

Établir des balises techniques, économiques, sociales et environnementales concernant le recours à l'irrigation du maïs, du soya et des plantes fourragères

(21-001-GE-IRDA) (6864747)

12-2020 – 02-2024

RAPPORT FINAL

Carl Boivin, Jérémie Vallée, Sylvestre Delmotte, Simon Ricard, Guillaume Jégo, Arianne Blais-Gagnon, Michael Osina, Catherine Bossé et Marianne Crépeau

Mars 2024

Les résultats, opinions et recommandations exprimés dans ce rapport émanent de l'auteur ou des auteurs et n'engagent aucunement le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.

TABLE DES MATIÈRES

1	RÉSUMÉ DU PROJET	1
2	OBJECTIFS.....	4
2.1	Objectif général.....	4
2.2	Objectifs spécifiques.....	4
3	APERÇU DE LA MÉTHODOLOGIE SELON LES OBJECTIFS.....	5
3.1	Objectif 1a. Estimer, à partir d'essais au champ, les gains de rendement associés à l'irrigation en climat actuel.....	5
3.1.1	Sites et dispositifs expérimentaux.....	5
3.1.2	Analyses statistiques	6
3.1.3	Caractérisation des propriétés physiques du sol des sites	7
3.1.4	Suivis hydriques	7
3.1.4.1	Conditions météorologiques et évapotranspiration potentielle (ET_p).....	7
3.1.4.2	Suivi du statut hydrique du sol, évapotranspiration de la culture (ET_c) et coefficients culturaux (K_c).....	8
3.1.4.3	Consigne et régie d'irrigation.....	9
3.1.4.4	Développement racinaire	10
3.1.4.5	Hauteur d'eau provenant des précipitations potentiellement valorisables par la culture (HEPPVC).....	10
3.1.5	Suivis physiologiques	10
3.1.5.1	Cultures fourragères pérennes.....	10
3.1.5.2	Soya	11
3.1.5.3	Maïs.....	11
3.1.5.4	Poids spécifique.....	11
3.1.5.5	Mauvaises herbes.....	12
3.2	Objectif 1b. Estimer, à partir de simulations, les gains de rendement associés à l'irrigation en climat futur	13
3.3	Objectif 2. Évaluer les coûts de l'irrigation et ses effets sur la rentabilité de la méthode d'irrigation choisie.	14
3.4	Objectif 3. Évaluer les besoins en eau de cette pratique sur les ressources hydriques en période d'étiage et son effet cumulatif sur les autres utilisateurs du territoire visé.....	15
3.4.1	Délimitation du territoire pour l'étude	15
3.4.2	Détermination des ressources hydriques disponibles en période d'étiage	15
3.4.2.1	Eau de surface.....	16
3.4.2.2	Eau souterraine	17
4	RÉSULTATS SIGNIFICATIFS OBTENUS	18
4.1	Objectif 1a. Estimer, à partir d'essais au champ, les gains de rendement associés à l'irrigation en climat actuel.....	18
4.1.1	Caractérisation du sol des sites	18
4.1.2	Suivis hydriques	19
4.1.2.1	Pluviométrie mensuelle par site	19
4.1.2.2	Évapotranspiration potentielle mensuelle par site	20
4.1.2.3	Nombre d'épisodes d'irrigation et hauteur d'eau appliquée	22
4.1.2.4	Nombre de jours où une contrainte au prélèvement en eau a été observée.....	24
4.1.3	Enracinement des cultures	80
4.1.4	Hauteur d'eau provenant des précipitations potentiellement valorisables par la culture (HEPPVC)	85
4.1.5	Suivis physiologiques	87
4.1.5.1	Masse en matières sèches des parties aériennes et rendement en grains.....	87
4.1.5.2	Prévalences des mauvaises herbes.....	95

4.1.5.3	Qualité des fourrages.....	96
4.2	Objectif 1b. Estimer, à partir de simulations, les gains de rendement associés à l'irrigation en climat futur.....	98
4.3	Objectif 2. Évaluer les coûts de l'irrigation et ses effets sur la rentabilité de la méthode d'irrigation choisie.....	99
4.4	Objectif 3. Évaluer les besoins en eau de cette pratique sur les ressources hydriques en période d'étiage et son effet cumulatif sur les autres utilisateurs du territoire visé.....	100
5	CONCLUSION.....	105
6	RÉFÉRENCES.....	106
7	DIFFUSION DES RÉSULTATS.....	108
8	POINT DE CONTACT POUR INFORMATION.....	109
9	ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET.....	109
10	REMERCIEMENTS AUX PARTENAIRES FINANCIERS.....	110
11	ANNEXE.....	111
11.1	Rapport Pédologie.....	111
11.2	(Objectif 1b). Simulation des impacts des changements climatiques sur les besoins en eau d'irrigation du maïs, du soya et des plantes fourragères avec le modèle STICS.....	125
11.3	(Objectif 2). Analyse économique.....	176
11.4	Résultats analyses qualité sites plantes fourragères (2021).....	191
11.5	Résultats analyses qualité sites plantes fourragères (2022).....	192
11.6	Résultats analyses qualité sites plantes fourragères (2023).....	194
11.7	Cartes relatives à l'estimation de la disponibilité de l'eau de surface, des eaux souterraines et de la disponibilité totale.....	196

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2021 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Pascal, saison 2021.....	25
Figure 2. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Saint-Bruno-de-Kamouraska entre 2011 et 2021 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Pascal, saison 2021.....	26
Figure 3. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) et bilan pluviométrie- ET_p ($\text{P}-\text{ET}_p$) (mm), traitement irrigué selon la profondeur au site Saint-Pascal, saison 2021.....	27
Figure 4. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) et bilan pluviométrie- ET_p ($\text{P}-\text{ET}_p$) (mm), traitement non irrigué selon la profondeur au site Saint-Pascal, saison 2021.....	28
Figure 5. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR ($\text{ET}_c\text{-TDR}$) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station Agrométéo Québec la plus près, site Saint-Pascal, 15 au 31 juillet 2021... 29	29
Figure 6. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Saint-Pascal, saison 2021 (bleu = irrigué et gris = non irrigué).....	29
Figure 7. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2021 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Germain1, saison 2021.....	30
Figure 8. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Germain1, saison 2022.....	31
Figure 9. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2023 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Germain1, saison 2023.....	31
Figure 10. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Saint-Bruno-de-Kamouraska entre 2011 et 2021 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Germain1, saison 2021.....	32
Figure 11. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Saint-Bruno-de-Kamouraska entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Germain1, saison 2022.....	33
Figure 12. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Saint-Bruno-de-Kamouraska entre 2011 et 2023 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Germain1, saison 2023.....	33
Figure 13. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) et bilan pluviométrie- ET_p ($\text{P}-\text{ET}_p$) (mm), traitement irrigué selon la profondeur au site Saint-Germain1, saison 2021.....	34
Figure 14. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) et bilan pluviométrie- ET_p ($\text{P}-\text{ET}_p$) (mm), traitement non irrigué selon la profondeur au site Saint-Germain1, saison 2021.....	35
Figure 15. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) et bilan pluviométrie- ET_p ($\text{P}-\text{ET}_p$) (mm), traitement irrigué selon la profondeur au site Saint-Germain1, saison 2022.....	37
Figure 16. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) et bilan pluviométrie- ET_p ($\text{P}-\text{ET}_p$) (mm), traitement non irrigué selon la profondeur au site Saint-Germain1, saison 2022.....	38

Figure 17. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) et bilan pluviométrie- ET_p ($\text{P}-\text{ET}_p$) (mm), traitement irrigué selon la profondeur au site Saint-Germain1, saison 2023.	39
Figure 18. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) et bilan pluviométrie- ET_p ($\text{P}-\text{ET}_p$) (mm), traitement non irrigué selon la profondeur au site Saint-Germain1, saison 2023.	40
Figure 19. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Saint-Germain1, saison 2021 (bleu = irrigué et gris = non irrigué).	41
Figure 20. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR ($\text{ET}_c\text{-TDR}$) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près, site Saint-Germain1, 1 ^{er} au 15 août 2021.	42
Figure 21. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Saint-Germain1, saison 2022 (bleu = irrigué et gris = non irrigué).	42
Figure 22. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR ($\text{ET}_c\text{-TDR}$) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près, site Saint-Germain1, 20 août au 10 septembre 2022.	43
Figure 23. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Saint-Germain1, saison 2023 (bleu = irrigué et gris = non irrigué).	44
Figure 24. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR ($\text{ET}_c\text{-TDR}$) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près, site Saint-Germain1, 12 au 31 mai 2023.	44
Figure 25. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Germain2, saison 2022.	45
Figure 26. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2023 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Germain2, saison 2023.	46
Figure 27. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Saint-Bruno-de-Kamouraska entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Germain2, saison 2022.	47
Figure 28. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Saint-Bruno-de-Kamouraska entre 2011 et 2023 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Germain2, saison 2023.	47
Figure 29. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) et bilan pluviométrie- ET_p ($\text{P}-\text{ET}_p$) (mm), traitement irrigué selon la profondeur au site Saint-Germain2, saison 2022.	48
Figure 30. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) et bilan pluviométrie- ET_p ($\text{P}-\text{ET}_p$) (mm), traitement non irrigué selon la profondeur au site Saint-Germain2, saison 2022.	49
Figure 31. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) et bilan pluviométrie- ET_p ($\text{P}-\text{ET}_p$) (mm), traitement irrigué selon la profondeur au site Saint-Germain2, saison 2023.	50
Figure 32. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) et bilan pluviométrie- ET_p ($\text{P}-\text{ET}_p$) (mm), traitement non irrigué selon la profondeur au site Saint-Germain2, saison 2023.	51
Figure 33. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR ($\text{ET}_c\text{-TDR}$) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près, site Saint-Germain2, 12 au 30 mai 2023.	52
Figure 34. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Saint-Germain2, saison 2022 (bleu = irrigué et gris = non irrigué).	52

Figure 35. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Saint-Germain2, saison 2023.....	53
Figure 36. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2021 (mm) en fonction du semis et de la récolte, site Soya, saison 2021.....	54
Figure 37. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2022 (mm) en fonction du semis et de la récolte, site Soya, saison 2022.....	55
Figure 38. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2023 (mm) en fonction du semis et de la récolte, site Soya, saison 2023.....	55
Figure 39. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Deschambault SM entre 2011 et 2021 (mm) en fonction du semis et de la récolte, site Soya, saison 2021	56
Figure 40. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Deschambault SM entre 2011 et 2022 (mm) en fonction du semis et de la récolte, site Soya, saison 2022.....	56
Figure 41. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Deschambault SM entre 2011 et 2023 (mm) en fonction du semis et de la récolte, site Soya, saison 2023.....	57
Figure 42. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) et bilan pluviométrie- ET_p ($\text{P}-\text{ET}_p$) (mm), traitement irrigué selon la profondeur au site Soya, saison 2021.....	58
Figure 43. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) et bilan pluviométrie- ET_p ($\text{P}-\text{ET}_p$) (mm), traitement non irrigué selon la profondeur au site Soya, saison 2021.....	59
Figure 44. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) et bilan pluviométrie- ET_p ($\text{P}-\text{ET}_p$) (mm), traitement irrigué selon la profondeur au site Soya, saison 2022.....	60
Figure 45. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) et bilan pluviométrie- ET_p ($\text{P}-\text{ET}_p$) (mm), traitement non irrigué selon la profondeur au site Soya, saison 2022.....	61
Figure 46. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) et bilan pluviométrie- ET_p ($\text{P}-\text{ET}_p$) (mm), traitement irrigué selon la profondeur au site Soya, saison 2023.....	62
Figure 47. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) et bilan pluviométrie- ET_p ($\text{P}-\text{ET}_p$) (mm), traitement non irrigué selon la profondeur au site Soya, saison 2023.....	63
Figure 48. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Soya, saison 2021 (bleu = irrigué et gris = non irrigué).....	64
Figure 49. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR ($\text{ET}_c\text{-TDR}$) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près, site Soya, 1 ^{er} au 15 juillet 2021.	64
Figure 50. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR ($\text{ET}_c\text{-TDR}$) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près, site Soya, 31 juillet au 14 août 2021. ..	65
Figure 51. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR ($\text{ET}_c\text{-TDR}$) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près, site Soya, 14 au 31 août 2021.	65
Figure 52. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR ($\text{ET}_c\text{-TDR}$) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près, site Soya, 1 ^{er} au 15 septembre 2022. ..	66
Figure 53. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Soya, saison 2022 (bleu = irrigué et gris = non irrigué).....	66

Figure 54. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près, site Soya, 1 ^{er} au 15 septembre 2023. ...	67
Figure 55. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Soya, saison 2023 (bleu = irrigué et gris = non irrigué).....	67
Figure 56. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2021 (mm), entre le 1 ^{er} mai et la récolte, site Maïs-grain, saison 2021.....	68
Figure 57. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2022 (mm) en fonction du semis et de la récolte, site Maïs-grain, saison 2022.....	69
Figure 58. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2023 (mm) en fonction du semis et de la récolte, site Maïs-grain, saison 2023.....	69
Figure 59. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Deschambault SM entre 2011 et 2021 (mm), entre le 1 ^{er} mai et la récolte, site Maïs-grain, saison 2021.....	70
Figure 60. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Deschambault SM entre 2011 et 2022 (mm) en fonction du semis et de la récolte, site Maïs-grain, saison 2022.....	70
Figure 61. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Deschambault SM entre 2011 et 2023 (mm) en fonction du semis et de la récolte, site Maïs-grain, saison 2023.....	71
Figure 62. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) et bilan pluviométrie- ET_p ($P-ET_p$) (mm), traitement irrigué selon la profondeur au site Maïs-grain, saison 2021.....	72
Figure 63. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) et bilan pluviométrie- ET_p ($P-ET_p$) (mm), traitement non irrigué selon la profondeur au site Maïs-grain, saison 2021.....	73
Figure 64. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) et bilan pluviométrie- ET_p ($P-ET_p$) (mm), traitement irrigué selon la profondeur au site Maïs-grain, saison 2022.....	74
Figure 65. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) et bilan pluviométrie- ET_p ($P-ET_p$) (mm), traitement non irrigué selon la profondeur au site Maïs-grain, saison 2022.....	75
Figure 66. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) et bilan pluviométrie- ET_p ($P-ET_p$) (mm), traitement irrigué selon la profondeur au site Maïs-grain, saison 2023.....	76
Figure 67. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol) et bilan pluviométrie- ET_p ($P-ET_p$) (mm), traitement non irrigué selon la profondeur au site Maïs-grain, saison 2023.....	77
Figure 68. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station Agrométéo Québec la plus près, site Maïs-grain, 14 au 31 août 2021.	78
Figure 69. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Maïs-grain, saison 2021 (bleu = irrigué et gris = non irrigué).....	78
Figure 70. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Maïs-grain, saison 2022 (bleu = irrigué et gris = non irrigué).....	79
Figure 71. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Maïs-grain, saison 2023 (bleu = irrigué et gris = non irrigué).....	79

Figure 72. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol), traitement irrigué selon la profondeur (installation horizontale) au site Soya, saison 2022.	81
Figure 73. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol), traitement irrigué selon la profondeur (installation horizontale) au site Soya, saison 2023.	81
Figure 74. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol), traitement irrigué selon la profondeur (installation horizontale) au site Soya, 20 juillet au 2 août 2022.	82
Figure 75. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol), selon la profondeur (installation horizontale) au site Soya, 1 ^{er} septembre au 13 septembre 2023.	82
Figure 76. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol), traitement irrigué selon la profondeur (installation horizontale) au site Maïs-grain, saison 2022.	83
Figure 77. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol), traitement irrigué selon la profondeur (installation horizontale) au site Maïs-grain, saison 2023.	83
Figure 78. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm^3 eau / cm^3 sol), traitement irrigué selon la profondeur (installation horizontale) au site Maïs-grain, 2 au 7 août 2022.	84
Figure 79. Hauteur d'eau provenant des précipitations potentiellement valorisables par la culture (%), selon le traitement et la saison, site Saint-Germain1.	85
Figure 80. Hauteur d'eau provenant des précipitations potentiellement valorisables par la culture (%), selon le traitement et la saison, sites Soya.	86
Figure 81. Hauteur d'eau provenant des précipitations potentiellement valorisables par la culture (%), selon le traitement et la saison, sites Maïs-grain.	86
Figure 82. Sols irrigables du Québec agricole.	100
Figure 83 Disponibilité estimée de l'eau de surface (mm/a) par unité irrigable relativement homogène (UIRH).	102
Figure 84. Disponibilité estimée de l'eau souterraine (mm/an) par unité irrigable relativement homogène (UIRH).	103
Figure 85. Disponibilité totale (mm/a) par unité irrigable relativement homogène (UIRH).	104
Figure 86. Disponibilité de l'eau de surface – Gaspésie.	196
Figure 87. Disponibilité des eaux souterraines – Gaspésie.	197
Figure 88. Disponibilité totale – Gaspésie.	198
Figure 89. Disponibilité de l'eau de surface – Bas-Saint-Laurent.	199
Figure 90. Disponibilité des eaux souterraines – Bas-Saint-Laurent.	200
Figure 91. Disponibilité totale – Bas-Saint-Laurent.	201
Figure 92. Disponibilité de l'eau de surface – Chaudière-Appalaches.	202
Figure 93. Disponibilité des eaux souterraines – Chaudière-Appalaches.	203
Figure 94. Disponibilité totale – Chaudière-Appalaches.	204
Figure 95. Disponibilité de l'eau de surface – Estrie.	205
Figure 96. Disponibilité des eaux souterraines – Estrie.	206
Figure 97. Disponibilité totale – Estrie.	207
Figure 98. Disponibilité de l'eau de surface – Centre-du-Québec.	208

Figure 99. Disponibilité des eaux souterraines – Centre-du-Québec.....	209
Figure 100. Disponibilité totale – Centre-du-Québec.....	210
Figure 101. Disponibilité de l'eau de surface – Montérégie.	211
Figure 102. Disponibilité des eaux souterraines – Montérégie.	212
Figure 103. Disponibilité totale – Montérégie.	213
Figure 104. Disponibilité de l'eau de surface – Outaouais.....	214
Figure 105. Disponibilité des eaux souterraines – Outaouais.....	215
Figure 106. Disponibilité totale – Outaouais.....	216
Figure 107. Disponibilité de l'eau de surface – Laurentides.	217
Figure 108. Disponibilité des eaux souterraines – Laurentides.....	218
Figure 109. Disponibilité totale – Laurentides.....	219
Figure 110. Disponibilité de l'eau de surface – Lanaudière.	220
Figure 111. Disponibilité des eaux souterraines – Lanaudière.	221
Figure 112. Disponibilité totale – Lanaudière.	222
Figure 113. Disponibilité de l'eau de surface – Mauricie.....	223
Figure 114. Disponibilité des eaux souterraines – Mauricie.....	224
Figure 115. Disponibilité totale – Mauricie.....	225
Figure 116. Disponibilité de l'eau de surface – Capitale-Nationale.....	226
Figure 117. Disponibilité des eaux souterraines – Capitale-Nationale.....	227
Figure 118. Disponibilité totale – Capitale-Nationale.....	228
Figure 119. Disponibilité de l'eau de surface – Saguenay-Lac-Saint-Jean.....	229
Figure 120. Disponibilité des eaux souterraines – Saguenay-Lac-Saint-Jean.....	230
Figure 121. Disponibilité totale – Saguenay-Lac-Saint-Jean.....	231

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Localisation et caractérisation (élévation (m) et distance (km)) des stations météorologiques retenues à des fins comparatives, selon le site et l'année.....	8
Tableau 2. Caractérisation physico-chimique du sol présenté selon le site, saison 2021 à 2023.	18
Tableau 3. Pluviométrie cumulative mensuelle (mm) (mai à octobre) et normales climatiques de la pluviométrie mensuelle (mm) pour les stations les plus près, selon les sites et l'année.	20
Tableau 4. Évapotranspiration potentielle cumulative mensuelle (mm) (mai à octobre) et moyenne mensuelle 2011-2023 (mm) pour les stations les plus près, selon les sites et l'année.	21
Tableau 5. Registre des irrigations avec la durée et la hauteur appliquée selon le site et l'année.....	23
Tableau 6. Rendement en biomasse aérienne humide (t/ha), humidité des grains à la récolte (%), rendement en grains humide et stabilisé (t/ha) et poids spécifique (kg/hl) mesurés lors des récoltes pour le site Maïs-grain selon le traitement, saison 2021à 2023.....	87
Tableau 7. Comparaison des modèles testés, le critère d'information corrigé AICc, l'écart entre les critères d'information corrigés $\Delta AICc$ selon le paramètre analysé, site Maïs-grain (2021-2022).....	88
Tableau 8. Rendement en biomasse aérienne humide (t/ha), humidité des grains à la récolte (%), rendement en grains humide et stabilisé (t/ha) et poids spécifique (kg/hl) mesurés lors des récoltes pour le site Soya selon le traitement, saison 2021à 2023.....	89
Tableau 9. Comparaison des modèles testés, le critère d'information corrigé AICc, l'écart entre les critères d'information corrigés $\Delta AICc$ selon le paramètre analysé, site Soya (2021-2022).....	91
Tableau 10. Rendements en biomasses aériennes humide et sèche (t/ha) mesurées au site Saint-Germain1 selon la date de récolte et le traitement, saison 2021 (Prairie en implantation).....	92
Tableau 11. Rendements en biomasses aériennes humide et sèche (t/ha) mesurées au site Saint-Germain1 selon le traitement rapporté en moyenne par coupe, saison 2022-2023.....	92
Tableau 12. Rendements en biomasses aériennes humide et sèche (t/ha) mesurées aux sites Saint-Pascal et Saint-Germain2 selon la date de récolte et le traitement, saison 2021 à 2023.....	93
Tableau 13. Comparaison des modèles testés, le critère d'information corrigé AICc, l'écart entre les critères d'information corrigés $\Delta AICc$ selon le paramètre analysé, site Saint-Germain1 (2021 à 2023)..	94
Tableau 14. Comparaison des modèles testés, le critère d'information corrigé AICc, l'écart entre les critères d'information corrigés $\Delta AICc$ selon le paramètre analysé, site Saint-Germain 2 (2022-2023)....	94
Tableau 15. Proportions de luzerne, de graminées, de trèfle, de pois et de mauvaises herbes (%) qui composent la biomasse récoltée selon le site, la date de récolte et le traitement (base sèche), saison 2021-2023.	95
Tableau 16. Qualité du fourrage selon le site, la date de récolte ainsi que le traitement, saison 2022....	97
Tableau 17. Superficies irrigables par régions administratives au Québec.....	101

ÉTABLIR DES BALISES TECHNIQUES, ÉCONOMIQUES, SOCIALES ET ENVIRONNEMENTALES CONCERNANT LE RECOURS À L'IRRIGATION DU MAÏS, DU SOYA ET DES PLANTES FOURRAGÈRES

(21-001-GE-IRDA) (6864747)

1 RÉSUMÉ DU PROJET

Ce projet avait comme objectif de réaliser une étude pour établir les balises techniques, économiques, sociales et environnementales concernant le recours à l'irrigation des grandes cultures et des plantes fourragères, et plus spécifiquement : 1) Estimer, à partir d'essais au champ et de simulations, les gains de rendement associés à l'irrigation dans les climats actuel et futur; 2) Évaluer les coûts de l'irrigation et ses effets sur la rentabilité de la méthode d'irrigation choisie; et 3) Évaluer les besoins en eau de cette pratique sur les ressources hydriques en période d'étiage et son effet cumulatif sur les autres utilisateurs du territoire visé.

