24	40,0	1,6	0,38	0,6	2,8	0,6	40,0
25	40,0	2,4	0,37	0,9	0,0	0,0	39,1
26	39,1	3,3	0,37	1,2	0,0	0,0	37,9
27	37,9	3,9	0,37	1,4	0,0	0,0	36,4
28	36,4	3,8	0,37	1,4	0,0	0,0	35,0
29	35,0	3,8	0,37	1,4	0,0	0,0	33,6
30	33,6	2,6	0,37	1,0	4,0	4,0	36,7
31	36,7	1,5	0,37	0,6	6,6	3,9	40,0

Date Septembre	RFU (mm)	Et _p (mm)	K _c	Et _c (mm)	Précipitations (mm)		RFU (mm)
					Totales	Valorisables	
	Début de journée						Fin de journée
1	40,0	1,8	0,37	0,7	0,6	0,6	39,9
2	39,9	3,3	0,37	1,2	0,0	0,0	38,7
3	38,7	2,5	0,37	0,9	7,8	2,2	40,0
4	40,0	1,1	0,37	0,4	4,6	0,4	40,0
5	40,0	2,9	0,37	1,1	16,8	1,1	40,0
6	40,0	1,7	0,37	0,6	0,0	0,0	39,4
7	39,4	1,0	0,37	0,4	3,0	1,0	40,0
8	40,0	1,6	0,37	0,6	2,2	0,6	40,0
9	40,0	3,3	0,37	1,2	0,0	0,0	38,8
10	38,8	3,0	0,37	1,1	0,0	0,0	37,7
11	37,7	0,0	0,37	0,0	0,0	0,0	37,7
12	37,7	0,0	0,37	0,0	0,0	0,0	37,7
13	37,7	3,5	0,37	1,3	0,0	0,0	36,4
14	36,4	2,6	0,37	1,0	0,0	0,0	35,4
15	35,4	1,9	0,37	0,7	0,0	0,0	34,7
16	34,7	1,4	0,37	0,5	0,0	0,0	34,2

Tableau 54. Seuils de rentabilité relatifs en fonction du coût d'acquisition du système d'irrigation, de la superficie de la bleuëtière, du prix du bleuet et du rendement de base moyen