Les essais au champ ont été réalisés de 2021 à 2023. Ceux ayant trait aux plantes fourragères ont été conduits au Bas-Saint-Laurent à la Ferme Madrice et à la Ferme des Perles. Alors que ceux avec le maïs-grain et le soya, ont été réalisés dans la Capitale-Nationale, à la Ferme Catélie, à la Ferme Dégau et à la Ferme J.P. et fils. La régie de culture a été de type conventionnel. Annuellement, quatre dispositifs expérimentaux ont été implantés où pour chacun d'eux, il était permis ou non d'intervenir avec l'irrigation, conditionnellement à une consigne de déclenchement qui combine l'approche du Point tournant et l'atteinte de stades de développement précis. La hauteur visée par un apport était de 20 mm. En 2021, la consigne d'irrigation a été atteinte jusqu'à 5 reprises pour les plantes fourragères et à respectivement 6 et 7 occasions pour le maïs-grain et le soya. En 2022, les plantes fourragères ont reçu jusqu'à 5 irrigations, alors que le maïs-grain et le soya, respectivement 3 et 2. En 2023, l'irrigation a été déclenchée une seule fois, pour les sites en plantes fourragères.

Le rendement des plantes fourragères a été plus élevé avec l'irrigation à la 2^e coupe en année d'implantation au site qui a été suivi durant 3 ans (18,7 t/ha, comparativement à 3,7 t/ha). Au même site en 2022 et 2023, le rendement a été en moyenne 30 % plus élevé avec l'irrigation. Ces résultats vont dans le même sens que ceux observés à l'Île d'Orléans pour un site en prairie (luzerne et mil) où un gain de rendement de 20 % a été observé en contexte irrigué en année d'implantation (2021) et de respectivement 9,4 et 5,2 % lors de la 2^e et 3^e coupe en 2022 (Vallée et Boivin, 2023). En ce qui a trait au maïs-grain, le rendement en grains obtenus en 2021, soit la saison la plus propice au stress hydrique, a été de respectivement de 11,6 et 10,6 t/ha, avec et sans irrigation. Toutefois, ces rendements ne sont pas significativement différents. Aucune différence n'a été observée en 2022 et les résultats de 2023 n'ont pas été analysés compte tenu de l'absence d'irrigation. Pour le soya, aucune différence de rendement n'a été observée avec ou sans irrigation. Les rendements qui ont été mesurés en 2021 et 2023 se situent entre 3,5 à 4,0 t/ha, alors qu'ils ont été de 1,4 t/ha en 2022. Un dépérissement d'origine fongique a été observé en août de cette année.

Le suivi de la teneur en eau volumique du sol effectué en continu a permis d'identifier les contextes où ces cultures ont subi une contrainte de prélèvement en eau, pilier des consignes. Il a aussi permis de calculer des coefficients culturaux « TDR » (K_{C-TDR}). En année d'implantation, ces K_{C-TDR} ont atteint des valeurs maximales d'environ 1,5, en absence de stress hydrique, alors que ces derniers ont atteint des valeurs maximales inférieures à 1, en contexte non irrigué. En 2022 et 2023, les valeurs maximales sont comparables en contexte avec ou sans irrigation, avec 1,4. En contexte de plantes fourragères, le K_{C-TDR} chute radicalement à la suite d'une coupe, pour revenir en force, jusqu'à la suivante. Avec le soya et le maïs-grain, l'évolution du K_{C-TDR} suit davantage l'allure d'une courbe normale. Pour le soya, une valeur de 0,2 est observée au début, valeur qui croît jusqu'au début juillet pour alors atteindre et même dépasser le seuil de 1, à partir de ce moment, un plateau est observé jusqu'à la fin août, pour ensuite

décroître et atteindre une valeur de 0,2 en septembre. En ce qui a trait au maïs-grain, la valeur maximale est atteinte en août avec un 1,4 bien assumé.

Observer l'augmentation et la diminution de la teneur en eau volumique du sol permet aussi de suivre le développement du système racinaire ou encore, de constater la portée d'un épisode d'irrigation ou de pluie. Il devient alors possible de déduire la profondeur d'enracinement de la culture. En année d'implantation, le système racinaire de la luzerne a atteint l'horizon 30-60 cm dès la mi-juillet. Une fois bien implanté et en contexte de confort hydrique, le prélèvement se fait principalement dans les 30^{ers} cm de sol, alors qu'en contexte contraignant, le prélèvement se déplace en profondeur. L'essentiel des prélèvements a aussi été observé dans les 30^{ers} cm de sol pour le soya, alors que pour le maïs-grain, cette activité s'exerce jusqu'à une profondeur de 60 cm.

Maintenant, en contexte de simulations en climat de référence (1981-2010), les résultats indiquent un besoin en eau, en termes de nombre d'épisodes d'irrigation (20 mm/épisode) de 5 pour le maïs, de 3 à 4 pour le soya et de 4 à 6 pour la luzerne-fléole. Ces apports seraient nécessaires pour éviter une baisse de rendement de respectivement 30 et 20 % pour le maïs et le soya et de 2,5 t/ha pour la luzerne-fléole. En climat futur (2042-2070), ces 3 cultures auraient besoin de 1 épisode supplémentaire à ceux estimés en climat actuel. L'augmentation de rendement attendu en climat futur serait de 2,5 t/ha pour le maïs et d'environ 20 % pour le soya, alors que le rendement de la fléole subirait plutôt une pression à la baisse.

En ce qui a trait aux préoccupations d'ordres économiques, les conditions étudiées dans les scénarios ne permettent généralement pas d'obtenir un gain économique à irriguer ces cultures (30 ha) avec un canon enrouleur. Lorsqu'il est intéressant, ce sont lorsque les rendements, les prix et les pertes sont élevés, soit des situations qui ont peu de chance de se produire suffisamment souvent pour rentabiliser l'équipement. Plus spécifiquement, avec le rendement (7,6 t/ha) et le prix de référence (245 \$/t) de la FADQ pour la région du Kamouraska et avec un scénario de faibles pertes (10 %), il en coûte 43 295 \$ en irrigation pour en sauver 5586 \$. Pour un scénario de pertes élevées (50 %), il en coûte 58 434 \$ pour en sauver 41 895 \$. Enfin, lors d'une année où le canon enrouleur n'est pas utilisé, il en coûtera 28 156 \$. Pour le maïs-grain, le rendement (7,4 t/ha) et le prix de référence utilisés (241 \$/t) de la FADQ pour la Capitale-Nationale et la Beauce sont similaires aux fourrages, et par conséquent, les conclusions le sont aussi. Pour le soya, avec un rendement (2,6 t/ha) et un prix (530 \$/t) de référence, pour un scénario de pertes à 10 %, il en coûte 43 295 \$ pour sauver 4166 \$, alors qu'avec des pertes de 50 %, il en coûtera 58 343 \$ pour sauver 20 829 \$. À titre comparatif, un projet réalisé en contexte de production de pommes de terre qui possèdent déjà un pivot (Île d'Orléans et à Saint-Paul de Joliette) s'est intéressé à l'irrigation du maïs-grain et du soya qui sont utilisés en rotation (Valée et Boivin, 2014). Une augmentation de rendement de respectivement 2 et 8 %, avec une pompe électrique et diesel, permet de couvrir les frais de fonctionnement du pivot en année de rotation.

L'évaluation des besoins en eau de cette pratique sur les ressources hydriques en période d'étiage a été faite selon un territoire délimité par la présence de sols à potentiel irrigable en territoire agricole. Globalement, les études pédologiques cartographient 86 % de la zone agricole, soit un peu plus de 16 000 km². Les critères retenus sont : 1) sols de type minéral; 2) sols à drainage modéré, bien, rapide et très rapide; 3) granulométrie du matériau supérieur décrit comme loameux-grossier, sableux, squelettique-argileux, squelettique-loameux, squelettique-sableux et fragmentaire; et 4) les sous-groupes brunisoliques gleyifiés et luvisoliques ont été écartés. La Chaudière-Appalaches, la Montérégie, l'Estrie, le Bas-Saint-Laurent et le Centre-du-Québec se partagent 64 % des 1 632 441 ha de sols identifiés comme irrigables.

Les secteurs pour lesquels aucune donnée n'est disponible pour l'eau de surface concernent principalement le sud de la Gaspésie, la MRC du Témiscouata au Bas-Saint-Laurent, le sud de l'Estrie,

l'Île d'Orléans, en aval de la rivière Saint-Maurice dans le coin de Trois-Rivières, autour de Mont-Laurier dans les Laurentides, autour de Gracefield en Outaouais et les petits bassins versants orphelins en bordure du Fleuve Saint-Laurent. Les secteurs dont l'estimation de la disponibilité en eau (cumulée surface et souterraine, exprimé sur une base annuelle) est dans la fourchette 0-120 mm/an (mai à septembre) sont concentrés en aval de la rivière Du Chêne dans la MRC de Lotbinière, entre la rivière Chaudière et la rivière Etchemin, à l'est de la rivière Batiscan dans la région de Portneuf, dans les sols irrigables entre les rivières Saint-François et Nicolet Sud-Ouest, de part et d'autre de la rivière Noire (MRC Acton, Haute-Yamaska et Val-Saint-François), à l'ouest de la rivière Saint-François dans la MRC de Drummond et en bordure de la rivière des Outaouais au niveau de la MRC de Pontiac en Outaouais. Autrement, la grande majorité du territoire irrigable montre des disponibilités supérieures à 240 mm/an.

Une telle disponibilité serait suffisante pour répondre aux besoins actuels des cultures en présence. En effet, les essais au champ et les simulations convergent pour un besoin en eau d'au moins 100 mm ou 1000 m³/ha en climat actuel.

L'équipe de réalisation du projet « IrriMaYaLuF » est composée de membres de l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) spécialisés en régie de l'eau, en hydrologie agricole, en pédologie et en biostatistique, à laquelle s'ajoute cinq entreprises agricoles, des collaborateurs d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC), du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), du Centre d'études sur les coûts de production en agriculture (CECPA) et du secteur privé.

Ce projet a été financé par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation dans le cadre du programme Prime-Vert.

2 OBJECTIFS

2.1 Objectif général

Réaliser une étude sur plusieurs sites et régions pour établir les balises techniques, économiques, sociales et environnementales concernant le recours à l'irrigation des grandes cultures et des plantes fourragères.

2.2 Objectifs spécifiques

1. Estimer, à partir d'essais au champ et de simulations, les gains de rendement associés à l'irrigation dans les climats actuel et futur.
2. Évaluer les coûts de l'irrigation et ses effets sur la rentabilité de la méthode d'irrigation choisie.
3. Évaluer les besoins en eau de cette pratique sur les ressources hydriques en période d'étiage et son effet cumulatif sur les autres utilisateurs du territoire visé.
4. Diffuser les informations auprès de la clientèle agricole.

3 APERÇU DE LA MÉTHODOLOGIE SELON LES OBJECTIFS

3.1 Objectif 1a. Estimer, à partir d'essais au champ, les gains de rendement associés à l'irrigation en climat actuel

3.1.1 Sites et dispositifs expérimentaux

Les sites en grandes cultures ont été implantés dans la région de la Capitale-Nationale, plus précisément à la Ferme Catélie (2021 et 2022), à la Ferme Degau (2022) et à la Ferme J.P. et fils inc. Côté (2023). En 2021, le champ en production de maïs-grain (46.697626°, -71.694253°) a été ensemencé le 29 avril avec une variété à 2450 UTM, à une densité moyenne de 80 000 graines/ha et avec un espacement entre les rangs de 76,2 cm. Le champ en production de soya (46.695809°, -71.698135°) a été ensemencé le 8 mai, à une densité moyenne d'environ 328 000 graines/ha (variété P05A35X) avec un espacement entre les rangs de 38,1 cm.

En 2022, le champ en maïs-grain (46.719265°, -71.64026453°) a été semé le 13 mai avec une variété à 2450 UTM (variété E52V92) et à une densité moyenne de 81 700 graines/ha et avec un espacement entre les rangs de 76,2 cm. Le champ en production de soya (46.712968°, -71.613301°) (variété Katonda 2) a été semé le 14 mai à une densité moyenne d'environ 300 600 graines/ha et avec un espacement entre les rangs de 76,2 cm.

Finalement pour 2023, le champ en maïs-grain (46.716860°, -71.641781°) a été semé le 7 mai avec une variété à 2450 UTM (variété DKC49) et à une densité moyenne de 79 500 graines/ha. Le champ en production de soya (46.716548°, -71.642490°) (variété Donald) a été semé le 11 mai à une densité moyenne d'environ 402 800 graines/ha et avec un espacement entre les rangs de 76,2 cm.

Les essais au champ avec les cultures pérennes ont été réalisés au Bas-Saint-Laurent, plus précisément à la Ferme Madrice Enr. (2021, 2022, 2023), située à Saint-Germain ainsi qu'à la Ferme des Perles Inc. (2021), située à Saint-Pascal.

En 2021, le champ sélectionné (47.516336°, -69.824892°) pour le dispositif « Saint-Pascal » était une prairie qui a été établie en 2018 où le mélange utilisé au semis était composé de 75 % de luzerne (Magnum VII Wet) et de 25 % de fléole des prés. Au moment des essais, ce site était en 4^e année. L'autre dispositif « Saint-Germain1 », (47.586896°, -69.766792°), était une prairie en établissement (semis direct, 13 avril 2021) multispèces composée de : luzerne (27 %), pois fourrager (23 %), orge (13 %), avoine (13 %), blé (13 %), fléole des prés (5 %), vesce velue (4 %), brome des prés (< 2 %), trèfle rouge (< 2%) et chicorée (< 1%).

En 2022, les deux dispositifs ont été implantés à la Ferme Madrice Enr., située à Saint-Germain. Le champ en question (47.586896°, -69.766792°) est une prairie en production de 2^e année, « Saint-Germain1 ». Il s'agit du même champ que celui de 2021 et les parcelles sont exactement aux mêmes endroits. Le géoréférencement des parcelles s'est fait au moyen d'un GPS de précision (Arrow 100, Eos positioning Systems). Le deuxième site, « Saint-Germain2 », implanté à la ferme (47.573909°, -69.781592°) était une prairie en production de 3^e année (semis 2020).

Finalement, en 2023, les mêmes dispositifs ont été poursuivis à la Ferme Madrice Enr. Les dispositifs étaient donc des champs de 3^e et de 4^e année. La même dénomination a été poursuivie puisque les parcelles ont été réinstallées exactement au même endroit dans les champs : « Saint-Germain1 », « Saint-Germain2 ».

Pour chacune des années, 4 dispositifs ont toujours été implantés :1-Maïs-grain, 2-Soya, 3-Luzerne-fléole (1) et 4-Luzerne-fléole (2) en vue de réaliser des essais qui ont permis de comparer des parcelles avec et sans possibilités d'apports en eau avec l'irrigation.

Le plan du dispositif expérimental a été le même pour l'ensemble des 4 sites, soit un plan en blocs aléatoires complets (4 ou 5 blocs, selon les années) d'une superficie d'environ 0,3 ha (200 m x 15 m) où les 2 traitements (Témoin sans irrigation et Irrigation) y ont été assignés, pour un total de 8 à 10 unités expérimentales. Les parcelles où l'irrigation était permise ont pu être irriguées avec un système d'irrigation par aspersion à ligne principale unique composé d'un gicleur (Senninger, Xcel-Wobbler, buse #12) ayant une précipitation moyenne validée de 6,9 mm/h, et ce, sur une superficie circonscrite qui débute au 2^e m de distance à partir du gicleur et qui se termine au 4^e m.

Finalement, des profils de sol ont été réalisés à chacun des sites. Les deux objectifs principaux pour la réalisation des profils de sols dans le cadre du projet étaient d'identifier des sites d'essais à potentiel irrigable et d'évaluer la variabilité spatiale des sols présents sur le site. Pour les essais de l'année 2021, les profils ont été réalisés au printemps 2022. En 2022 et 2023, les profils de sols ont été caractérisés avant l'implantation du site. Ces profils ont permis d'identifier les matériaux composant le sol de chacun des sites. La granulométrie, la couleur, la structure, la consistance et la porosité du sol ont été évaluées pour chacun des horizons identifiés. Certaines limitations au niveau de la structure du sol, qui pourraient potentiellement limiter la perméabilité, ont été recensées (une structure lamellaire, massive, une consistance ferme ou une discontinuité lithologique). La série de sols a également été définie. Les résultats détaillés de ces profils ont été rassemblés dans un rapport pédologique qui a été annexé au présent rapport.

3.1.2 Analyses statistiques

Les variables du rendement pour chaque site ont été analysées avec des modèles linéaires généralisés mixtes (GLMM). La distribution statistique appropriée pour chaque variable a ainsi pu être spécifiée. Le traitement et l'année ont été inclus comme facteur fixe. Spécifiquement pour l'année 2021 pour les sites Maïs-grain et Soya, chaque parcelle contient les deux traitements (géographiquement près l'une de l'autre) alors la parcelle est un facteur aléatoire. Ce dernier n'a toutefois pas été inclus dans le modèle parce que le plan d'échantillonnage a changé en 2022 et 2023 (chaque parcelle n'a qu'un seul traitement). Pour les sites en plantes fourragères, les sites ont été analysés séparément. Pour 2021 au site Saint-Germain1, les récoltes ont été analysées séparément puisque la composition du mélange fourrager comportait des plantes annuelles. Par la suite, 2022 et 2023 ont été analysées conjointement puisqu'il s'agit des mêmes parcelles et pour inclure un potentiel effet résiduel des irrigations. L'année aurait aussi pu être considérée comme facteur aléatoire, mais il y en a trop peu pour pouvoir estimer une variance entre les années. Les résultats sont donc applicables à ces deux années seulement; il devient impossible de déterminer si les résultats sont reproductibles dans les années à venir.

Pour tester l'effet du traitement pour l'ensemble des sites, un modèle avec et sans traitement a été comparé avec le critère d'information AIC (Akaike, 1974). Le AIC est un indice de l'information inexplicée (comme la variance résiduelle) qui est pénalisé pour la complexité du modèle. Le modèle avec le plus petit AIC est le modèle le plus parcimonieux pour bien expliquer les données. L'AICc a été utilisé, car il est plus approprié quand les tailles d'échantillons sont relativement petites. Une différence de deux ou plus ($\Delta AICc \geq 2$) entre les modèles est généralement l'indication d'une différence intéressante.

La composition d'espèces a été analysée différemment. Les mesures de la composition des espèces sont compositionnelles (des pourcentages qui totalisent 100%) et donc négativement corrélées entre elles. Les pourcentages ont été transformés en log-ratios de groupes d'espèces pour l'analyse (Hartmann et coll., 2023). Par la suite, une analyse de redondance (RDA: Redundancy Analysis) a été utilisée pour tester l'effet de l'irrigation sur la composition d'espèces. Comme il y a presque uniquement des zéros pour le pois fourrager, il n'a pas été inclus dans les analyses. Pour les quelques zéros restants (dans trèfle et mauvaises herbes), une très petite valeur (50 % de la plus petite valeur mesurée) a été ajoutée.

3.1.3 Caractérisation des propriétés physiques du sol des sites

La caractérisation du sol des 4 dispositifs expérimentaux a été effectuée pour l'horizon 0 à 30 cm. À raison d'un échantillon composite par dispositif, ces derniers ont été tamisés à 2 mm puis séchés à l'air à 21 °C. La proportion de particules de sol dont le diamètre est supérieur à 2 mm a été mesurée. La granulométrie a été déterminée par la méthode de l'hydromètre en six points, suivie d'un tamisage des sables (Gee et Bauder, 1986). La texture du sol a donc été déterminée avec les analyses granulométriques effectuées en laboratoire et du diagramme triangulaire des classes de texture de sols (AAC, 2002). 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.

3.1.4 Suivis hydriques

3.1.4.1 Conditions météorologiques et évapotranspiration potentielle (ET_p)

La pluviométrie de chacun des sites satellites a été suivie grâce à un pluviomètre (TR-525M, Texas Electronics) connecté au même acquiiseur de données que les sondes TDR. À des fins de comparaison, les réseaux de stations d'Agrométéo Québec, ainsi que celui d'Environnement et ressources naturelles Canada ont été utilisés. La pluviométrie et l'évapotranspiration potentielle sont les données qui ont été comparées. Le choix de la station météo pour les sites suivis s'est fait en prenant en compte la distance et l'élévation entre le site et la station météorologique. Le choix des stations météorologiques, selon la distance et l'élévation entre les stations et les sites suivis, est présenté au (Tableau 1). Les normales climatiques utilisées sont celles de 1981-2010. Pour l'évapotranspiration potentielle, la moyenne mensuelle de la station météorologique d'Agrométéo Québec a été calculée pour la période entre 2011 et 2023. Finalement, le traitement de ces valeurs s'est aussi effectué de manière cumulative entre le 1^{er} mai et le 31 octobre pour chacun des sites. Le cumulatif a débuté à la date du semis (lorsque connu) ou automatiquement à partir du 1^{er} mai et le cumulatif a été poursuivi jusqu'à un événement de fauche. Le cumulatif recommence à zéro après une fauche pour les cultures fourragères et ainsi de suite, jusqu'au 31 octobre. Dans le cas des cultures annuelles (maïs-grain et soja), le cumulatif a débuté au moment du semis et s'est terminé à la récolte.

Tableau 1. Localisation et caractérisation (élévation (m) et distance (km)) des stations météorologiques retenues à des fins comparatives, selon le site et l'année.

Année	Site	Élévation (m)	Réseau Agrométéo Québec	Élévation (m)	Distance par rapport au site (km)	Réseau Environnement et ressources naturelles Canada	Élévation (m)	Distance par rapport au site (km)
2021	Saint-Germain1	119	Kamouraska	20	6,17	Saint-Bruno-de-Kamouraska	198	15,26
	Saint-Pascal	41	Kamouraska	20	4,82	Saint-Bruno-de-Kamouraska	198	8,01
	Maïs-grain	53	Deschambault SM	22	17,75	Donnacona	46	5,47
	Soya	50	Deschambault SM	22	17,43	Donnacona	46	5,12
2022	Saint-Germain1	119	Kamouraska	20	6,17	Saint-Bruno-de-Kamouraska	198	15,26
	Saint-Germain2	83	Kamouraska	20	4,51	Saint-Bruno-de-Kamouraska	198	13,78
	Maïs-grain	81	Deschambault SM	22	22,22	Donnacona	46	10,20
	Soya	77	Deschambault SM	22	24,11	Donnacona	46	11,63
2023	Saint-Germain1	119	Kamouraska	20	6,17	Saint-Bruno-de-Kamouraska	198	15,26
	Saint-Germain2	83	Kamouraska	20	4,51	Saint-Bruno-de-Kamouraska	198	13,78
	Maïs-grain	78	Deschambault SM	22	22,05	Donnacona	46	9,96
	Soya	78	Deschambault SM	22	21,99	Donnacona	46	9,90

3.1.4.2 Suivi du statut hydrique du sol, évapotranspiration de la culture (ET_c) et coefficients culturaux (K_c)

Des sondes TDR (Campbell Scientific, CS625 et CS650) ont été en opération de l'émergence de la culture, jusqu'à la récolte (ou la dernière coupe) pour mesurer l'évolution de la teneur en eau volumique du sol en continu (un suivi par traitement, 2 unités expérimentales par site). Elles ont été connectées à des acqui-seurs de données (Campbell Scientific, CR300). Ces sondes ont une portée de mesure de 30 cm et elles ont été insérées de manière verticale (30 cm) ou diagonale (< 30 cm) dans le sol afin de mesurer le statut hydrique dans le profil de sol colonisé par les racines, sur la profondeur voulue. La ou les zone(s) de sol suivie(s) a (ont) été de :

- 1) Maïs-grain (2021 à 2023) : 0-30 et 30-60 cm;
- 2) Soya (2021) : 0-30 cm;
- 3) Soya (2022-2023) : 0-30 cm et 30-60 cm;
- 4) Saint-Germain1 (2021) : 0-20, 0-30, 30-60 cm;
- 5) Saint-Pascal (2021) : 0-30, 30-60, 60-90 cm;
- 6) Saint-Germain1 (2022) : 0-30, 30-55 (I), 20-45 (NI), 50-75 cm;
- 7) Saint-Germain2 (2022) : 0-30, 20-45 (I), 15-35 (NI), 40-65 (I), 35-60 (NI) cm;
- 8) Saint-Germain1 (2023) : 0-30, 30-55 (I), 20-45 (NI), 50-75 cm;
- 9) Saint-Germain2 (2022) : 0-30, 20-45 (I), 15-35 (NI), 40-65 (I), 35-60 (NI) cm.

Ces sondes ont été installées à proximité de la zone identifiée pour la récolte (selon la zone où l'uniformité d'application en eau a été mesurée). Ces TDR ont permis d'évaluer l'évapotranspiration de la culture (ET_{c-TDR}) et d'estimer des coefficients culturaux (K_c). La variation quotidienne de la teneur en eau volumique du sol mesurée par chaque TDR installée dans une zone de prélèvement active a été rapportée en mm d'eau. La valeur obtenue a été utilisée pour évaluer « l' ET_{c-TDR} ». Pour y parvenir, la valeur mesurée à la fin du prélèvement quotidien (20 h 00) a été soustraite de la valeur mesurée au début du prélèvement quotidien (8 h 00), et ce, pour chacune des TDR. Les valeurs issues de journées avec apports en eau (précipitation/irrigation) et celles au lendemain de celles-ci ont été éliminées. Par la suite, les prélèvements (ET_{c-TDR}) ont été mis en relation avec l'évapotranspiration potentielle (ET_p) quotidienne pour déterminer un K_c tel que décrit par Allen et coll. (1998). Les valeurs d' ET_p ont été récupérées de la station météorologique d'Agrométéo Québec de Kamouraska et de Deschambault, respectivement pour les sites au Bas-Saint-Laurent et de la Capitale-Nationale. Sans nécessairement être identique, la variation quotidienne de ces deux valeurs (ET_{c-TDR} et ET_p) devrait suivre la même tendance. Une augmentation de l' ET_p qui ne se répercute pas sur une augmentation du prélèvement de la culture, indique fort probablement que la culture subit une contrainte à prélever l'eau, donc un stress. Cela a permis d'estimer la réserve en eau du sol facilement utilisable par la culture (RFU). Cette réserve est « bornée » d'une part par la hauteur d'eau à la capacité au champ (valeur maximale) et celle où une contrainte de prélèvement en eau a été observée (valeur minimale). La différence entre les deux points de références est ensuite rapportée en mm d'eau par mm de sol colonisé par les racines. Il devient alors possible d'identifier le nombre de jours avec ou sans stress hydrique. Par ailleurs, le suivi réalisé dans les différentes zones (profondeurs) de sol a également permis d'évaluer l'évolution de l'enracinement pour les cultures annuelles et les cultures pérennes en implantation, selon une approche basée sur l'absence ou la présence de diminution de la teneur en eau volumique. L'enracinement de la culture a aussi fait l'objet d'observations visuelles ponctuelles.

3.1.4.3 Consigne et régie d'irrigation

Plus d'un critère a été utilisé pour le déclenchement d'une irrigation. Le 1^{er} critère a été l'atteinte du « Point tournant (PT) » ou le statut hydrique du sol au moment où une contrainte de prélèvement en eau commence à être observée. La consigne à proprement dite a été déterminée avec cette approche (Boivin et coll., 2018). Ce point est spécifique à chaque système cultural et a été déterminé pour chacun des dispositifs. La durée d'un épisode d'irrigation a été déterminée selon la hauteur d'eau qui doit être appliquée pour réapprovisionner la RFU en présence, sans excéder 25 mm. La probabilité qu'un épisode de pluie survienne, alors que la culture n'a prélevé qu'une proportion de l'apport provenant de l'irrigation est réelle. Dans cette logique, plus l'apport est important, plus le risque de diminuer l'efficacité de l'irrigation est élevé. Un tensiomètre (Irrometer, RSUV) a aussi été installé à proximité des sondes TDR et a permis de faciliter l'identification du PT. Ce tensiomètre était connecté au même acquiesseur de données que celui des sondes TDR, tout comme le pluviomètre (Texas Electronics, TR-5251).

Les critères suivants s'ajoutent au 1^{er} critère pour les sites en soya et en maïs-grain et impliquent les règles suivantes. D'abord, l'irrigation était possible durant la période reconnue pour les prélèvements en eau les plus élevés. Pour le soya, il s'agit de la période entre la floraison et la fin du remplissage des gousses. Pour le maïs, il s'agit d'une période qui débute une semaine avant l'apparition des soies et qui se termine deux semaines après l'apparition de la croix. Hors de ces périodes, une irrigation pourra être déclenchée si une situation de contrainte au prélèvement subsiste plus de 4 jours consécutifs.

Pour la luzerne-fléole (2^e année et suivantes), les critères suivants s'ajoutent. L'irrigation était déclenchée 48 h après l'atteinte du PT, dans la mesure où la situation de contrainte de prélèvement en eau perdure. Cette approche s'appuie entre autres sur la profondeur du système racinaire de cette culture qui lui permet d'accéder à davantage d'eau, alors que la sonde sur laquelle s'appuie la décision d'irriguer n'atteint pas cette zone.

3.1.4.4 Développement racinaire

Le développement racinaire a été suivi avec les mêmes sondes installées pour suivre l'évolution du statut hydrique du sol. Ces sondes ont été installées à la verticale ou à l'oblique pour mesurer une moyenne sur un profil donné. Ces profils ont été décrits à la section Suivi du statut hydrique du sol. En plus de cette instrumentation, d'autres sondes TDR (Campbell Scientific, CS650) ont spécifiquement été installées pour préciser le développement racinaire pour le maïs-grain et le soya en 2022 et 2023. Ces sondes ont été installées de manière horizontale pour restreindre le rayon d'influence de la sonde en hauteur. La portée d'une sonde permet de mesurer la teneur en eau verticalement à raison de 15 cm par sonde. Par exemple, une sonde installée à une profondeur de 15 cm, permet une lecture verticale entre 7,5 et 22,5 cm. Un site de mesure compte quatre sondes et elles sont disposées de la manière suivante:

- Maïs-grain :
 - 2022 (7,5-22,5 cm, 17,5-32,5 cm, 27,5-42,5 cm et 37,5-52,5 cm)
 - 2023 (17,5-32,5 cm, 32,5-47,5 cm, 47,5-62,5 cm et 62,5-77,5 cm)
- Soya :
 - 2022 (7,5-22,5 cm, 17,5-32,5 cm, 27,5-42,5 cm et 37,5-52,5 cm)
 - 2023 (2,5-17,5, 17,5-32,5 cm, 32,5-47,5 cm et 47,5-62,5 cm)

3.1.4.5 Hauteur d'eau provenant des précipitations potentiellement valorisables par la culture (HEPPVC)

Enfin, la hauteur d'eau provenant des précipitations potentiellement valorisables par la culture (HEPPVC) a été déterminée avec une approche basée sur le bilan hydrique (Boivin et coll., 2018). Pour ce faire, la RFU du sol a été estimée à l'aide de l'identification du point tournant et du suivi du développement racinaire effectué par les sondes TDR. Le k_c utilisé pour calculer l' ET_p a également été celui qui a été estimé par le suivi des TDR. L' ET_p et les précipitations utilisées selon la méthodologie de la section 3.1.4.1. La hauteur d'eau pour chaque irrigation (s'il y a lieu) a été utilisée dans le calcul. Le bilan hydrique a été effectué selon ces paramètres du 1^{er} mai au 31 octobre pour les sites de Saint-Germain1, les sites en soya et maïs-grain de 2021 à 2023. Le départ au 1^{er} mai s'est effectué à la capacité au champ. Finalement, l'HEPPVC a été calculée de manière cumulative en fonction du statut hydrique du sol selon le bilan hydrique et la pluviométrie quotidienne.

3.1.5 Suivis physiologiques

3.1.5.1 Cultures fourragères pérennes

La biomasse des parties aériennes des cultures fourragères a été récoltée peu de temps avant les coupes prévues par le producteur. En 2021, les coupes ont eu lieu le 5 juillet et le 16 août pour le dispositif Saint-Germain1, tandis qu'elles ont eu lieu le 14 juin et le 26 juillet pour celui de Saint-Pascal. En 2022, ces récoltes ont eu lieu le 17 juin, le 27 juillet et le 8 septembre pour le dispositif de Saint-Germain1, tandis qu'elles ont eu lieu le 17 juin et le 4 août pour celui de Saint-Germain2. Pour 2023, les récoltes ont eu lieu le 14 juin, le 25 juillet et le 12 septembre pour le dispositif de Saint-Germain1, tandis qu'elles ont eu lieu le 14 juin, le 25 juillet et le 12 septembre pour celui de Saint-Germain2. Le rendement d'une parcelle (unité expérimentale) correspond à tout le matériel végétal (parties aériennes) présent dans 2 quadrats de 1 m², où la hauteur de la coupe manuelle, par rapport au sol, a été la même que celle de la récolte mécanique (producteur). La biomasse a été déshydratée pendant 48 h à 105 °C. Le poids en matière sèche des échantillons a été mesuré avec une balance électronique (Shimadzu, TXB2201L).

3.1.5.2 Soya

En 2021, la récolte a eu lieu le 21 septembre. Pour ce faire, 4 rangs adjacents de 3 m de longueur ont été récoltés, pour une superficie d'environ 4,6 m² ou environ 140 plants. En 2022, la récolte a eu lieu le 19 octobre. Pour ce faire, 4 rangs adjacents de 3 m de longueur ont été récoltés, pour une superficie d'environ 9,1 m² ou une moyenne de 308 plants. En 2023, la récolte a eu lieu le 2 octobre. Pour ce faire, 4 rangs adjacents de 3 m de longueur ont été récoltés, pour une superficie d'environ 9,1 m² ou une moyenne de 334 plants.

Au moment de la récolte, un sous-échantillon de chaque parcelle, constitué de 10 plants, a été récolté pour déterminer la teneur d'humidité des grains à la récolte (2022-2023). L'ensemble de la récolte a ensuite été conservée et séchée à l'air pour diminuer le taux d'humidité dans le but de faciliter le battage. La biomasse et les gousses ont ensuite été séparées mécaniquement à l'aide d'une moissonneuse-batteuse stationnaire qui est adaptée au contexte. Par la suite, les grains ont été déshydratés à 50 °C (2021) ou 35 °C (2022, 2023) jusqu'à la stabilisation du poids. Le poids en matière sèche des échantillons a été mesuré à l'aide d'une balance électronique (Shimadzu, TXB2201L). Un sous-échantillon de grain a ensuite été séché à 105 °C pour déterminer son poids en matière sèche. Le rendement stabilisé à 14 % d'humidité a ensuite pu être calculé pour chaque année.

3.1.5.3 Maïs

La récolte a eu lieu le 13, 27 et 31 octobre, respectivement en 2021, 2022 et 2023. La récolte a été réalisée manuellement sur l'ensemble des plants compris sur 3 rangs adjacents de 3 m linéaires ou de 2 rangs de 4,5 m, pour une longueur linéaire combinée de 9 m. La superficie de la récolte couvrait environ 6,9 m², soit 54, 56 et 49 plants en moyenne, respectivement pour 2021, 2022 et 2023. Les épis ont été cassés manuellement des plants. Les épis, ainsi que la biomasse aérienne, ont été pesés humide à l'aide d'un dynamomètre électronique (en 2021) (Salter Brecknell, Electro10) ou d'une balance électronique (2022-2023) (Adam, CPWplus). Au moment de la récolte, un sous-échantillon de chaque parcelle, constitué de 5 plants, a été récolté pour déterminer la teneur d'humidité des grains à la récolte (2022-2023). Les épis ont ensuite été conservés et séchés à l'air pour en diminuer le taux d'humidité afin de faciliter l'égrenage. L'égrenage a ensuite été fait mécaniquement. Le poids des grains et de la biomasse a été mesuré. Les grains ont été séchés à 50 °C (2021) ou à 35 °C (2022-2023) jusqu'à la stabilisation du poids tandis que le reste de la biomasse (feuilles et cotons) a été séché à 105 °C pour en déterminer le poids en matière sèche à l'aide d'une balance électronique (Shimadzu, TXB2201L). Un sous-échantillon de grain a ensuite été séché à 105 °C pour déterminer son poids en matière sèche. Le rendement stabilisé à 14 % d'humidité a ensuite pu être calculé.

3.1.5.4 Poids spécifique

Le poids spécifique des grains (maïs et soya) a été mesuré en effectuant la procédure de la Commission canadienne des grains (CCG, 2019). Un échantillon préalablement stabilisé a été prélevé du volume de grains total pour chacune des parcelles. Ce volume de grains a ensuite été « nettoyé » de sorte à enlever tous résidus de battage (gousses, tiges, etc.). Dans une tasse cylindrique d'un demi-litre, les grains ont été versés jusqu'à ce qu'ils débordent. Ce volume a ensuite été transvidé dans un entonnoir Cox, fermé par une plaque à son ouverture du bas. Une petite poignée de grains a été ajoutée. L'entonnoir et son contenu ont été déposés, centrés sur la tasse cylindrique vide. Rapidement, la plaque a été retirée, de sorte que le contenu du cône se déverse uniformément dans la tasse au volume connu. Délicatement et en évitant tout secouage, le cône a été retiré de la tasse. Le surplus de grains a été enlevé en déposant une baguette de bois sur le bord de la tasse et en effectuant trois mouvements en zigzag avec ce dernier. Les grains restants dans la tasse ont été pesés à l'aide d'une balance électronique (Shimadzu, TXB2201L). Ainsi, l'information de poids par volume est mesurée et peut être convertie en kg/hectolitre grâce aux tableaux de conversion.

3.1.5.5 Mauvaises herbes

Les mauvaises herbes ont fait l'objet d'un suivi dans les dispositifs en culture fourragère. Lors de la récolte, les mauvaises herbes ont été séparées manuellement. Par la suite, les échantillons ont été séchés à 105 °C durant plus de 48 h, soit le temps nécessaire à ce que 2 pesées étalées dans le temps aient la même valeur de poids, pour en déterminer le poids en matière sèche à l'aide d'une balance électronique (Shimadzu, TXB2201L). Pour les cultures du soya et du maïs, un suivi visuel des parcelles a été effectué régulièrement pour déceler la présence de mauvaises herbes.

3.2 Objectif 1b. Estimer, à partir de simulations, les gains de rendement associés à l'irrigation en climat futur

Cet objectif fait l'objet d'un rapport qui est inséré en annexe, à la section 11.2 « (Objectif 1b). Simulation des impacts des changements climatiques sur les besoins en eau d'irrigation du maïs, du soya et des plantes fourragères avec le modèle STICS. »

3.3 Objectif 2. Évaluer les coûts de l'irrigation et ses effets sur la rentabilité de la méthode d'irrigation choisie.

Cet objectif fait l'objet d'un rapport qui est inséré en annexe, à la section 11.3 « (Objectif 2). Analyse économique. »

3.4 Objectif 3. Évaluer les besoins en eau de cette pratique sur les ressources hydriques en période d'étiage et son effet cumulatif sur les autres utilisateurs du territoire visé

3.4.1 Délimitation du territoire pour l'étude

Une étape importante consiste à définir les critères taxonomiques permettant d'identifier les séries de sols à potentiel irrigable. Cet exercice a permis de créer une carte présentant les sols à potentiel irrigable en territoire agricole.

Pour ce faire, la cartographie de la zone agricole du Québec (CPTAQ, 2023) a été récupérée sur Données Québec. Afin de circonscrire un territoire où l'information pédologique est disponible, la couverture pédologique du Québec (Gombault et coll., 2022) y a été superposée. Globalement, les différentes études pédologiques cartographient 86% de la zone agricole, pour un total de 34 339 polygones couvrant un peu plus de 16 000 km² principalement de part et d'autre du fleuve Saint-Laurent.

Pour déterminer le potentiel irrigable d'un sol, différents critères ont été fixés conjointement par les équipes Pédologie et Régie de l'eau de l'IRDA :

1. Les sols organiques ont été écartés, pour ne garder que les sols de type minéral;
2. Les sols à drainage dits *modéré, bien, rapide et très rapide* ont été considérés comme irrigables;
3. La granulométrie du matériau supérieur s'est limitée aux sols décrits comme loameux-grossier, sableux, squelettique-argileux, squelettique-loameux, squelettique-sableux et fragmentaire;
4. Finalement, les sous-groupes brunisoliques glyifiés et luvisoliques ont été écartés.

La base de données des propriétés pédologiques du sol dominant (Gombault et coll., 2022) de l'IRDA a été utilisée pour faire le tri selon les critères établis.

3.4.2 Détermination des ressources hydriques disponibles en période d'étiage

L'approche d'estimation de la disponibilité en eau a été développée dans le cadre du développement de l'outil EstimEAU (<https://estimeau.ca/>). Dans le cadre de ce projet, il a été question de développer une méthode pour estimer l'eau disponible, en surface dans les cours d'eau et en souterrain dans les aquifères (volet 2, Ricard et coll., 2024), et de la mettre en relation, sous la forme d'un outil web, avec les besoins en eau des différents usages et usagers (irrigation, abreuvement des animaux, main-d'œuvre hébergée, ...) de l'entreprise agricole québécoise (volet 1, Boivin et coll., 2024). Le livrable du volet 2 est une cartographie numérique permettant de localiser spatialement en tout point du territoire de l'étude une valeur estimée de disponibilité pour l'eau de surface et l'eau souterraine. Il est important de rappeler que dans le cadre du projet EstimEau, la disponibilité en eau (surface et souterraine) est estimée à partir d'approches de modélisation régionale et qu'il est nécessaire d'en comprendre les limitations pour en faire un usage adéquat. La donnée source utilisée pour produire l'information présentée dans cette section est donc de nature générale et n'a fait l'objet que de validations partielles et non d'une vérification exhaustive. L'estimation de la disponibilité en eau ne tient finalement pas compte des changements du régime hydrique projetés en contexte de changements climatiques.

3.4.2.1 Eau de surface

Pour les bassins versants de superficie supérieure à 50 km², la disponibilité en eau de surface a été évaluée à partir de la reconstitution historique des séries de débits (1990 à 2020) produite par la version 2022 de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional (MELCCFP, 2022). L'Atlas contient près de 10 000 tronçons modélisés couvrant un territoire de 726 000 km². Chaque tronçon modélisé est associé à un ensemble d'unités spatiales de calcul (unités hydrologiques relativement homogènes, UHRH) en amont. Pour les bassins versants de superficie inférieure à 50 km² (l'Atlas ne fournit pas les séries simulées à cette échelle), la disponibilité en eau de surface a été évaluée à partir d'une méthode de post-traitement statistique valorisant les suivis hydrométriques menés par l'IRDA depuis 1998 sur des petits bassins versants agricoles (Ricard et coll., 2024). Le processus de validation permet de constater que les séries hydrologiques estimées offrent une représentation généralement adéquate des fluctuations saisonnières de débit. Le processus de validation a également permis d'identifier une limite de la démarche quant à sa capacité à se généraliser sur un très grand territoire et demeure vraisemblablement perfectible.

Dans le cadre du projet EstimEau, la disponibilité est évaluée sur la base du critère de 15 % du débit d'étiage sur 7 jours consécutifs de récurrence 2 ans ($Q_{2,7}$ débit maximum qu'il est permis de prélever selon MELCCFP, 2019), compilé pour chaque mois de l'année. Cette valeur est en lien avec le règlement ayant trait au prélèvement des eaux et leur protection du MELCCFP. Les étapes de traitement décrites ci-dessous permettent d'estimer la disponibilité en eau pour la saison de culture (ici posée de mai à septembre) sur une base annuelle et pour le territoire à l'étude tel que défini à la section 3.4.1:

ÉTAPE 1 - Pour chaque unité hydrologique relativement homogène (UHRH), calculer les valeurs mensuelles de $Q_{2,7}$ à partir de la série hydrologique estimée au tronçon de rivière numérisé qui lui correspond. Cette étape a été réalisée dans le cadre du projet EstimEau.

ÉTAPE 2 - Découper la carte des sols irrigables avec la carte des UHRH. Ce découpage permet d'obtenir une nouvelle division spatiale du territoire à l'étude, les unités irrigables relativement homogènes (UIRH). Ces unités spatiales correspondent aux portions des sols irrigables affectées d'une disponibilité en eau de surface homogène.

ÉTAPE 3 - Écarter les UIRH inférieures à 1 hectare. Le découpage spatial produit des artefacts lorsque la surface d'intersection des UHRH avec les polygones des sols irrigables est très petite, causant une surestimation de la disponibilité en eau de surface puisque rapportée sur une très petite superficie (irrigable). Environ 2000 UIRH ont été écartés.

ÉTAPE 4 - Déterminer la valeur de débit d'étiage minimum ($Q_{2,7 \text{ min}}$ en m³/s), parmi les mois de mai à septembre. Cette valeur est considérée comme une approximation du $Q_{2,7}$ évalué sur une base annuelle.

$$Q_{2,7 \text{ min}} = \min (Q_{2,7 \text{ mai}}; Q_{2,7 \text{ juin}}; Q_{2,7 \text{ juillet}}; Q_{2,7 \text{ août}}; Q_{2,7 \text{ septembre}}) \quad (1)$$

ÉTAPE 5 – Normaliser la disponibilité en eau de surface par la superficie de chaque UIRH (SUP_{UIRH}) et appliquer le critère de 15 % de disponibilité de l'eau de surface (D_{UIRH}). Cette estimation de la disponibilité, exprimée en mm/a, est valide pour la période estivale (5 mois, de mai à septembre).

$$D_{UIRH} = 15 \% \times \left(\frac{Q_{2,7 \text{ min}}}{SUP_{UIRH}} \right) \times F \quad (2)$$

Où F (=5 mois x 1an/12 mois) est un facteur pour considérer la période de l'année où l'eau de surface est exploitée : de mai à septembre.

3.4.2.2 Eau souterraine

La ressource en eau souterraine (recharge de l'aquifère rocheux) a été évaluée à partir des données récoltées dans le cadre de différents projets régionaux :

- 18 études des Projets d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES) complétées entre 2013 et 2022;
- 2 projets pilotes (pré-PACES) réalisés dans Portneuf (1998) et Chateauguay (2006);
- 2 projets spécifiques réalisés dans Laval-Laurentides (2018) et à Mercier-Saint-Rémi (2023).

En raison de la grande variabilité des approches utilisées dans tous les projets, la mise en commun des grilles a nécessité une étape d'harmonisation. Cette démarche utilisait la carte du Quaternaire en attribuant pour chaque unité de dépôts de surface une valeur de recharge médiane basée sur les données de recharge spatialisées pour tous les projets régionaux. Au total, la grille de recharge se traduit en 184 181 mailles de 1 km² pour le Québec agricole. Tous les détails de l'approche (méthodologie et résultats) sont présentés dans le rapport du projet EstimEAU (Ricard et coll., 2024). L'intersection spatiale de la grille de recharge moyenne de l'aquifère (mm/an) avec la carte des UIRH permet de sommer les disponibilités de surface et souterraine et produire la carte de la disponibilité totale. Pour définir la disponibilité, un critère de 20% de la recharge pour le maintien durable de la ressource est appliqué (seuil d'alerte fixé par Huchet et coll., 2021).