		Gain de production nécessaire (% du rendement de base)												
		10 ha				20 ha				40 ha				
		0,55 \$	1,10 \$	1,65 \$	2,20 \$	0,55 \$	1,10 \$	1,65 \$	2,20 \$	0,55 \$	1,10 \$	1,65 \$	2,20 \$	
Rendements de base (kg/ha)														
Coût d'acquisition du système d'irrigation														
	50 000 \$	3 000	53,7%	26,8%	17,9%	13,4%	26,8%	13,4%	8,9%	6,7%	13,4%	6,7%	4,5%	3,4%
	100 000 \$	3 000	107,3%	53,7%	35,8%	26,8%	53,7%	26,8%	17,9%	13,4%	26,8%	13,4%	8,9%	6,7%
	200 000 \$	3 000	214,6%	107,3%	71,5%	53,7%	107,3%	53,7%	35,8%	26,8%	53,7%	26,8%	17,9%	13,4%
	400 000 \$	3 000	429,2%	214,6%	143,1%	107,3%	214,6%	107,3%	71,5%	53,7%	107,3%	53,7%	35,8%	26,8%
Coût d'acquisition du système d'irrigation														
	50 000 \$	4 000	40,2%	20,1%	13,4%	10,1%	20,1%	10,1%	6,7%	5,0%	10,1%	5,0%	3,4%	2,5%
	100 000 \$	4 000	80,5%	40,2%	26,8%	20,1%	40,2%	20,1%	13,4%	10,1%	20,1%	10,1%	6,7%	5,0%
	200 000 \$	4 000	161,0%	80,5%	53,7%	40,2%	80,5%	40,2%	26,8%	20,1%	40,2%	20,1%	13,4%	10,1%
	400 000 \$	4 000	321,9%	161,0%	107,3%	80,5%	161,0%	80,5%	53,7%	40,2%	80,5%	40,2%	26,8%	20,1%
Coût d'acquisition du système d'irrigation														
	50 000 \$	5 000	32,2%	16,1%	10,7%	8,0%	16,1%	8,0%	5,4%	4,0%	8,0%	4,0%	2,7%	2,0%
	100 000 \$	5 000	64,4%	32,2%	21,5%	16,1%	32,2%	16,1%	10,7%	8,0%	16,1%	8,0%	5,4%	4,0%
	200 000 \$	5 000	128,8%	64,4%	42,9%	32,2%	64,4%	32,2%	21,5%	16,1%	32,2%	16,1%	10,7%	8,0%
	400 000 \$	5 000	257,5%	128,8%	85,8%	64,4%	128,8%	64,4%	42,9%	32,2%	64,4%	32,2%	21,5%	16,1%
Coût d'acquisition du système d'irrigation														
	50 000 \$	6 000	26,8%	13,4%	8,9%	6,7%	13,4%	6,7%	4,5%	3,4%	6,7%	3,4%	2,2%	1,7%
	100 000 \$	6 000	53,7%	26,8%	17,9%	13,4%	26,8%	13,4%	8,9%	6,7%	13,4%	6,7%	4,5%	3,4%
	200 000 \$	6 000	107,3%	53,7%	35,8%	26,8%	53,7%	26,8%	17,9%	13,4%	26,8%	13,4%	8,9%	6,7%
	400 000 \$	6 000	214,6%	107,3%	71,5%	53,7%	107,3%	53,7%	35,8%	26,8%	53,7%	26,8%	17,9%	13,4%
Coût d'acquisition du système d'irrigation														
	50 000 \$	7 000	23,0%	11,5%	7,7%	5,7%	11,5%	5,7%	3,8%	2,9%	5,7%	2,9%	1,9%	1,4%
	100 000 \$	7 000	46,0%	23,0%	15,3%	11,5%	23,0%	11,5%	7,7%	5,7%	11,5%	5,7%	3,8%	2,9%
	200 000 \$	7 000	92,0%	46,0%	30,7%	23,0%	46,0%	23,0%	15,3%	11,5%	23,0%	11,5%	7,7%	5,7%
	400 000 \$	7 000	184,0%	92,0%	61,3%	46,0%	92,0%	46,0%	30,7%	23,0%	46,0%	23,0%	15,3%	11,5%
Coût d'acquisition du système d'irrigation														
	50 000 \$	8 000	20,1%	10,1%	6,7%	5,0%	10,1%	5,0%	3,4%	2,5%	5,0%	2,5%	1,7%	1,3%
	100 000 \$	8 000	40,2%	20,1%	13,4%	10,1%	20,1%	10,1%	6,7%	5,0%	10,1%	5,0%	3,4%	2,5%
	200 000 \$	8 000	80,5%	40,2%	26,8%	20,1%	40,2%	20,1%	13,4%	10,1%	20,1%	10,1%	6,7%	5,0%
	400 000 \$	8 000	161,0%	80,5%	53,7%	40,2%	80,5%	40,2%	26,8%	20,1%	40,2%	20,1%	13,4%	10,1%
Coût d'acquisition du système d'irrigation														
	50 000 \$	9 000	17,9%	8,9%	6,0%	4,5%	8,9%	4,5%	3,0%	2,2%	4,5%	2,2%	1,5%	1,1%
	100 000 \$	9 000	35,8%	17,9%	11,9%	8,9%	17,9%	8,9%	6,0%	4,5%	8,9%	4,5%	3,0%	2,2%
	200 000 \$	9 000	71,5%	35,8%	23,8%	17,9%	35,8%	17,9%	11,9%	8,9%	17,9%	8,9%	6,0%	4,5%
	400 000 \$	9 000	143,1%	71,5%	47,7%	35,8%	71,5%	35,8%	23,8%	17,9%	35,8%	17,9%	11,9%	8,9%
Coût d'acquisition du système d'irrigation														
	50 000 \$	10 000	16,1%	8,0%	5,4%	4,0%	8,0%	4,0%	2,7%	2,0%	4,0%	2,0%	1,3%	1,0%
	100 000 \$	10 000	32,2%	16,1%	10,7%	8,0%	16,1%	8,0%	5,4%	4,0%	8,0%	4,0%	2,7%	2,0%
	200 000 \$	10 000	64,4%	32,2%	21,5%	16,1%	32,2%	16,1%	10,7%	8,0%	16,1%	8,0%	5,4%	4,0%
	400 000 \$	10 000	128,8%	64,4%	42,9%	32,2%	64,4%	32,2%	21,5%	16,1%	32,2%	16,1%	10,7%	8,0%