4 RÉSULTATS SIGNIFICATIFS OBTENUS

4.1 Objectif 1a. Estimer, à partir d'essais au champ, les gains de rendement associés à l'irrigation en climat actuel.

4.1.1 Caractérisation du sol des sites

Les résultats de la caractérisation du sol sont présentés au Tableau 2 selon les sites et les années. Ces derniers présentent des textures contrastées. Pour le site Maïs-grain, la texture a été un loam limoneux en 2021, un loam sableux en 2022 et un sable loameux en 2023. Pour le site soya, les sols ont présenté des textures différentes avec un sable loameux à loam en 2021, un sable loameux en 2022 et finalement un sable en 2023. En productions fourragères, le site de Saint-Pascal en 2021 a été une argile tandis que les autres sites (Saint-Germain1 et Saint-Germain2) ont été des loam argileux graveleux, avec des valeurs de détritius (particule de sol au diamètre supérieur à 2 mm) se situant entre 26,4 et 41,0 %. Les sites ont présenté des taux de matière organique entre 2,7 et 6,1 %. La masse volumique apparente a atteint des valeurs comprises entre 1,34 et 1,60 g/cm³.

Tableau 2. Caractérisation physico-chimique du sol présenté selon le site, saison 2021 à 2023.

Année	Site	Texture	Série de sol	Détritius	M.O.	MVA	RFU
				(%)		(g/cm ³)	(mm/cm)
2021	Maïs-grain	Loam limoneux	Chaloupe	0,4	2,7	1,50	0,8
	Soya	Sable loameux à loam	Achigan	0,9	2,7	1,60	0,6
	Saint-Germain1	Loam argileux	Saint-Nicolas	26,4	4,1	1,45	0,5
	Saint-Pascal	Argile	-	5,5	4,4	1,50	n.d.
2022	Maïs-grain	Loam sableux	Chicot	1,1	5,2	1,49	0,7
	Soya	Sable loameux	Saint-Thomas	0,4	3,0	1,34	0,5
	Saint-Germain2	Loam argileux	Saint-Nicolas	41,0	6,1	n.d.	0,4
2023	Maïs-grain	Sable loameux	Morin	1,6	3,5	n.d.	1,0
	Soya	Sable	Morin	1,1	3,3	n.d.	1,0

Note : Pour éviter la surcharge du tableau, les analyses des sites qui ont été suivis sur plusieurs années figurent à la première année seulement.

4.1.2 Suivis hydriques

4.1.2.1 Pluviométrie mensuelle par site

La pluviométrie cumulative mensuelle par site et les normales climatiques sont présentées au Tableau 3. Le cumulatif entre mai et octobre a été assez différent d'une année à l'autre. La saison 2021 a été la plus sèche, suivie de 2022 et de 2023. Pour l'ensemble des sites et des années, ce cumulatif a été inférieur aux normales climatiques enregistrées par Environnement et ressources naturelles Canada.

En 2021, la pluviométrie aux sites Saint-Germain1 et Saint-Pascal a été plus faible que les normales climatiques pour chaque mois individuellement, à la seule exception de septembre où la pluviométrie a été plus importante qu'à l'habitude. Le mois d'août a particulièrement été sec avec une pluviométrie de 17 ou 13 mm soit une diminution minimale de 70 mm par rapport à la normale climatique. La situation a été similaire aux sites Maïs-Grain et Soya avec une pluviométrie cumulative plus faible qu'à la normale (574 mm contre une normale de 681 mm). Le mois de juin a été plus humide qu'à la normale avec 145 mm comparativement à 117 mm. Le mois d'août a été, lui aussi, le théâtre de très faibles précipitations avec 21 mm, soit une diminution de 85 mm.

En 2022, la saison a été globalement plus humide que la saison précédente. Les précipitations enregistrées aux sites Saint-Germain1 et Saint-Germain2 ont été inférieures aux normales, plus particulièrement pour les mois d'août et septembre avec un manque à gagner respectif de 38 et 55 mm. Pour le site Maïs-grain et Soya, les précipitations entre mai et octobre ont totalisé 668 mm soit assez près de la normale qui s'élève à 681 mm. Mensuellement, il y a eu des fluctuations plus ou moins importantes par rapport aux normales climatiques. Le mois d'août, avec 177 mm a été le plus humide, tandis qu'octobre (68 mm) a été le plus sec par rapport aux normales climatiques.

Finalement, le cumulatif entre mai et octobre en 2023 a été près des normales climatiques. La situation peut se découper en trois temps. Un déficit de précipitations a été enregistré au printemps, suivi d'un excès durant l'été et pour terminer, un déficit à l'automne. Les mois de juillet et août cumulés ont particulièrement été humides aux sites Maïs-grain et Soya avec un cumulatif de 402 mm (normales climatiques à 235 mm) et aux sites Saint-Germain1 et Saint-Germain2 avec 272 mm (normales climatiques à 199 mm).

Tableau 3. Pluviométrie cumulative mensuelle (mm) (mai à octobre) et normales climatiques de la pluviométrie mensuelle (mm) pour les stations les plus près, selon les sites et l'année.

Année	Site	Précipitations cumulées (mm)													
		Valeurs mesurées au site							Normales climatiques 1981-2010 ¹						
		Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Total mai-oct	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Total mai-oct
2021	Saint-Germain1	54*	86	60*	17*	125	82*	425	98	97	107	92	87	88	569
	Saint-Pascal	53*	86*	79*	13*	123*	82*	436	98	97	107	92	87	88	569
	Maïs-grain ²	95*	145	107	21	103*	104*	574	107	117	129	106	113	109	681
	Soya ²	95*	145	107	21	103*	104*	574	107	117	129	106	113	109	681
2022	Saint-Germain1	81*	117*	99	54*	32*	99*	482	98	97	107	92	87	88	569
	Saint-Germain2	81*	117*	99*	54*	32*	99*	482	98	97	107	92	87	88	569
	Maïs-grain ²	112*	109	104	177	97*	68*	668	107	117	129	106	113	109	681
	Soya ²	112*	109	104	177	97	68*	668	107	117	129	106	113	109	681
2023	Saint-Germain1	26*	84*	91*	181*	60*	71*	513	98	97	107	92	87	88	569
	Saint-Germain2	26*	84*	91*	181*	60*	71*	513	98	97	107	92	87	88	569
	Maïs-grain ²	62*	82*	239	163	55	75*	677	107	117	129	106	113	109	681
	Soya ²	62*	82*	239	163	55	75*	677	107	117	129	106	113	109	681

¹ Réseau Environnement et ressources naturelles Canada.

² Moyennes mensuelles de précipitations pour 1981-2001.

* Données complétées avec la station météo la plus proche.

4.1.2.2 Évapotranspiration potentielle mensuelle par site

L'évapotranspiration potentielle cumulative mensuelle, ainsi que la moyenne mensuelle de la station météorologique du réseau Agrométéo Québec entre 2011 et 2023 sont présentées au Tableau 4. Globalement, les cumulatifs entre mai et octobre ont été moins élevés que les moyennes mensuelles calculées. En 2021, le cumulatif a atteint 510 mm aux sites Saint-Germain1 et Saint-Germain2, soit une diminution de 48 mm. Une tendance similaire a été observée au site Maïs-grain et Soya avec un cumulatif de 541 mm, soit 31 mm sous la valeur moyenne. Pour l'ensemble des sites, le mois de juillet a été celui avec le plus grand manque à gagner par rapport à la moyenne mensuelle 2011-2023.

La saison 2022 a été marquée par des contrastes. Dans le cas des sites Saint-Germain1 et Saint-Germain2, l'évapotranspiration cumulative entre mai et octobre a atteint 598 mm, une valeur plus élevée que la moyenne (40 mm). Les sommaires mensuels de l'évapotranspiration potentielle ont été plus élevés pour mai, juin, juillet, août et septembre. En contraste, l'évapotranspiration cumulative entre mai et octobre pour les sites de Maïs-grain et Soya (527 mm) n'a pas atteint la valeur moyenne de 572 mm. Inversement, aux sites du Bas-Saint-Laurent, les sommaires mensuels de l'évapotranspiration potentielle ont été plus faibles pour mai, juin, juillet, août et septembre.

Pour terminer, les cumulatifs entre mai et octobre ont également été plus faibles pour les sites en 2023. Les cumulatifs mensuels en début de saison ont été plus près des valeurs moyennes tandis que pour le reste de la saison, ils ont plutôt été en retrait. Les cumulatifs entre mai et octobre pour les sites Saint-

Germain1 et Saint-Germain2 et Maïs-grain et Soya ont atteint respectivement 506 et 500 mm, soit un manque à gagner de 52 et 72 mm, par rapport aux valeurs moyennes.

Tableau 4. Évapotranspiration potentielle cumulative mensuelle (mm) (mai à octobre) et moyenne mensuelle 2011-2023 (mm) pour les stations les plus près, selon les sites et l'année.

Année	Site	Évapotranspiration potentielle cumulative (mm)														
		Sommaire mensuel							Moyennes mensuelles (2011-2023)							
		Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Total mai-oct	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Total mai-oct	
2021	Saint-Germain1	96	115	104	103	61	31	510	103	119	131	108	68	30	558	
	Saint-Pascal	96	115	104	103	61	31	510	103	119	131	108	68	30	558	
	Maïs-grain	108	116	116	108	62	32	541	113	122	130	103	69	36	572	
	Soya	108	116	116	108	62	32	541	113	122	130	103	69	36	572	
2022	Saint-Germain1	111	124	150	119	70	24	598	103	119	131	108	68	30	558	
	Saint-Germain2	111	124	150	119	70	24	598	103	119	131	108	68	30	558	
	Maïs-grain	107	102	123	95	63	38	527	113	122	130	103	69	36	572	
	Soya	107	102	123	95	63	38	527	113	122	130	103	69	36	572	
2023	Saint-Germain1	115	89	111	84	64	43	506	103	119	131	108	68	30	558	
	Saint-Germain2	115	89	111	84	64	43	506	103	119	131	108	68	30	558	
	Maïs-grain	128	93	104	80	62	33	500	113	122	130	103	69	36	572	
	Soya	128	93	104	80	62	33	500	113	122	130	103	69	36	572	

¹ Réseau Agrométéo Québec.

4.1.2.3 Nombre d'épisodes d'irrigation et hauteur d'eau appliquée

Le registre des irrigations pour les saisons 2021 à 2023 est présenté au Tableau 5. En 2021, seul le site Saint-Pascal n'a pas satisfait les critères pour déclencher l'irrigation. Le nombre d'irrigations a été de 5 pour le site Saint-Germain1, 6 pour Maïs-grain et 7 pour Soya. Ainsi, la quantité d'eau utilisée a été de 109, 111 et 158 mm, respectivement pour les sites de Maïs-grain, Saint-Germain1 et Soya. Pour les épisodes des 19, 20 et 21 août au site Maïs-grain et des 12 juin et 25 juillet pour le site Saint-Germain1, la durée et le volume de ces irrigations ne sont pas représentatifs de ce qui était visé. Un problème technique a engendré des irrigations prolongées. Ces pompes sont munies d'une minuterie qui peut arrêter la pompe selon une consigne de temps. Cette opération a été effectuée, mais des erreurs de programmation ont été commises. Pour ces dates, les chiffres entre parenthèses représentent le volume visé. La hauteur d'eau excédent le chiffre indiqué entre parenthèses a été perdu dans les horizons en profondeur et n'a pu être qu'en partie « utile » à la culture. La hauteur d'eau cumulative de la saison a été corrigée pour y exclure l'excédent d'eau appliquée lors de trois épisodes problématiques. La hauteur d'eau considérée pour ces épisodes a été celle qui était visée par l'apport en question et est indiquée entre parenthèses.

En 2022, le nombre d'irrigations a été de 5 pour Saint-Germain1 et de 2 pour Saint-Germain2, de 3 pour Maïs-grain et finalement de 2 pour Soya. Toujours dans le même ordre, la hauteur d'eau appliquée a été de 93,2, 62,1, 65,4 et 41,4 mm, respectivement. Pour l'épisode d'irrigation du 16 août au site Maïs-grain, la durée et le volume ne sont pas représentatifs de ce qui était visé. Un problème technique sur la minuterie de la pompe n'a pas permis l'arrêt programmé de celle-ci. Des 48,6 mm appliqués, un maximum de 36 mm a pu être retenu dans les 60 premiers cm de sol. Cette valeur a été déterminée selon la capacité de rétention en eau du sol au moment du déclenchement. La hauteur d'eau cumulative de la saison a été corrigée pour y exclure l'excédent d'eau appliquée lors de cet événement.

En 2023, une seule irrigation a eu lieu, soit le 31 mai aux sites Saint-Germain1 et Saint-Germain2. La hauteur d'eau irriguée a atteint 21,5 mm et 20,7 respectivement pour les sites de 3^e en 4^e année. Il n'y a eu aucune irrigation pour les sites Maïs-grain et Soya.

Tableau 5. Registre des irrigations avec la durée et la hauteur appliquée selon le site et l'année.

Année	Site	Épisode d'irrigation	Durée (minutes)	Hauteur d'eau moyenne (mm)
2021	Saint-Pascal	Aucune irrigation		
		12 juin	746	85,8 (15)
		8 juil.	219	25,2
	Saint-Germain1	25 juil.	681	78,3 (25)
		2 août	201	23,1
		8 août	200	23
		Total	5 épisodes¹	2047
	Maïs-grain	12 juin	229	26,3
		2 août	201	16,3
		7 août	179	14,5
		14 août	208	16,9
		19 août	1036	84,0 (20)
		20 août	1440	116,6 (0)
		21 août	245	19,9 (0)
		26 août	180	14,6
	Total	6 épisodes²	1242	108,6
	Soya	12 juin	210	24,2
		6 juil.	181	20,8
		2 août	192	22,1
7 août		169	19,4	
14 août		208	23,9	
19 août		204	23,5	
26 août		213	24,5	
Total	7 épisodes	1377	158,4	
2022	Saint-Germain1	6 juin	120	13,8
		13 juil	180	20,7
		18 juil	150	17,3
		16 août	180	20,7
		3 sept.	180	20,7
	Total	5 épisodes	810	93,2
	Saint-Germain2	18 juil	315	36,2
		16 août	225	25,9
	Total	2 épisodes	540	62,1
	Maïs-grain	1 août	181	14,7
		16 août	600	48,6 (36)
		8 sept	182	14,7
	Total	3 épisodes³	963	65,4
Soya	1 août	180	21	
	16 août	180	20,7	
Total	2 épisodes	360	41,4	
2023	Saint-Germain1	31 mai	187	21,5
	Saint-Germain2	31 mai	180	20,7
	Maïs-grain	Aucune irrigation		
	Soya	Aucune irrigation		

¹ La hauteur d'eau moyenne des épisodes du 12 juin et du 25 juillet a été ajustée en fonction de la hauteur d'eau initialement visée.

² Le cumulatif considère les épisodes du 19-20-21 août comme étant une seule irrigation et la hauteur d'eau moyenne a été ajustée en fonction de la hauteur d'eau initialement visée.

³ Le cumulatif considère la hauteur d'eau moyenne de l'épisode du 16 août comme étant la hauteur d'eau retenue dans l'horizon 0-60 cm (hauteur d'eau entre parenthèses).

4.1.2.4 Nombre de jours où une contrainte au prélèvement en eau a été observée

Dans un contexte de cultures fourragères, l'analyse des précipitations entre les coupes ou les récoltes permet d'obtenir une information importante pour caractériser la saison et la situer par rapport aux valeurs moyennes enregistrées par la station du réseau d'Agrométéo la plus près. Par la suite, la chronique de la teneur en eau volumique pour chaque traitement permet de suivre l'évolution du statut hydrique du sol et d'identifier des périodes potentielles où un stress hydrique peut être identifié. Finalement, l'analyse de l'évapotranspiration de la culture estimée par TDR en comparaison avec l'évapotranspiration potentielle et le calcul des coefficients culturaux est effectuée.

4.1.2.4.1 Site Saint-Pascal (2021)

4.1.2.4.1.1 Pluviométrie

La pluviométrie a été comptabilisée de manière cumulative entre les coupes et elle a été comparée aux valeurs minimales et maximales de la station d'Agrométéo Québec la plus près. Cet exercice a été réalisé pour chacun des sites, et ce, annuellement.

Pour le site Saint-Pascal (2021), les précipitations cumulatives entre les fauches sont présentées à la Figure 1. Le cumulatif débute au 1^{er} mai et se termine à la 1^{re} coupe, au 14 juin. Le cumulatif pour cette période a atteint 64,8 mm et se situe tout près de la valeur minimale mesurée par la station météorologique d'Agrométéo Québec. Le cumulatif indique que le début de la saison a été particulièrement sec. Au courant du mois de juin, le régime des précipitations s'est accéléré. La période comprise entre la 1^{re} et la 2^e coupe a donc été marquée par un cumulatif de 168,7 mm, qui est tout près de la valeur maximale de 174,4 mm. Finalement, une période sans précipitations s'est amorcée après la 2^e coupe, et ce n'est qu'à partir du début septembre que les précipitations ont repris. Le cumulatif de la dernière période a atteint 223,4 mm, près de la valeur minimale qui est de 167,0 mm.

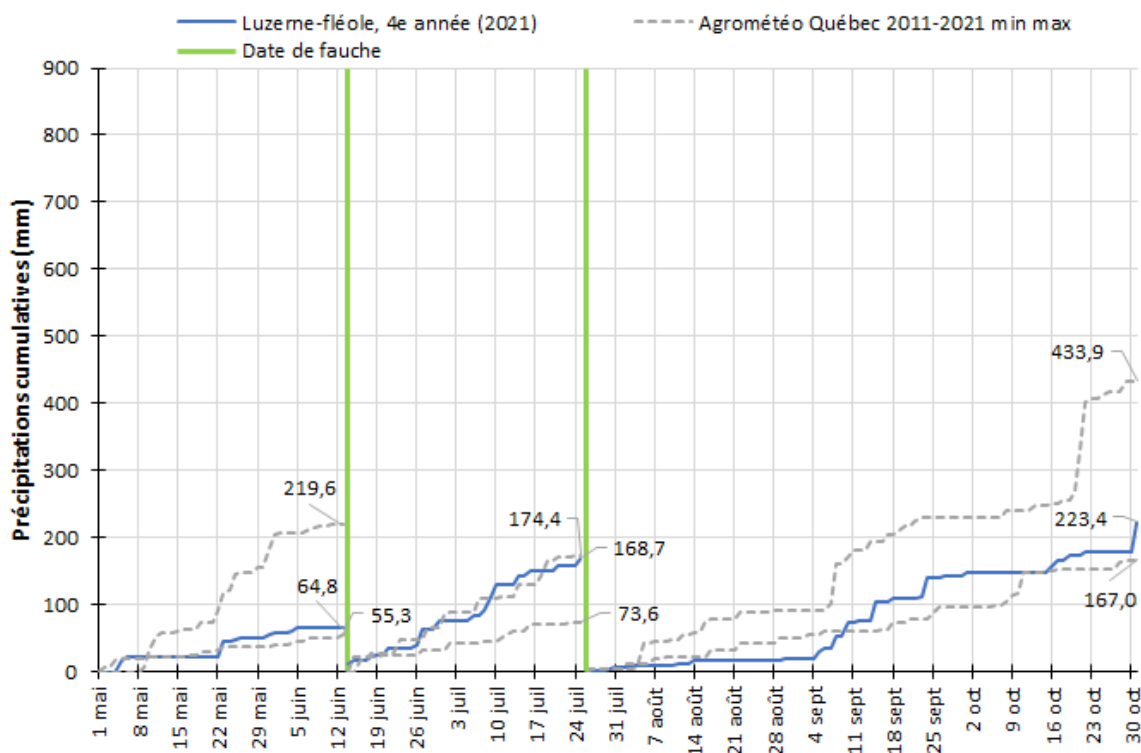


Figure 1. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2021 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Pascal, saison 2021.

4.1.2.4.1.2 Évapotranspiration potentielle (ET_p)

L'évapotranspiration potentielle et les précipitations ont été cumulées par périodes qui sont délimitées par les fauches. Les données de 2021 sont présentées à la Figure 2.

En 2021, le cumulatif de l'ET_p se situe dans la moyenne avec une valeur de 154,5 mm. Par la suite, les cumulatifs de la 2^e et 3^e période ont été les valeurs minimales enregistrées pour la période 2011 à 2021, soit avec respectivement 134,7 et 216,3 mm. Les cumulatifs maximaux enregistrés pour ces périodes ont été de 204,1 et 270,9 mm pour la 2^e et 3^e période.

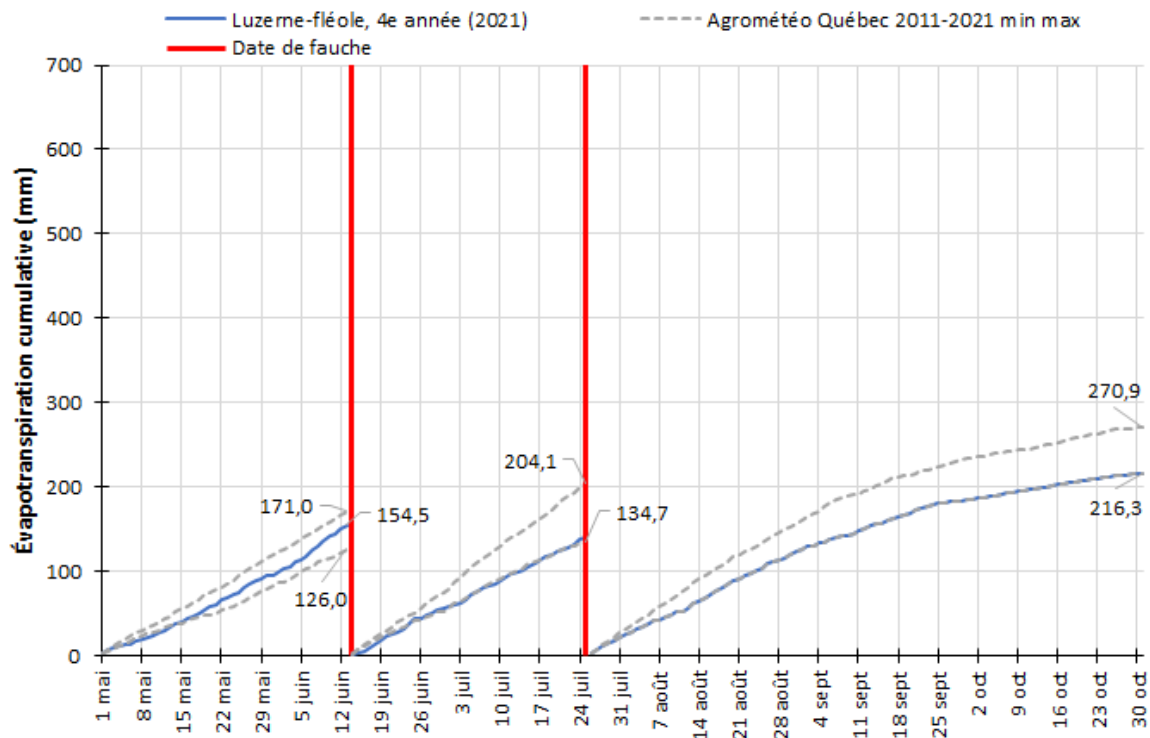


Figure 2. Évapotranspiration potentielle cumulée (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Saint-Bruno-de-Kamouraska entre 2011 et 2021 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Pascal, saison 2021.

4.1.2.4.1.3 Suivi du statut hydrique du sol par TDR

Le suivi du statut hydrique du sol réalisé au site Saint-Pascal en 2021 en contexte avec et sans irrigation est respectivement présenté aux Figure 3 et Figure 4. Ces figures illustrent la variation de la teneur en eau volumique du sol jusqu'à une profondeur de 90 cm du 8 mai au 26 juillet. Dans ces conditions de production, le prélèvement en eau par la culture s'est principalement fait dans l'horizon 0-30 cm. Durant les périodes prolongées sans précipitations et lorsque l'horizon de surface s'assèche (0-30 cm), un prélèvement entre 30-60 cm a été observé (ex. 5 au 15 juin). Le statut hydrique du sol entre 60-90 cm de profondeur s'est maintenu tout au long de la saison. Cette situation n'exclut pas la possibilité que la culture ait pu prélever de l'eau dans cet horizon, car en fonction de la profondeur de la nappe, l'horizon aurait pu se réhumecter par la remontée capillaire de l'eau. Finalement, en absence d'irrigation, aucune différence en ce qui a trait au statut hydrique du sol n'a pu être observée entre les parcelles.

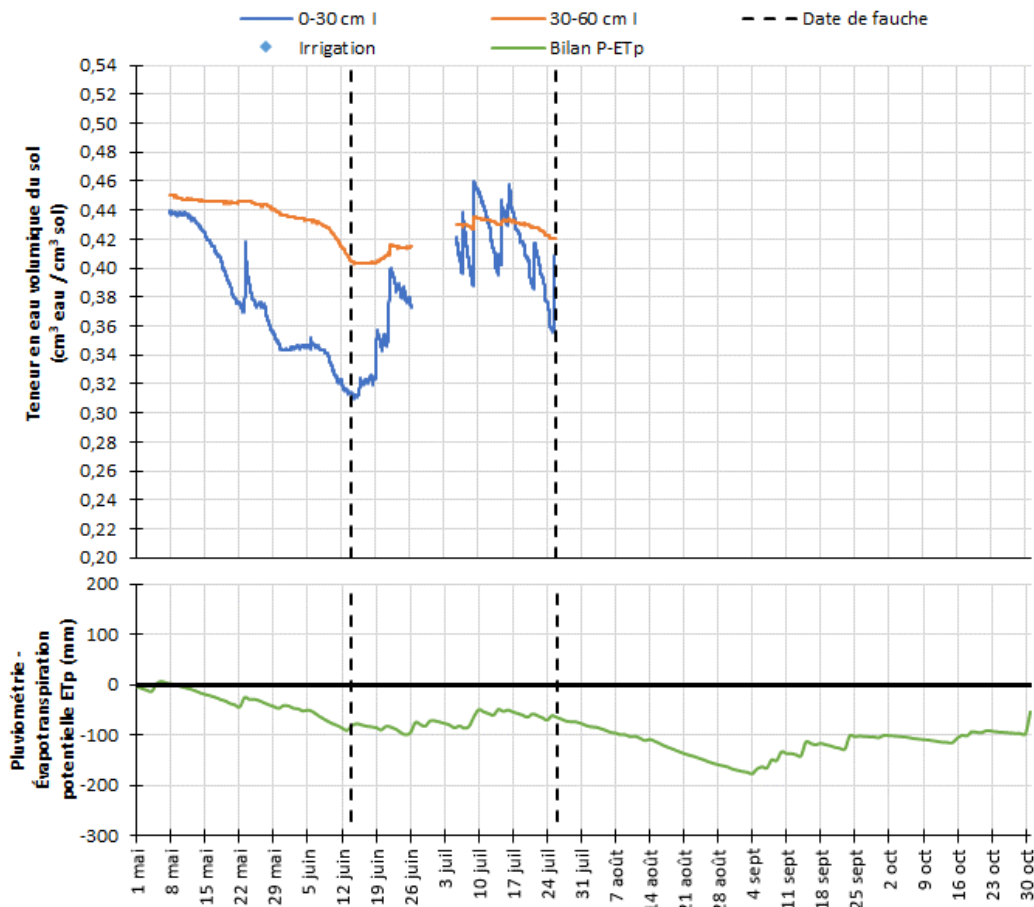


Figure 3. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) et bilan pluviométrie- ET_p ($\text{P}-\text{ET}_p$) (mm), traitement irrigué selon la profondeur au site Saint-Pascal, saison 2021.

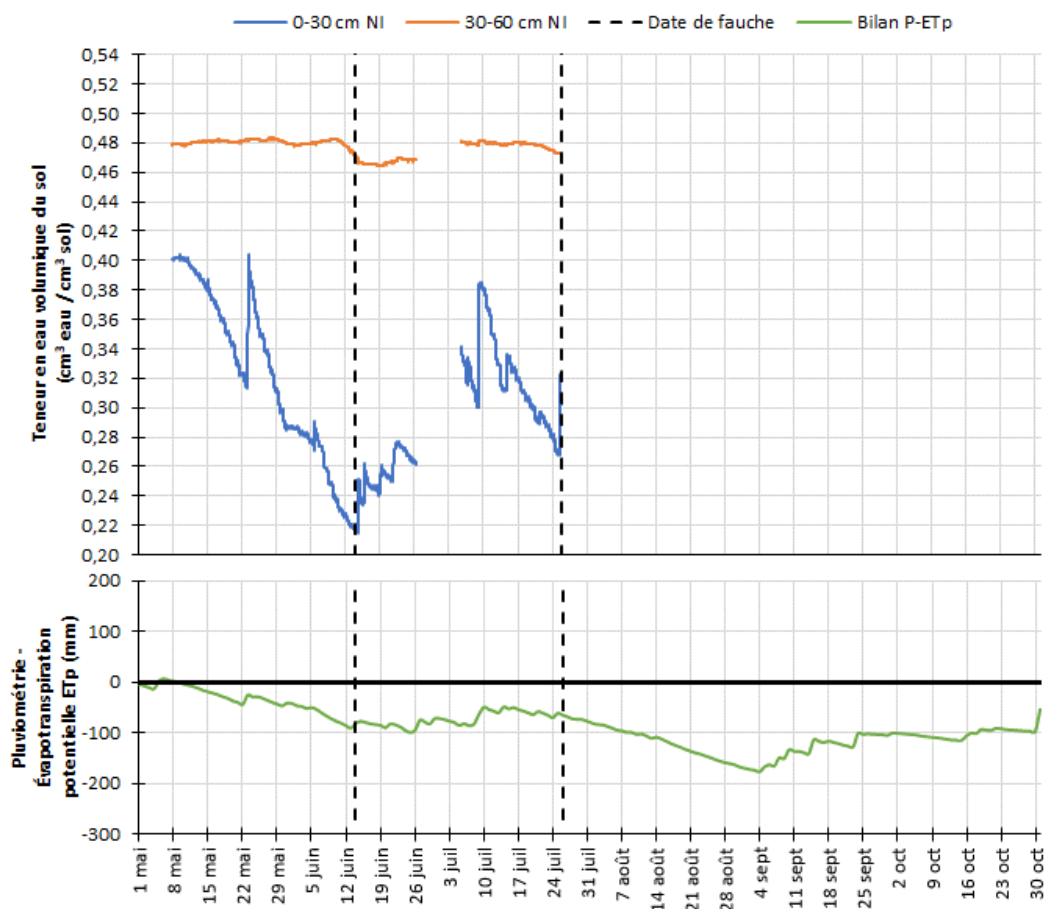


Figure 4. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) et bilan pluviométrie- ET_p (P-ET_p) (mm), traitement non irrigué selon la profondeur au site Saint-Pascal, saison 2021.

4.1.2.4.1.4 Évapotranspiration de la culture (ET_c) et coefficients culturaux (K_c)

L'évapotranspiration de la culture et les coefficients culturaux (K_{c-TDR}) sont respectivement présentés aux Figure 5 et Figure 6. Au site Saint-Pascal, la culture était déjà bien implantée en 2021. Le K_{c-TDR} a donc varié en fonction des périodes de regain. Cet aspect a été bien visible dès l'installation des sondes au printemps et après la 1^{re} coupe. Du 1^{er} mai jusqu'à la 1^{re} coupe, les valeurs ont oscillé entre 0,2 et 1,1. Toutefois, la plupart des données n'ont pas franchi la barre de 0,8. Après la 1^{re} coupe, des valeurs entre 0,2 et 1,4 ont été observées. Plusieurs données se sont également maintenues sous la barre de 0,8. L'étendue limitée des valeurs diminue toutefois la crédibilité du K_{c-TDR} maximal pour ce site.

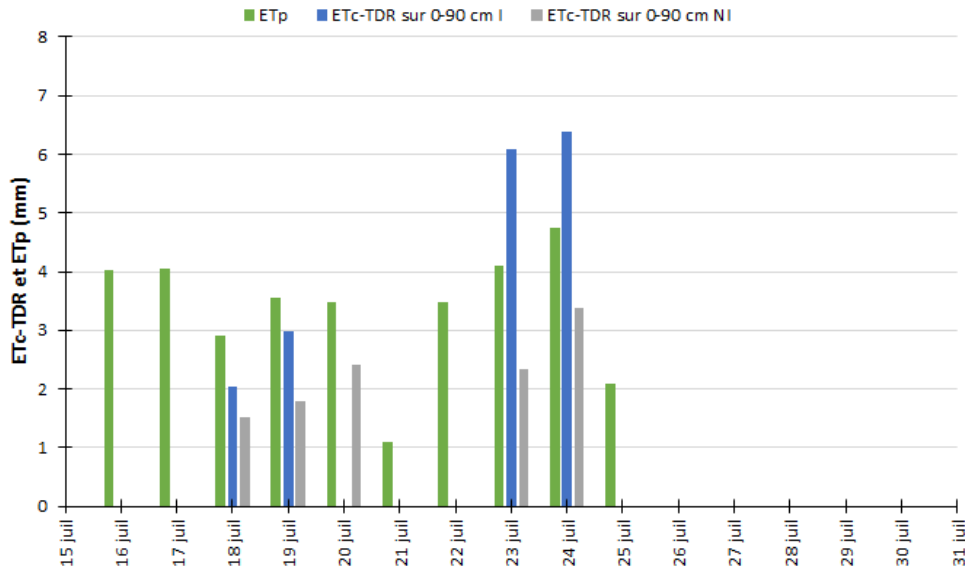


Figure 5. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station Agrométéo Québec la plus près, site Saint-Pascal, 15 au 31 juillet 2021.

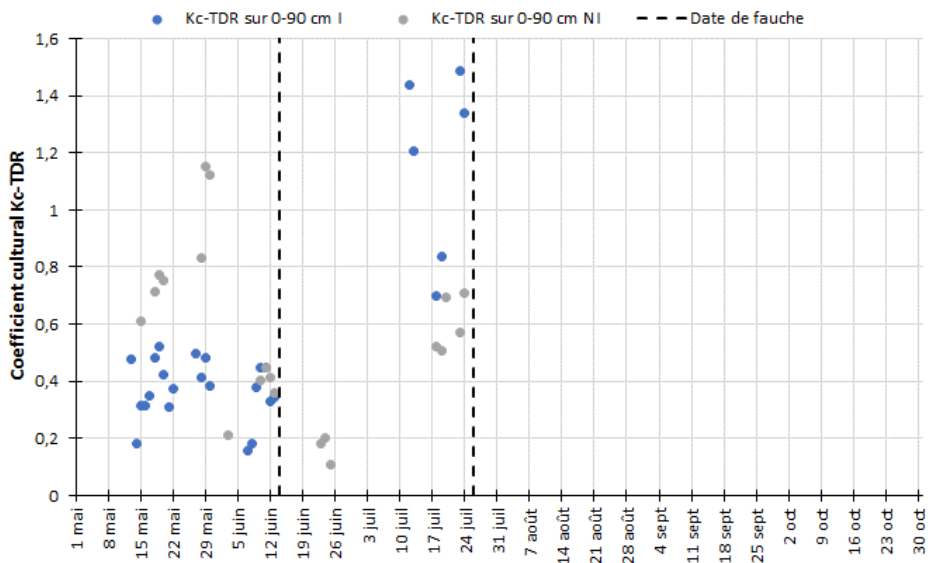


Figure 6. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Saint-Pascal, saison 2021 (bleu = irrigué et gris = non irrigué).

Site Saint-Germain1 (2021 à 2023)

4.1.2.4.1.5 Pluviométrie

Pour le site Saint-Germain1 de 2021 à 2023, les précipitations cumulatives délimitées par les fauches sont présentées aux Figure 7, Figure 8 et Figure 9, respectivement pour les saisons 2021, 2022 et 2023.

En 2021, le cumulatif débute au 1^{er} mai et se termine avec la 1^{re} coupe (Figure 7). Le cumulatif pour cette période a atteint 141,2 mm et se situe à l'intérieur des valeurs minimale et maximale mesurées par la station météorologique d'Agrométéo Québec pour cette même période. Toutefois, le cumulatif indique que le début de la saison a été particulièrement sec puisqu'il est inférieur à la valeur minimale pour une bonne partie du mois de mai. Le cumulatif de la saison a suivi de très près le cumulatif minimal jusqu'à la mi-juin. Par la suite, le régime des précipitations s'est accéléré. La période comprise entre la 1^{re} et la 2^e coupe a été marquée, dans un premier temps, par plusieurs précipitations et, dans un deuxième temps (fin juillet), par une quasi-absence de précipitations. Néanmoins, la période s'est terminée dans la moyenne avec une valeur cumulée à 93,5 mm. Finalement, la période sans précipitation s'est poursuivie au-delà de la 2^e coupe. Ce n'est qu'à partir du début septembre que les précipitations ont repris. Le cumulatif de la dernière période a finalement atteint une valeur de 209,3 mm, soit une valeur à l'intérieur des extrêmes.

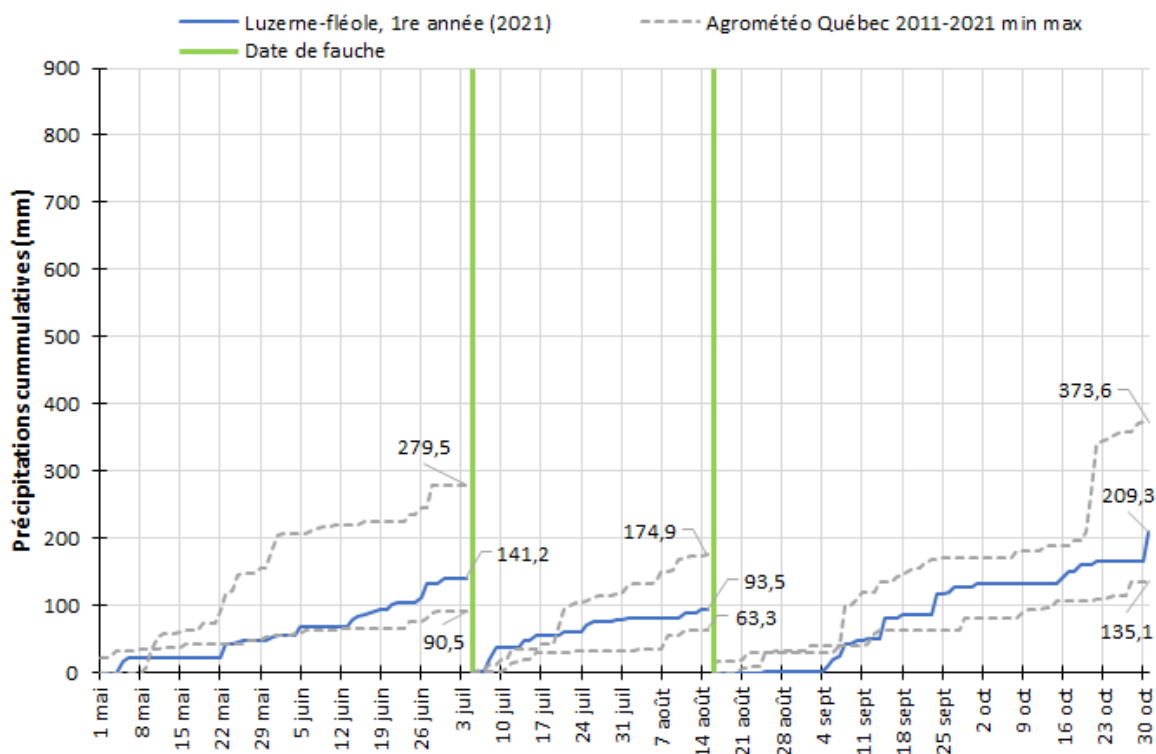


Figure 7. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2021 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Germain1, saison 2021.

Les 3 coupes de 2022 sont identifiées par les lignes verticales vertes (Figure 8). Le cumulatif de la 1^{re} période a été de 131,9 mm, soit 67 mm de plus que la valeur minimale. Le cumulatif de la 2^e période a été de 159,5 mm, soit tout près de la valeur maximale de la période 2011-2022 (163,4 mm). Le cumulatif de la 3^e période s'est élevé à 62 mm, plus près de la valeur minimale de 35,5 mm. Finalement, le cumulatif de la dernière période a atteint 127,8 mm, une valeur se situant à l'intérieur des valeurs minimale et maximale. En 2023, le début de la saison a été plutôt sec avec des précipitations cumulatives de 64,6 mm, soit une valeur près du minimum de 55,3 mm (Figure 9). La seconde période a atteint une valeur assez proche de la moyenne avec un cumulatif de 115,7 mm. La 3^e période a reçu une bonne quantité de précipitations avec un cumulatif de 201,9 mm, qui est près de la valeur maximale de 219,8 mm. Le cumulatif de la dernière période a été de 130,0 mm.

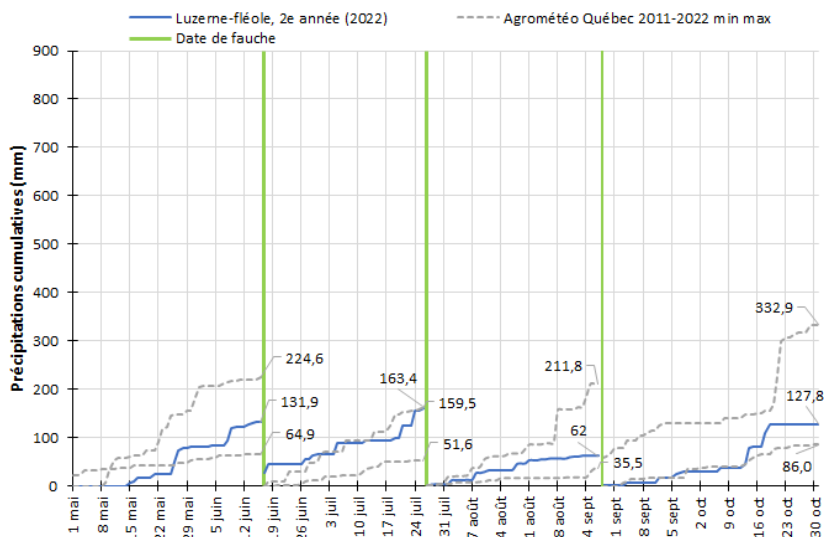


Figure 8. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Germain1, saison 2022.

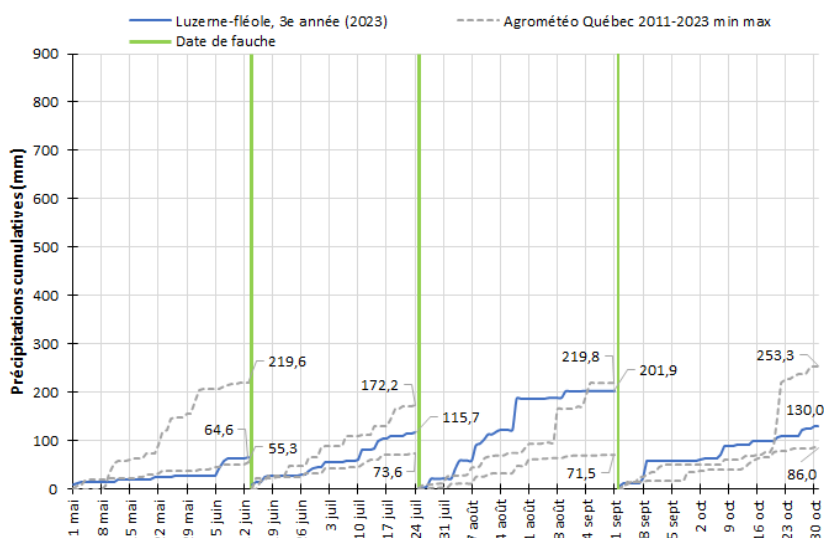


Figure 9. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2023 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Germain1, saison 2023.

4.1.2.4.1.6 Évapotranspiration potentielle (ET_p)

L'évapotranspiration potentielle et les précipitations ont été cumulées par périodes qui sont délimitées par les fauches. Les données de 2021 à 2023 sont respectivement présentées aux Figure 10, Figure 11 et Figure 12.

En 2021, le cumulatif de l'ET_p s'est situé dans la moyenne à la 1^{re} et à la 3^e période avec des valeurs respectives de 220,9 et 148,7 mm (Figure 10). Le cumulatif de la 2^e période a été la valeur minimale enregistrée pour la période 2011 à 2021.

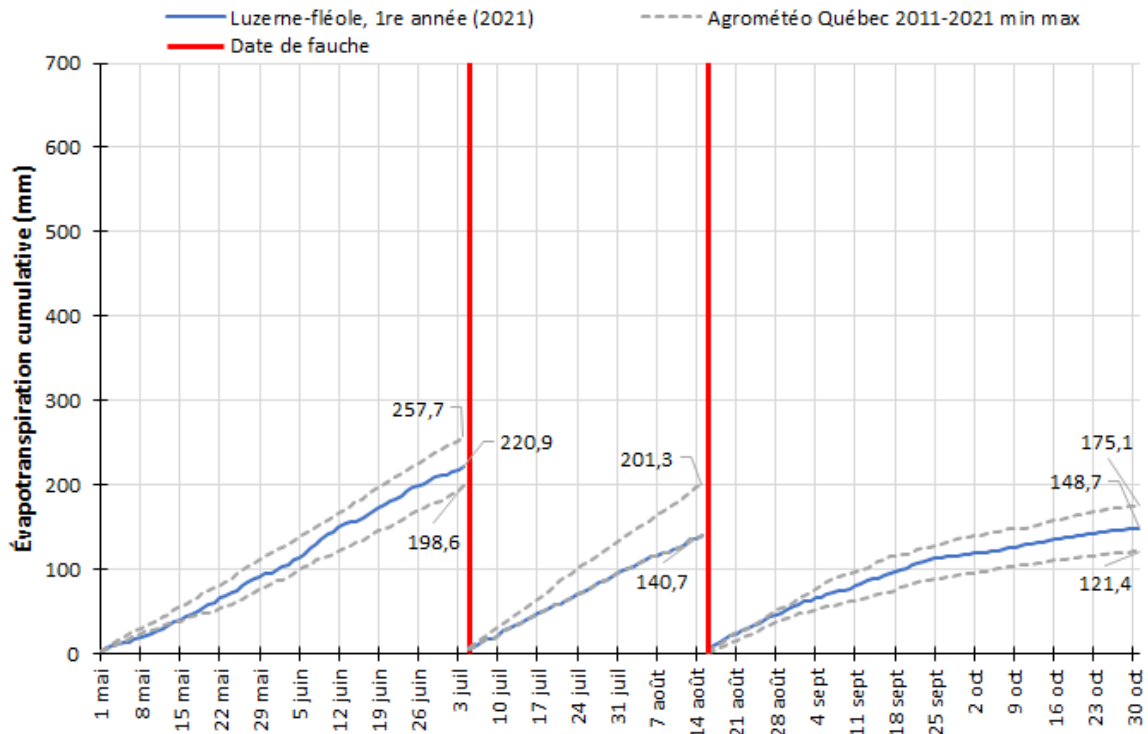


Figure 10. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Saint-Bruno-de-Kamouraska entre 2011 et 2021 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Germain1, saison 2021.

Pour 2022, le cumulatif de l'ET_p par période a été globalement près de la valeur maximale (Figure 11). En effet, les cumulatifs des trois premières périodes ont atteint des valeurs assez près des valeurs maximales, soit respectivement, 171,6 mm, 189,8 mm et 168,9 mm. La dernière période est égale à la valeur minimale de 67,7 mm enregistrée entre 2011 et 2022. La saison 2023 a fait osciller les cumulatifs entre les extrêmes (Figure 12). Les cumulatifs du début et de la fin de la saison ont atteint des valeurs près des maximums avec des valeurs de 152,3 et 79,4 mm. Au contraire, les cumulatifs de la 2^e et 3^e périodes ont été les plus faibles de la période 2011 à 2023 avec des valeurs de 137,4 et 136,5 mm.

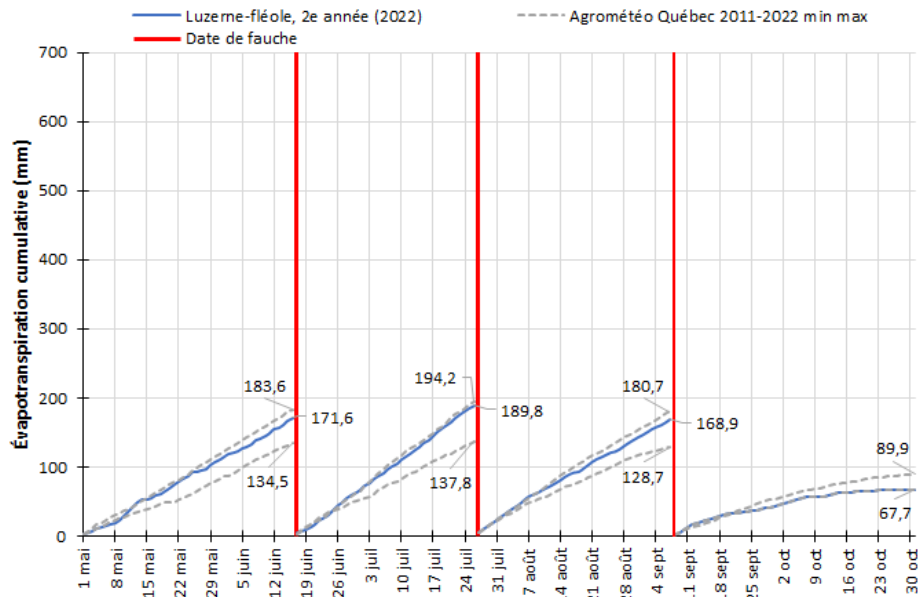


Figure 11. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimales et maximales cumulatives à la station Saint-Bruno-de-Kamouraska entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Germain1, saison 2022.

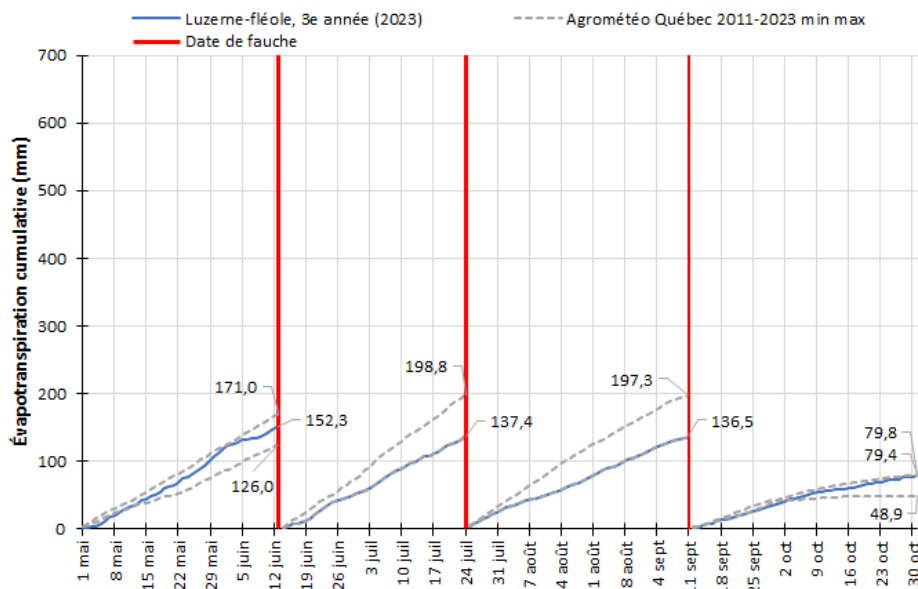


Figure 12. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimales et maximales cumulatives à la station Saint-Bruno-de-Kamouraska entre 2011 et 2023 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Germain1, saison 2023.

4.1.2.4.1.7 Suivi du statut hydrique du sol par TDR

En 2021, l'évolution du statut hydrique dans l'horizon 0-20 cm a été plutôt lente à la 1^{re} période, tel que présenté à la Figure 13 (avec irrigation) et à la Figure 14 (sans irrigation). Par la suite, au début de juin, le prélèvement en eau s'est accentué dans l'horizon de surface (0-20 cm) jusqu'à provoquer la première irrigation (12 juin). Durant la 2^e période, le prélèvement en eau a continué de s'accroître dans l'horizon de surface (0-30 cm) et une variation plus en profondeur a également été observée. Les apports en eau provenant de l'irrigation ont été mesurables uniquement pour le 0-30 cm. Il y a également eu une grande différence du statut hydrique du sol entre les traitements irrigués (Figure 13) et non irrigués (Figure 14). Ceci s'explique non seulement par les apports en eau effectués par l'irrigation, mais aussi par des prélèvements plus importants et continus. La période de sécheresse (fin juillet, mi-août) s'est prolongée assez longtemps pour assécher le sol à un seuil où aucune variation de la teneur en eau n'a été observée (9 au 12 août). Durant cette période, du stress hydrique a pu être observé. Finalement, la 3^e et dernière période a témoigné aussi d'un prélèvement plus important (0-30 cm) dans la parcelle irriguée puisque graphiquement la variation quotidienne de teneur en eau volumique a été plus importante.

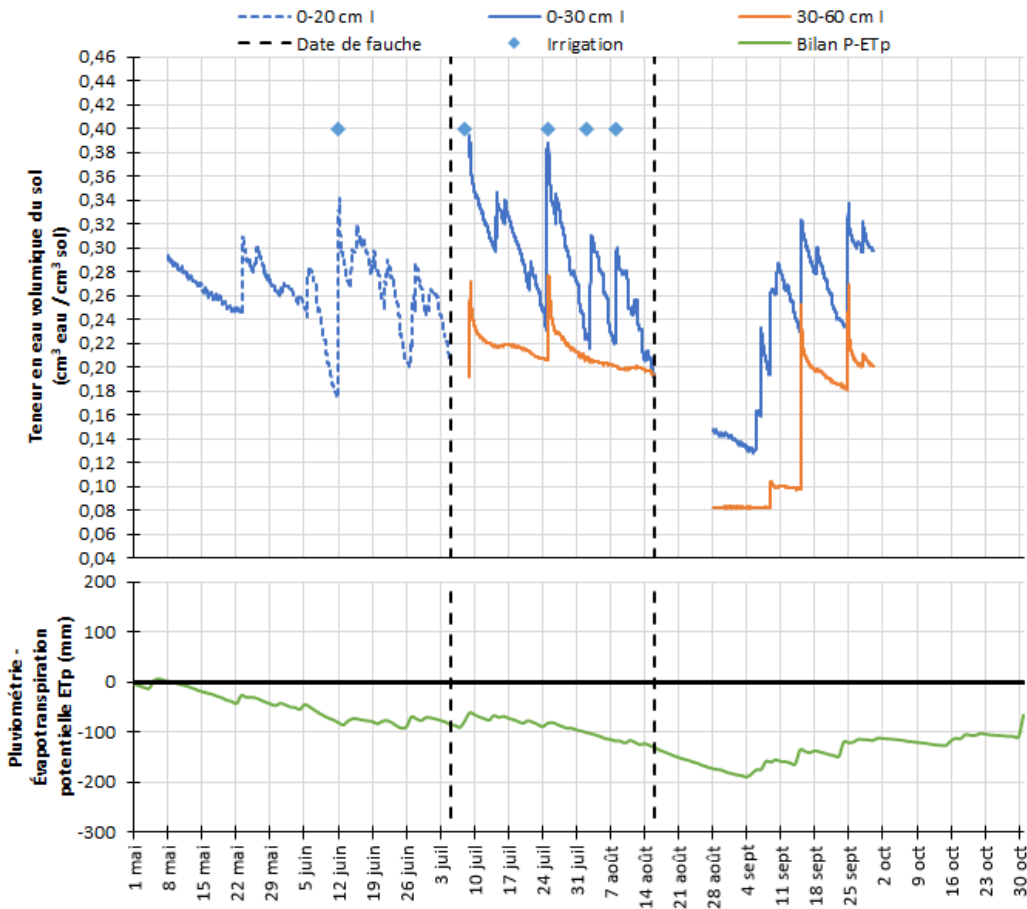
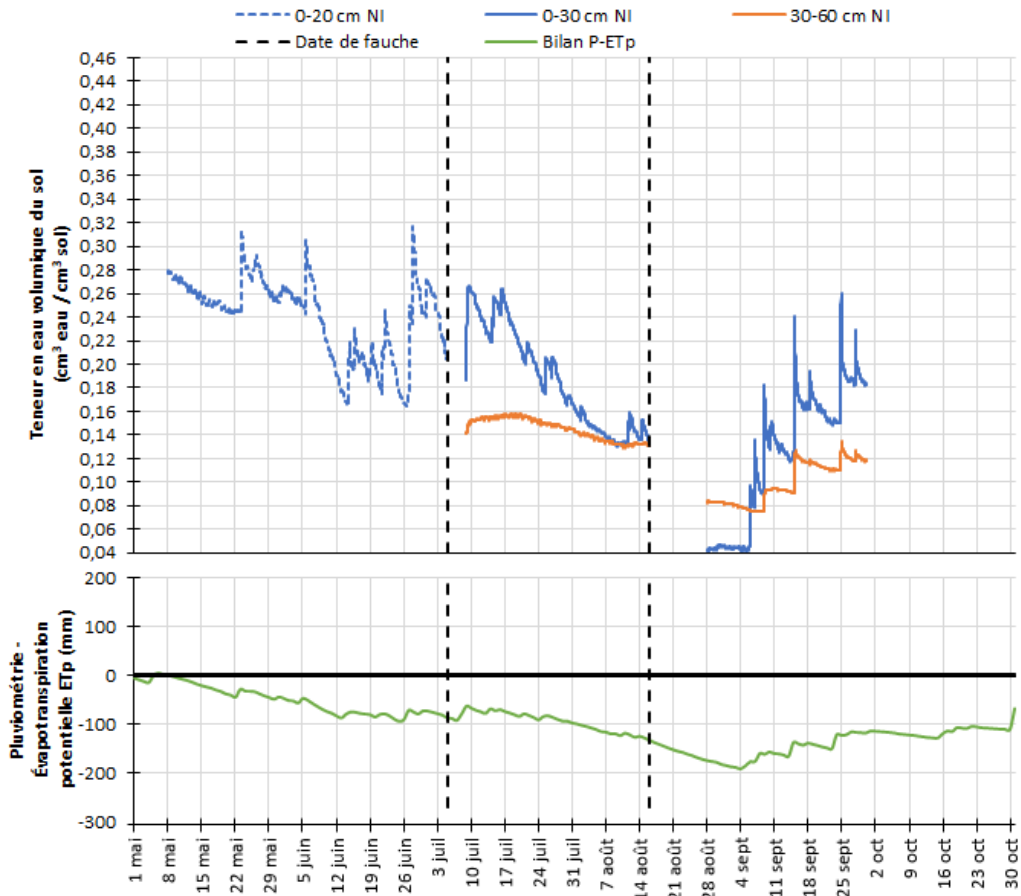


Figure 13. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) et bilan pluviométrie-ET_p (P-ET_p) (mm), traitement irrigué selon la profondeur au site Saint-Germain1, saison 2021.



En 2022, la variation du statut hydrique du sol a été suivie jusqu'à une profondeur de 75 cm tant en contexte irrigué (Figure 15) et non irrigué (Figure 16). Au courant de la 1^{re} période, le prélèvement en eau par la culture s'est principalement fait dans l'horizon 0-30 cm pour la parcelle irriguée. Au-delà de 30 cm, le statut hydrique du sol s'est maintenu au courant de cette période. Une irrigation a été déclenchée le 6 juin.

Durant la 2^e période, le prélèvement en eau a continué de s'accroître dans l'horizon de surface (0-30 cm) et une variation plus en profondeur a également été observée. Les apports en eau provenant de l'irrigation ont été mesurables uniquement pour le 0-30 cm (13 et 18 juillet). Il y a également eu une différence du statut hydrique du sol entre les traitements irrigués et non irrigués. Cela s'explique non seulement par les apports en eau effectués par l'irrigation, mais aussi par des prélèvements plus importants et continus (voir période du 6 ou 12 juillet). Bien qu'il soit plus difficile de les comparer directement, le prélèvement dans l'horizon 20-45 cm de la parcelle non irriguée a été plus important que dans la parcelle irriguée. Le positionnement un peu plus profond de la sonde (parcelle irriguée) pourrait expliquer cette situation. Finalement, au-delà de 50 cm, aucun prélèvement n'a été observé dans la parcelle irriguée tandis qu'un léger prélèvement a été observé dans la parcelle non irriguée à partir du 13 juillet, ce qui coïncide avec l'atteinte de la consigne d'irrigation pour le traitement irrigué.

Lors de la 3^e période, soit de la reprise post 2^e coupe jusqu'à la 3^e coupe, le prélèvement en eau dans l'horizon de surface (0-30 cm) a été le plus important. Au début de la période, les prélèvements ont été équivalents entre les traitements, c'est-à-dire jusqu'à la 1^{re} irrigation. Par la suite, le prélèvement observé dans la parcelle irriguée a été plus important et s'est démarqué plus fortement à partir du 27 août. La 2^e irrigation qui a été déclenchée le 3 septembre a fait remonter le statut hydrique du sol jusqu'à la capacité au champ. Les prélèvements observés durant la période suivante, soit du 4 au 9 septembre, ont été drastiquement différents entre les parcelles irriguées et non irriguées. Alors, que le prélèvement a été actif dans la parcelle irriguée, il a pratiquement été nul dans celle sans irrigation. En profondeur, la tendance entre les traitements a été similaire. Au-delà de 30 cm, il y a eu des prélèvements, mais ils ont été assez limités.

La dernière période est, en quelque sorte, un peu artificielle. En effet, la 3^e coupe a été réalisée dans le cadre du projet tandis que le producteur n'a pas fauché le reste de la parcelle. Le suivi des TDR s'est effectué dans le contexte où la culture n'a pas été fauchée. C'est pourquoi le prélèvement est resté assez actif immédiatement après la coupe. Néanmoins, il est intéressant de comparer le prélèvement de la culture dans ce contexte puisqu'il informe sur le statut hydrique global de la parcelle qui a été très différent selon le traitement. Après la 3^e coupe (uniquement quadrats pour rendement), il y a eu une période prolongée sans précipitations. Ce n'est qu'au 22 septembre que des quantités significatives ont été mesurées. Ainsi, le prélèvement en eau du traitement non irrigué a été quasi inexistant durant cette période, peu importe la profondeur. À ce moment, une forte contrainte au prélèvement sur l'ensemble des horizons implique une très forte probabilité que la culture ait subi un stress hydrique. Inversement, un prélèvement continu a pu être mesuré en contexte irrigué.

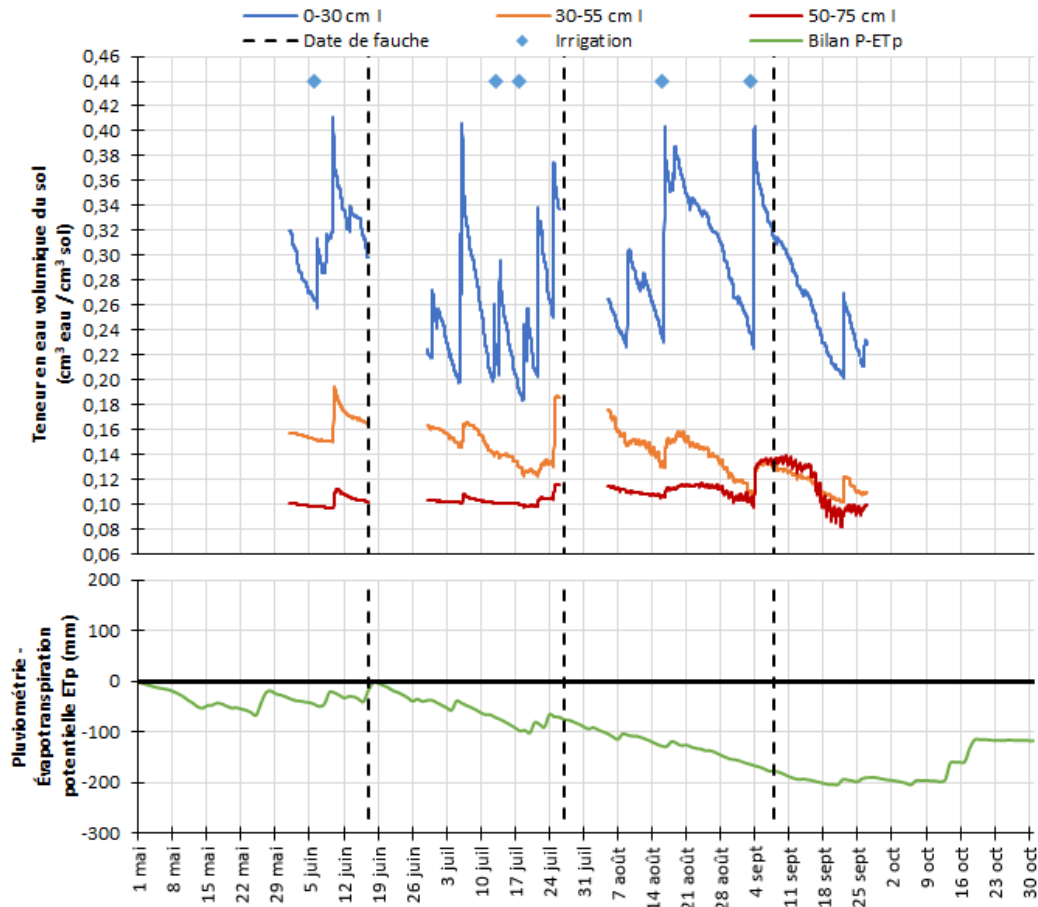


Figure 15. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) et bilan pluviométrie- ET_p (P-ET_p) (mm), traitement irrigué selon la profondeur au site Saint-Germain1, saison 2022.

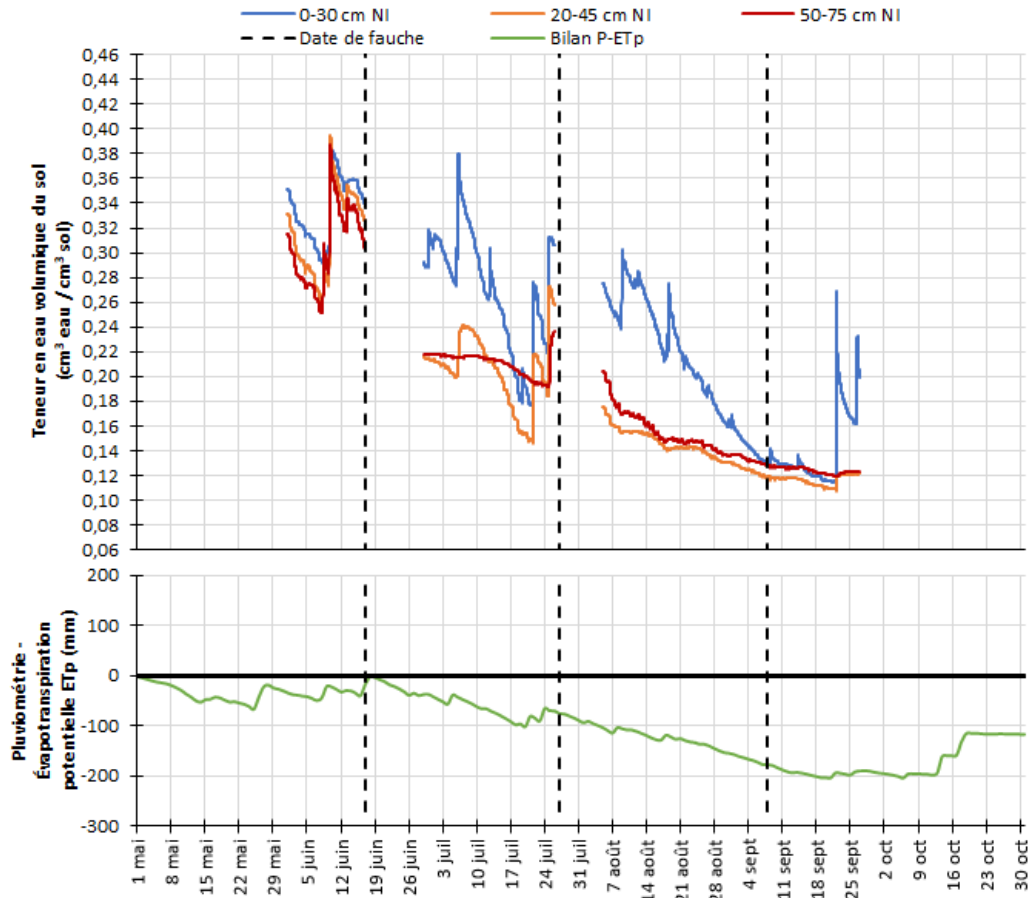


Figure 16. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) et bilan pluviométrie- ET_p (P-ET_p) (mm), traitement non irrigué selon la profondeur au site Saint-Germain1, saison 2022.

Globalement, pour la saison 2023, le statut hydrique entre les traitements n'a pas été très différent, tant en contexte irrigué (Figure 17) que non irrigué (Figure 18). Au courant de la 1^{re} période, l'irrigation du 31 mai a permis de rehausser le statut hydrique du sol. Le prélèvement en eau de la culture dans le traitement irrigué a ainsi été plus important jusqu'aux précipitations du 6 juin. Par la suite, le statut hydrique entre les traitements a été assez similaire.

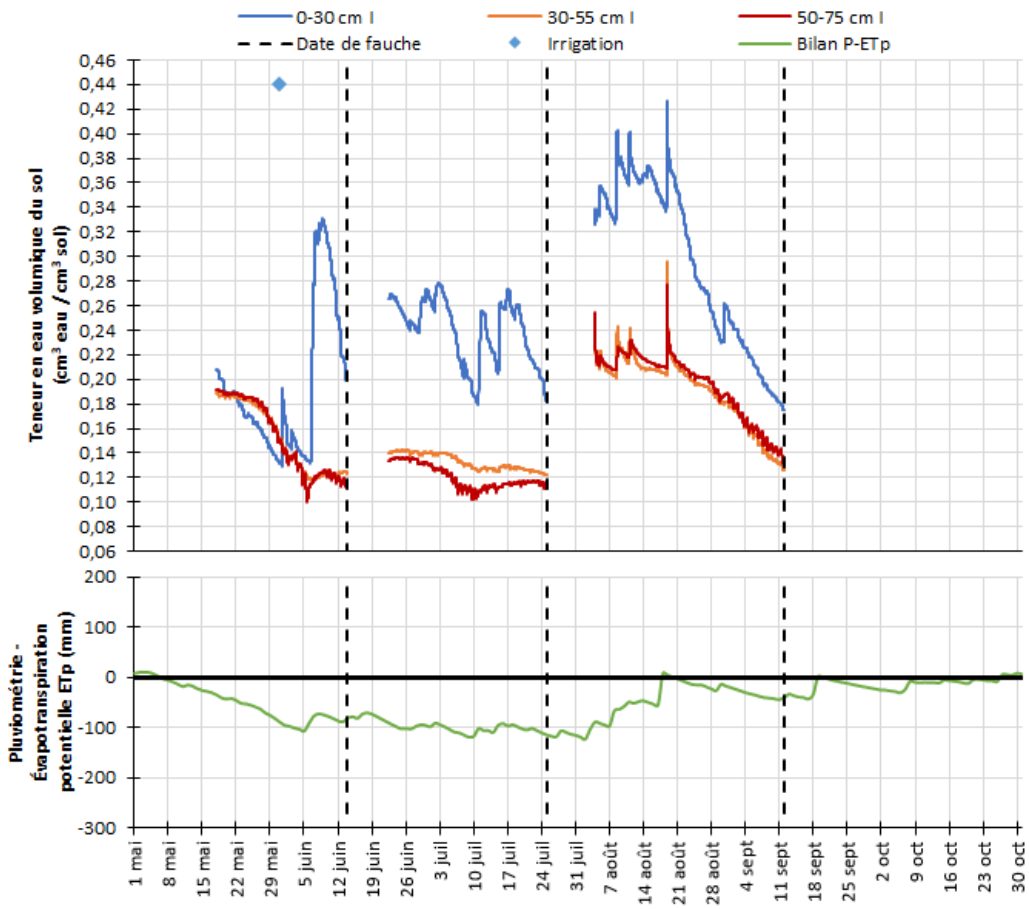
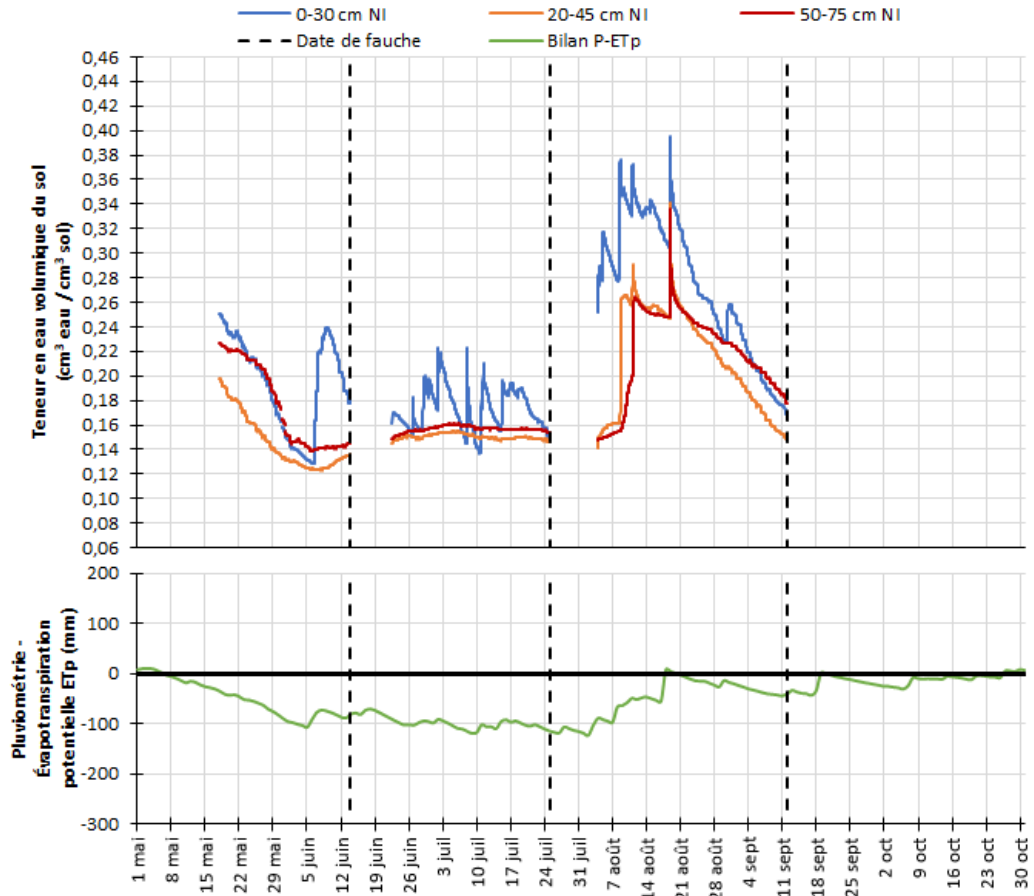


Figure 17. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) et bilan pluviométrie- ET_p ($\text{P}-\text{ET}_p$) (mm), traitement irrigué selon la profondeur au site Saint-Germain1, saison 2023.



4.1.2.4.1.8 Évapotranspiration de la culture (ET_c) et coefficients culturaux (K_c)

L'évapotranspiration de la culture (ET_{c-TDR}) et les coefficients culturaux (K_{c-TDR}) sont présentés de la Figure 20 à la Figure 23 (saisons 2021 à 2023).

En 2021, au site Saint-Germain1, soit l'année d'implantation de la culture, les K_{c-TDR} ont été mesurés à partir de la 1^{re} coupe (Figure 19). À la reprise, les valeurs ont rapidement atteint le seuil 1. Vers la fin du mois de juillet, les K_{c-TDR} du traitement non irrigué ont fléchi, puis ont suivi une tendance à la baisse, signe d'une contrainte de prélèvement en eau. Pour cette période, le ET_{c-TDR} n'a pas suivi la tendance de l' ET_p (Figure 19). Une période de contrainte de prélèvement d'environ 8 jours consécutifs a pu être observée (3 au 11 août). Les valeurs pour la dernière période ont été assez semblables.

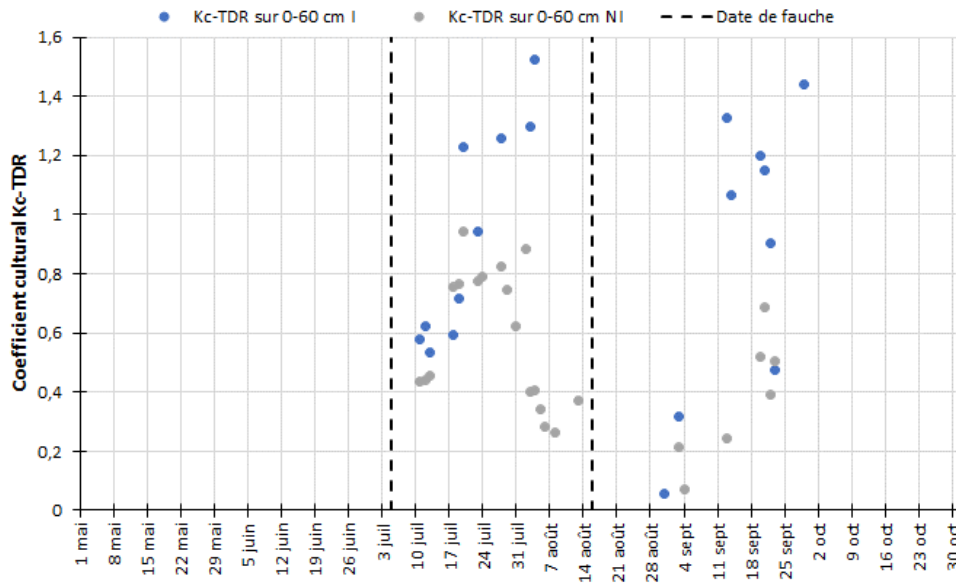


Figure 19. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Saint-Germain1, saison 2021 (bleu = irrigué et gris = non irrigué).

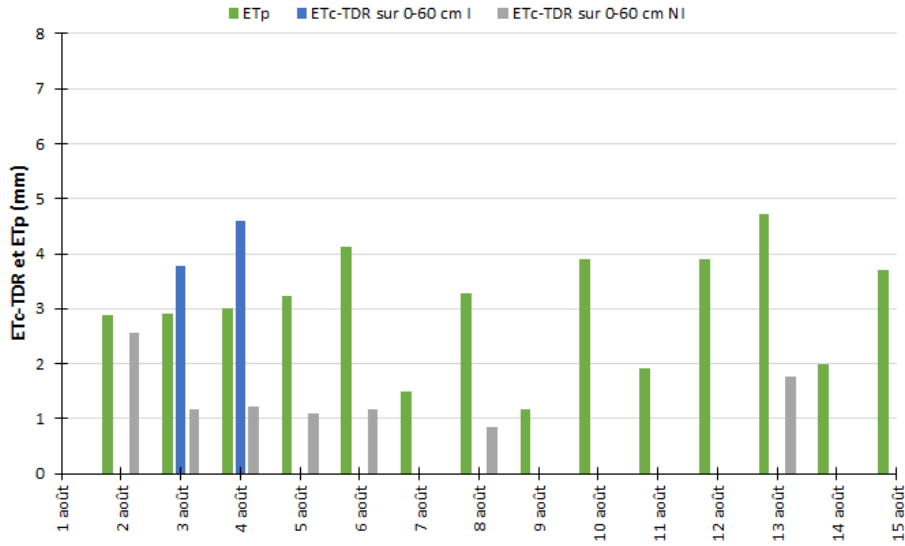


Figure 20 Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près, site Saint-Germain1, 1^{er} au 15 août 2021.

Pour 2022, une situation similaire à 2021 a été vécue à la 3^e coupe, où les K_{c-TDR} du traitement irrigué ont subi une forte baisse (

Figure 21). Malheureusement, il n'y a pas de données pour le traitement irrigué à des fins comparatives. Il est toutefois raisonnable d'émettre l'hypothèse que la culture non irriguée a subi une contrainte de prélèvement en eau durant la période comprise entre le 28 août et le 8 septembre (Figure 22).

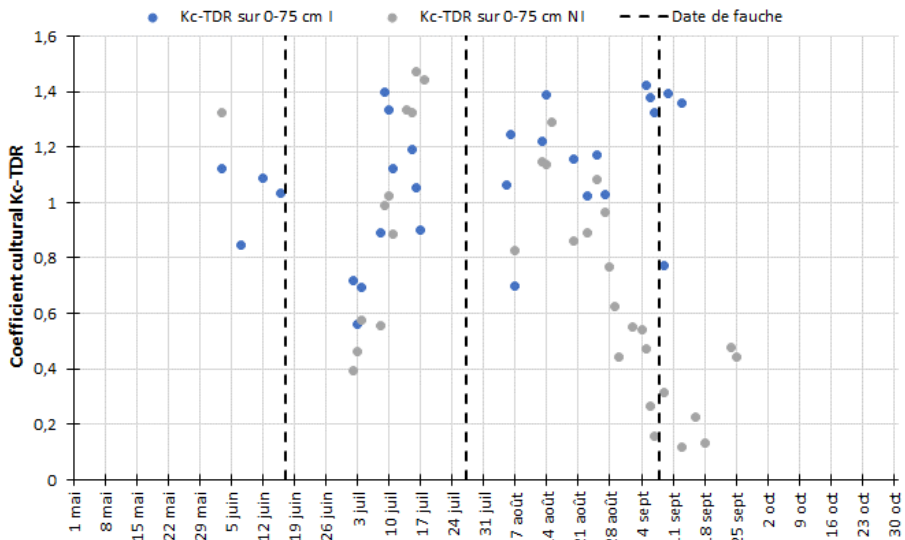


Figure 21. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Saint-Germain1, saison 2022 (bleu = irrigué et gris = non irrigué).

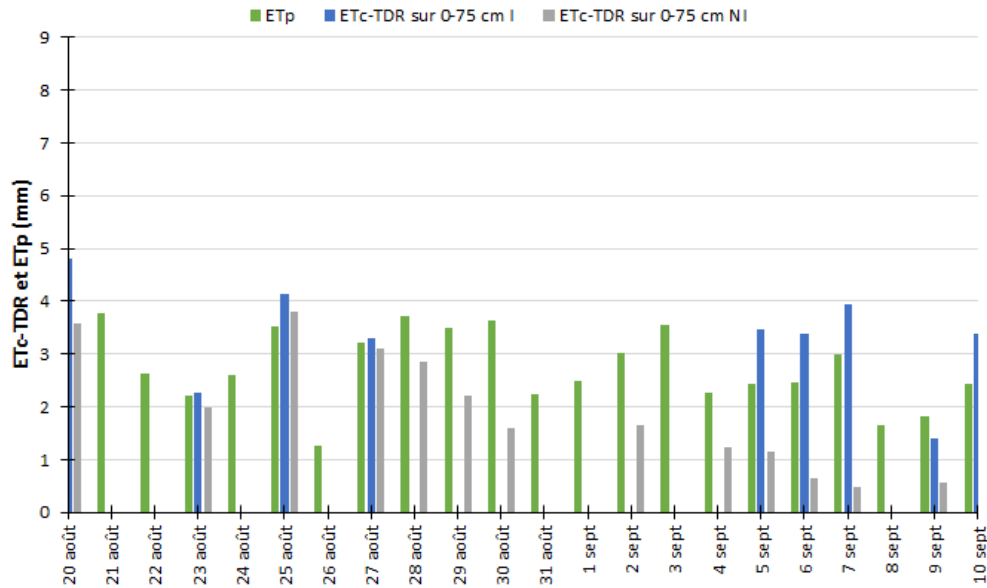


Figure 22. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près, site Saint-Germain1, 20 août au 10 septembre 2022.

Finalement, pour 2023, les K_{c-TDR} entre les traitements ont suivi une tendance comparable (Figure 23). De manière générale, pour le site de Saint-Germain1, les K_{c-TDR} maximums observés ont atteint des valeurs entre 1,2 et 1,4 et ce, dès l'année d'implantation.

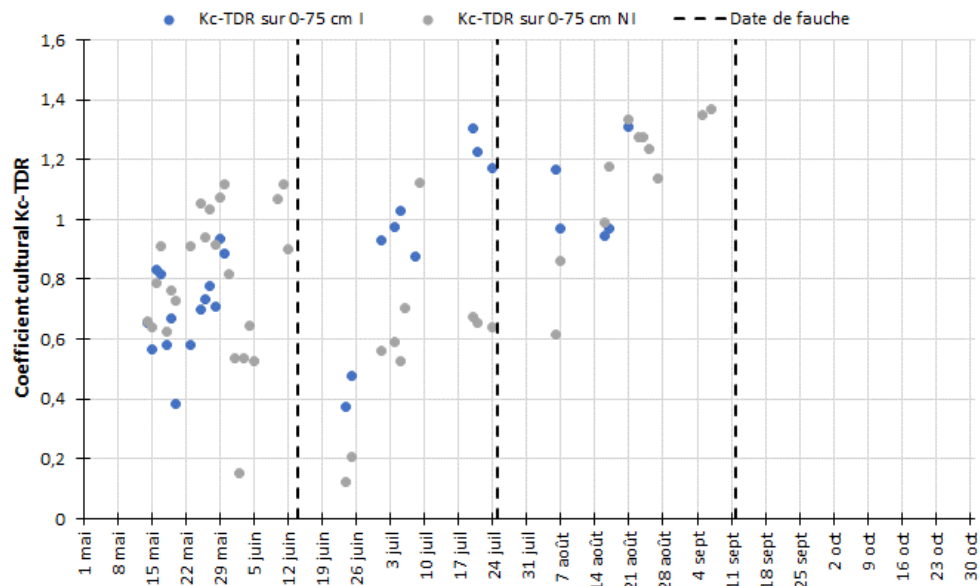


Figure 23. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Saint-Germain1, saison 2023 (bleu = irrigué et gris = non irrigué).

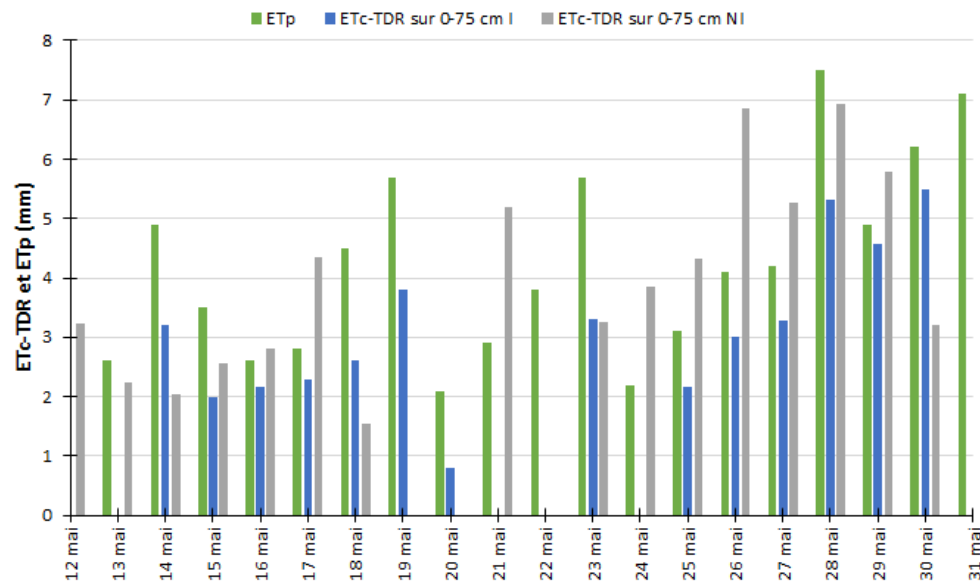


Figure 24. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_{c-TDR}) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près, site Saint-Germain1, 12 au 31 mai 2023.

4.1.2.4.2 Site Saint-Germain2 (2022 et 2023)

4.1.2.4.2.1 Pluviométrie

Le site Saint-Germain2 a été suivi pendant deux années consécutives. Le champ était à sa 3^e année de production en 2022. Les données présentées dans les prochaines sections concerneront uniquement les saisons 2022 et 2023. Pour ce site, les précipitations cumulatives entre les fauches sont présentées aux Figure 25 et Figure 26, respectivement pour les saisons 2022 et 2023.

En 2022, il y a eu 2 coupes, soit, le 17 juin et le 4 août. Le cumulatif de la 1^{re} période de la saison a été de 131,9 mm, soit 67 mm de plus que la valeur minimale. Le cumulatif de la 2^e période a été de 172,1 mm, tout juste au-dessus de la valeur maximale de 171,3 mm, enregistrée pour la période 2011-2022. Finalement, le cumulatif de la dernière période est de 177,2 mm, soit une valeur se situant à l'intérieur des valeurs minimale et maximale, mais plus proche de la valeur minimale.

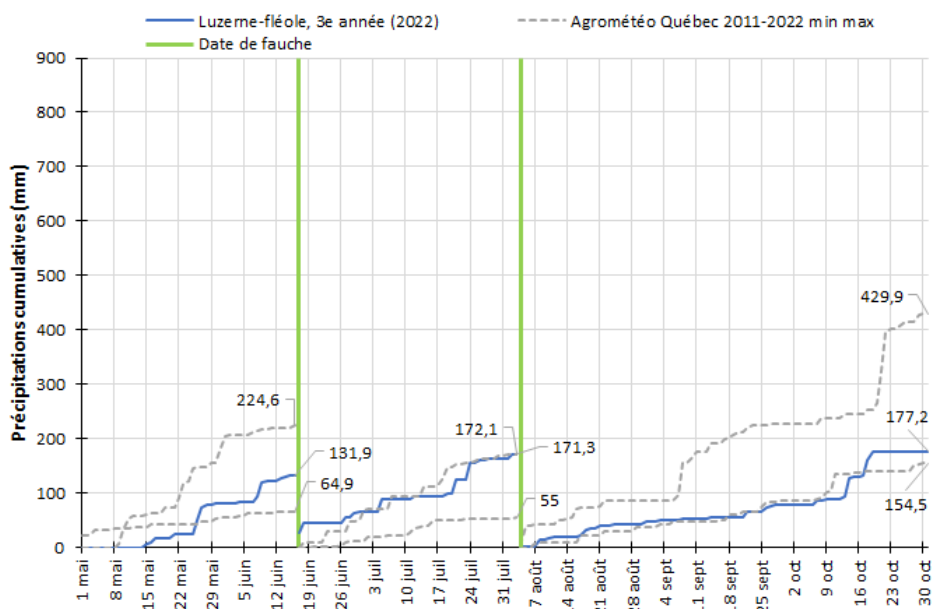


Figure 25. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Germain2, saison 2022.

La saison 2023 a été une saison de contrastes. Il s'agit de la même description qu'au site Saint-Germain1 (2023). Le début de la saison a été plutôt sec avec des précipitations cumulatives qui ont atteint 64,6 mm, une valeur près du minimum (55,3 mm). Une seconde période qui a atteint une valeur assez proche de la moyenne avec un cumulatif à 115,7 mm. La 3^e période a reçu une bonne quantité de précipitations avec un cumulatif terminant sa course tout près de la valeur maximale (219,8 mm) à 201,9 mm. Finalement, la dernière période a terminé à 130,0 mm.

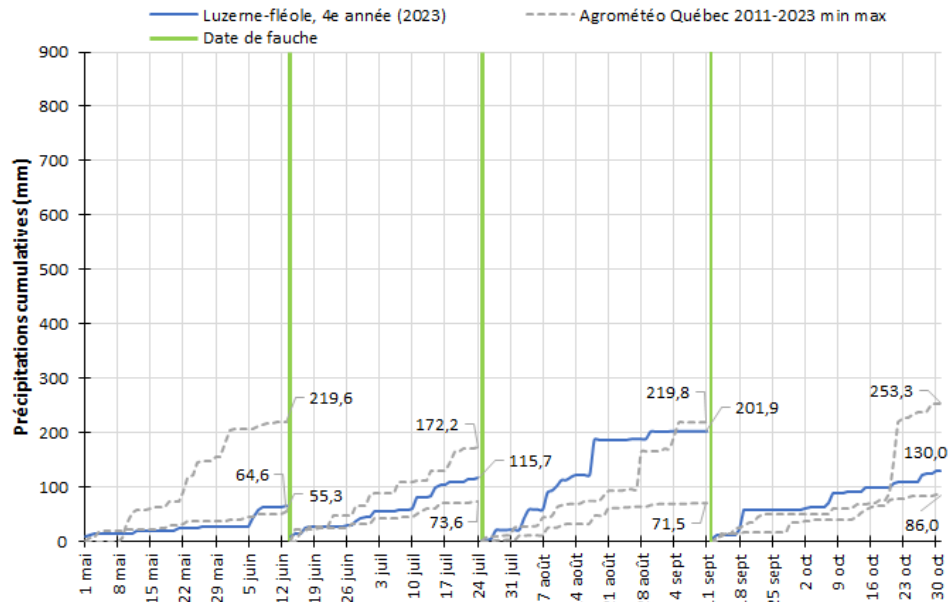


Figure 26. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2023 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Germain2, saison 2023.

4.1.2.4.2 Évapotranspiration potentielle (ET_p)

Les cumulatifs de l'ET_p, selon les périodes et les années (2022 et 2023), sont respectivement présentés aux Figure 27 et Figure 28.

En 2022, le cumulatif de l'ET_p pour chaque période a été globalement près des valeurs maximales. Les cumulatifs des trois premières périodes ont atteint des valeurs assez près des maximums, soit respectivement 171,6 mm, 227,8 mm et 198,6 mm. En 2023, les cumulatifs ont oscillé entre les extrêmes. Ceux du début et de la fin de la saison ont atteint des valeurs près des maximums avec 152,3 et 79,4 mm, alors que ceux de la 2^e et 3^e ont été les plus faibles de la période 2011 à 2023 atteignant 137,4 et 136,5 mm. Ces données sont identiques au site Saint-Germain1(2023).

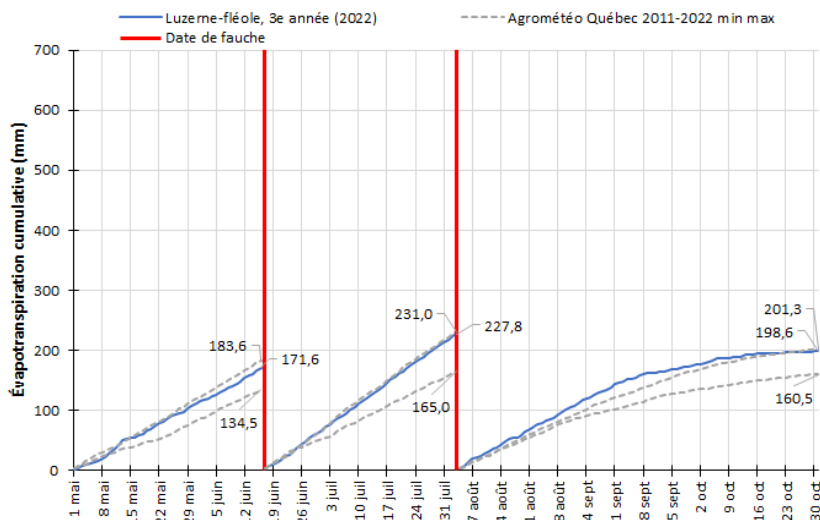


Figure 27. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Saint-Bruno-de-Kamouraska entre 2011 et 2022 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Germain2, saison 2022.

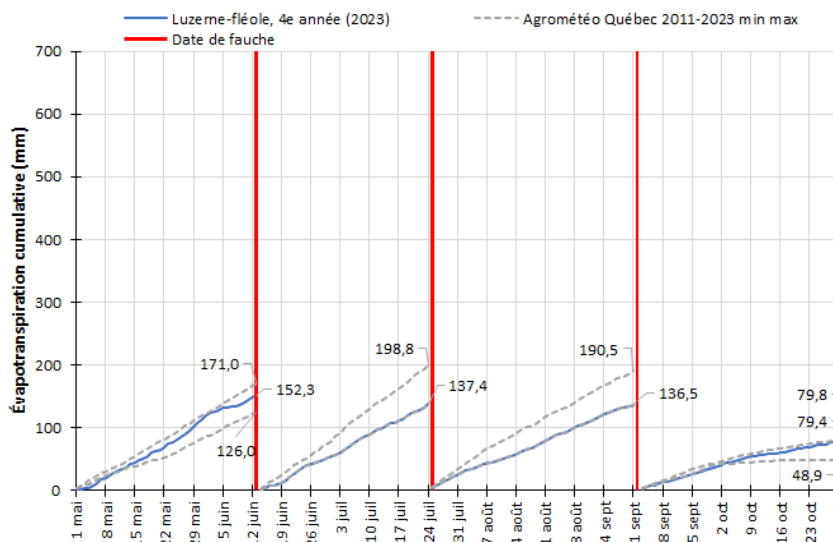


Figure 28. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Saint-Bruno-de-Kamouraska entre 2011 et 2023 (mm) en fonction des fauches effectuées, site Saint-Germain2, saison 2023.

4.1.2.4.2.3 Suivi du statut hydrique du sol par TDR

La variation du statut hydrique du sol pour la saison 2022 est présentée aux Figure 29 et Figure 30, respectivement pour le traitement irrigué et non irrigué. Durant la 1^{re} période, soit du 1^{er} au 17 juin 2022, il y a une très forte variabilité entre les valeurs mesurées (irrigué vs non irrigué). Dans la parcelle non irriguée, les valeurs se situent entre 0,22 et 0,42 cm³ d'eau/cm³ de sol, tandis que les valeurs se regroupent entre 0,05 et 0,24 cm³ d'eau/cm³ de sol dans la parcelle irriguée. Il pourrait y avoir plusieurs explications à ce phénomène telles qu'une réponse altérée des sondes due aux caractéristiques pédologiques du milieu ou d'une compaction localisée. Les analyses physico-chimiques ont démontré une forte présence de particules au diamètre supérieur à 2 mm (plus de 40 % en moyenne). Dans certains cas, la présence importante de roche à proximité des sondes influence et perturbe le fonctionnement des sondes TDR. Le phénomène observé a probablement été causé par la forte présence des fragments grossiers. À la 2^e période, le prélèvement en eau de la parcelle non irriguée (NI) a été observé jusqu'à 35 cm. Au-delà de cette limite, peu ou pas de prélèvement a été mesuré. Dans la parcelle irriguée, les courbes stagnent littéralement jusqu'à la première irrigation du 18 juillet. Par la suite, un certain prélèvement est mesuré. Au courant de la dernière période, l'évolution du statut hydrique du sol selon le traitement a été encore une fois très différente. Après la 2^e coupe, les sondes en surface ont été réinstallées. Un prélèvement en eau dans l'horizon 0-30 cm du traitement irrigué est continu. Malheureusement, le manque de données de la sonde 0-30 cm du traitement non irrigué ne permet pas de comparer les statuts hydriques. Encore une fois, le prélèvement est limité au-delà de 30 cm, peu importe le traitement. La comparaison entre les traitements en ce qui a trait au prélèvement en eau durant cette période est globalement très limitée.

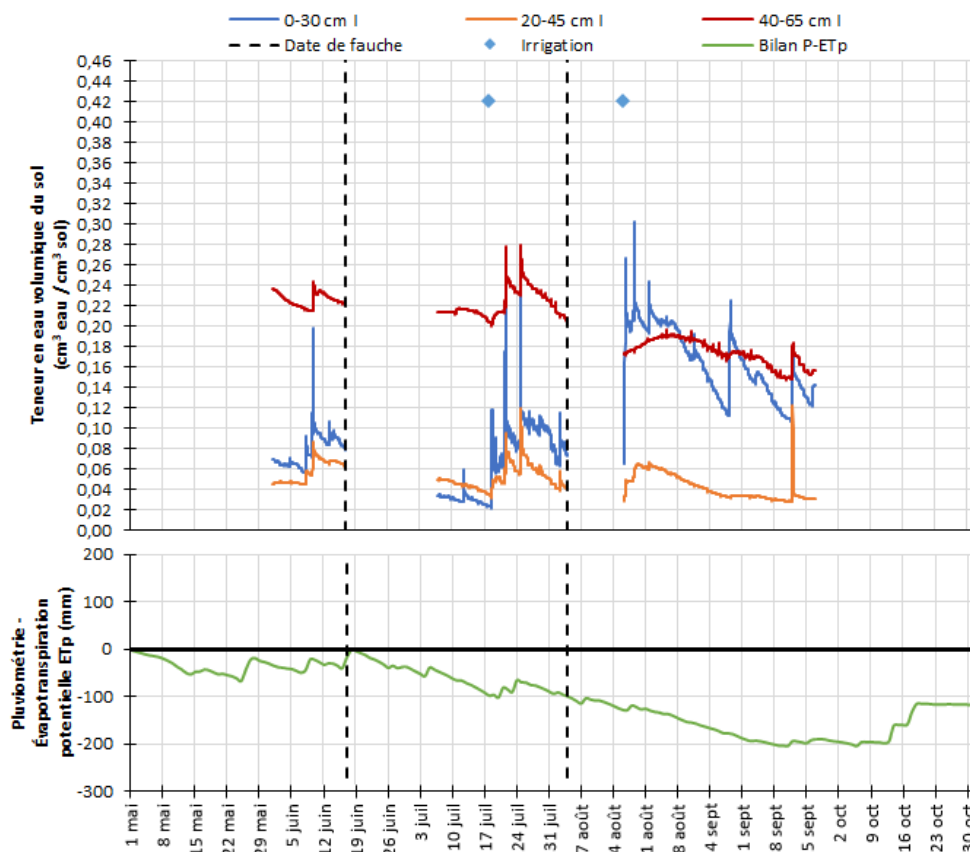


Figure 29. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm³ eau / cm³ sol) et bilan pluviométrie-ET_p (P-ET_p) (mm), traitement irrigué selon la profondeur au site Saint-Germain2, saison 2022.

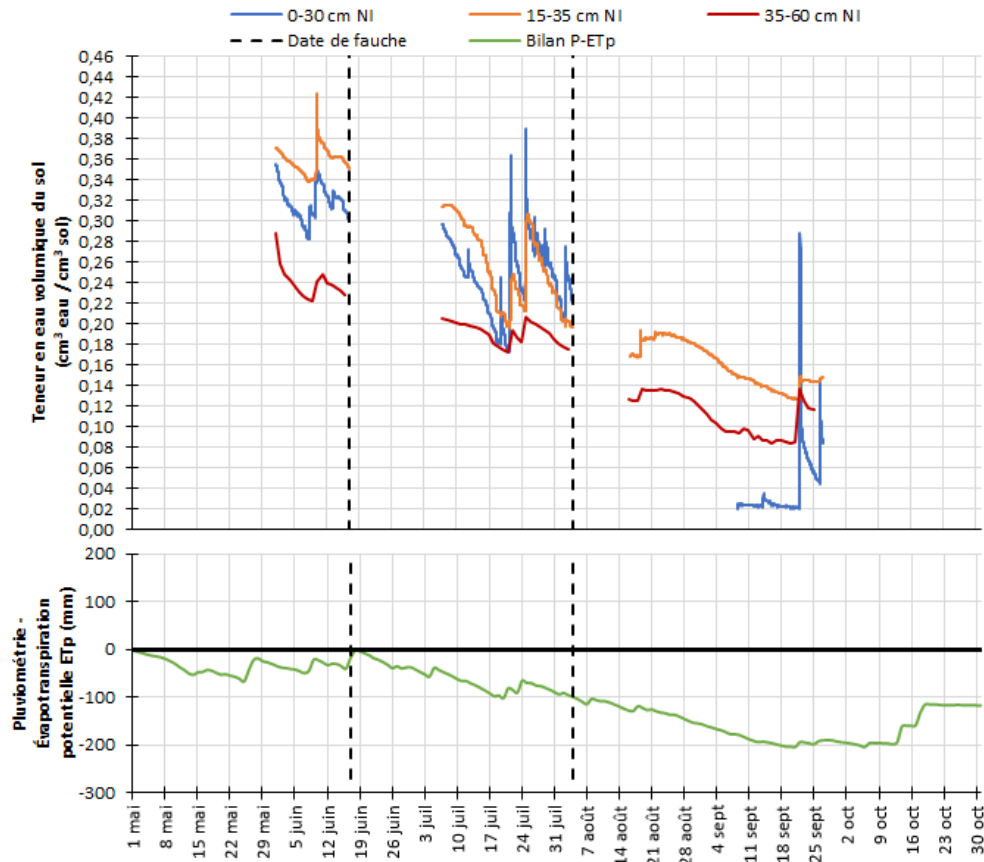


Figure 30. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) et bilan pluviométrie- ET_p ($\text{P}-\text{ET}_p$) (mm), traitement non irrigué selon la profondeur au site Saint-Germain2, saison 2022.

Finalement, pour la saison 2023, le statut hydrique du sol entre les traitements s'est différencié durant la 1^{re} période seulement (Figure 31, avec irrigation et Figure 32, sans irrigation). Durant cette période, l'irrigation du 31 mai a permis de rehausser le statut hydrique du sol. Le prélèvement en eau de la culture pour le traitement irrigué a ainsi été plus important jusqu'aux précipitations du 6 juin. Ceci est particulièrement marqué dans l'horizon 0-30 cm où les prélèvements sont beaucoup plus importants que dans le traitement non irrigué. Durant la 1^{re} période, un prélèvement en profondeur, soit 40-65 cm et 35-60 cm a été observé jusqu'à la fin mai, pour ensuite devenir plus discret durant la 2^e période alors que la teneur en eau du sol était basse et quasi hors de portée des précipitations. À la 2^e et 3^e période, l'évolution du statut hydrique entre les traitements a été assez similaire et le recours à l'irrigation n'a pas été justifié.

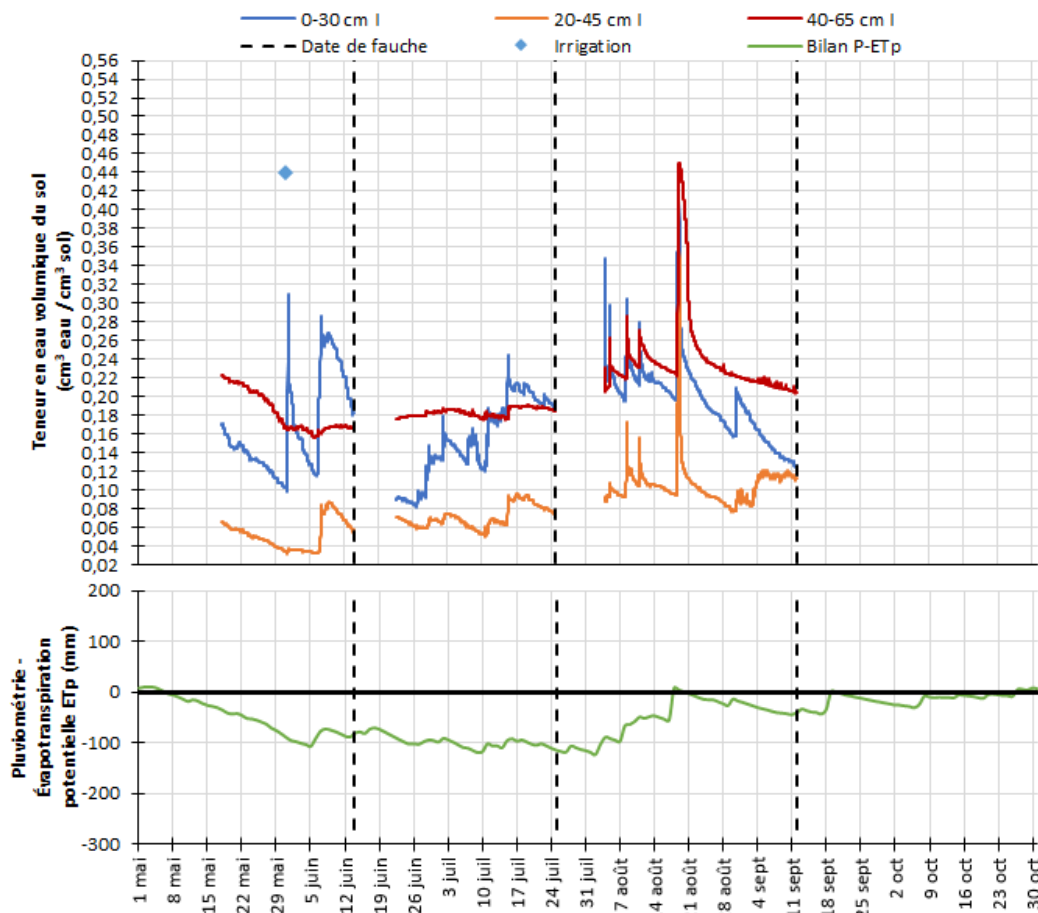
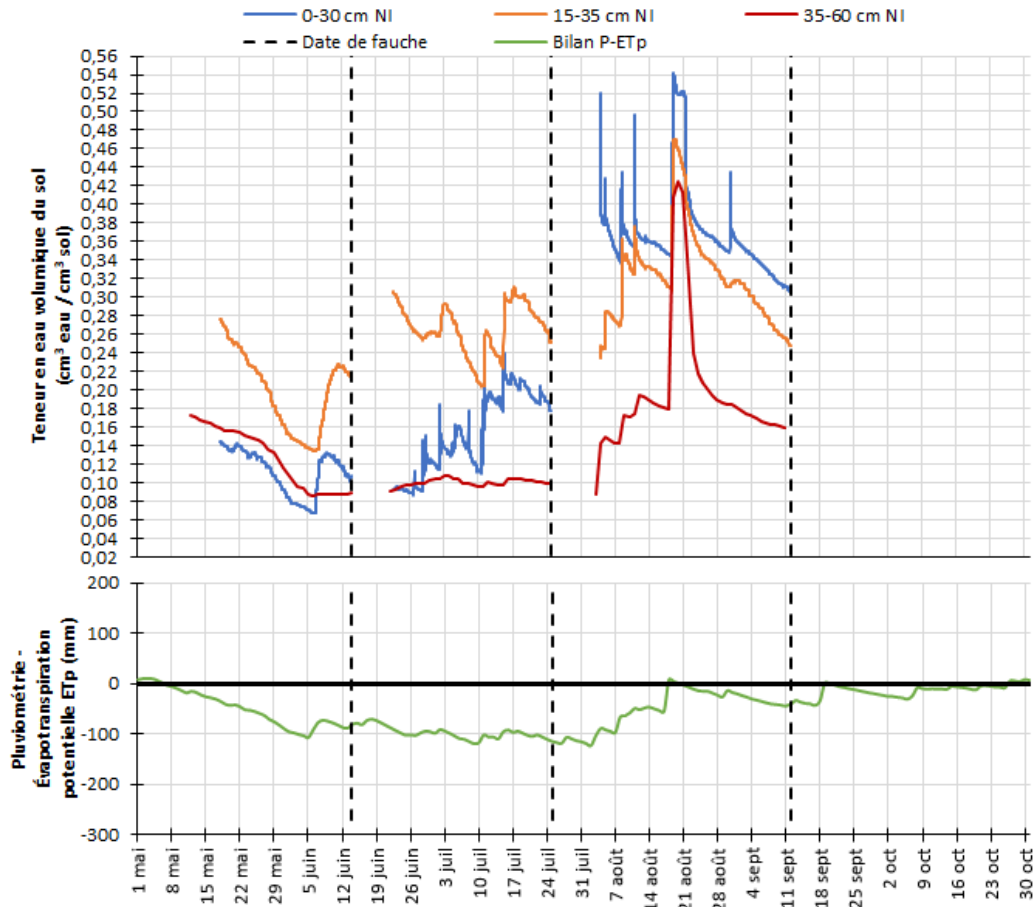


Figure 31. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) et bilan pluviométrie-ET_p (P-ET_p) (mm), traitement irrigué selon la profondeur au site Saint-Germain2, saison 2023.



4.1.2.4.2.4 Évapotranspiration de la culture (ET_c) et coefficients culturaux (K_c)

L' ET_{C-TDR} et les K_{C-TDR} sont respectivement présentés aux Figure 33, Figure 34 et Figure 35 et (2022 et 2023). Au site Saint-Germain2, les K_{C-TDR} de la saison 2022 ont atteint des valeurs entre 0,11 et 1,21 (Figure 34). Des valeurs maximales entre 1 et 1,2 ont également été atteintes peu de temps avant les coupes. En 2023, davantage de données ont pu être calculées (Figure 35).

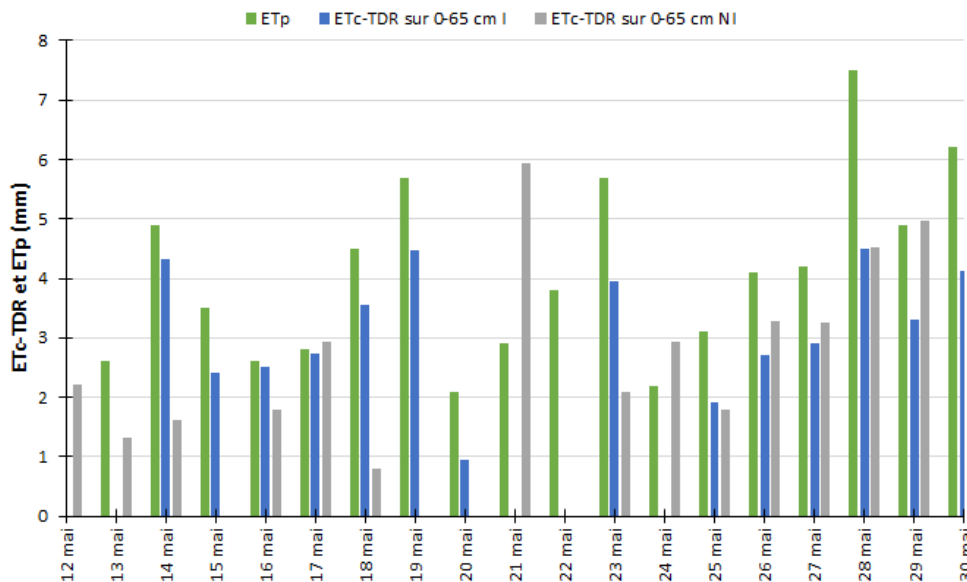


Figure 33. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_{c-TDR}) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près, site Saint-Germain2, 12 au 30 mai 2023.

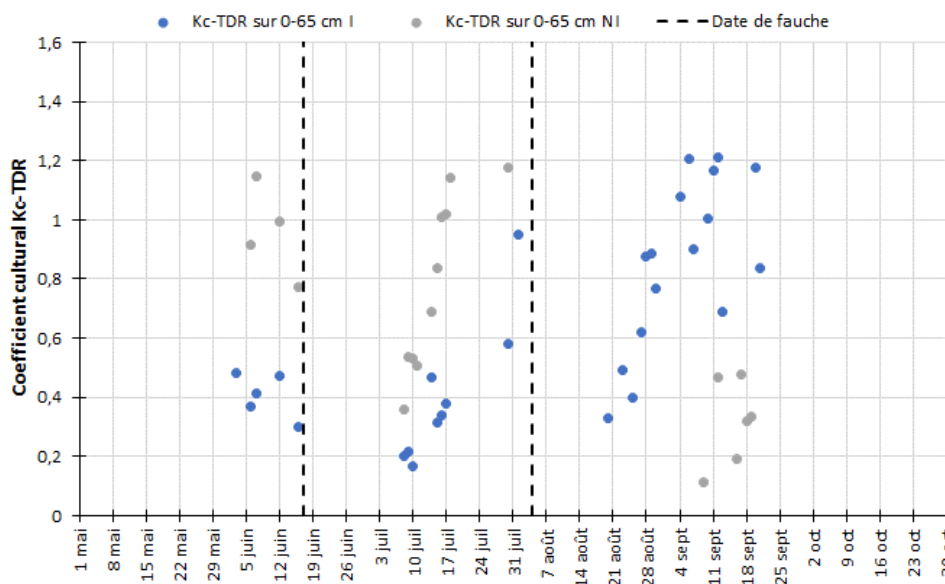


Figure 34. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Saint-Germain2, saison 2022 (bleu = irrigué et gris = non irrigué).

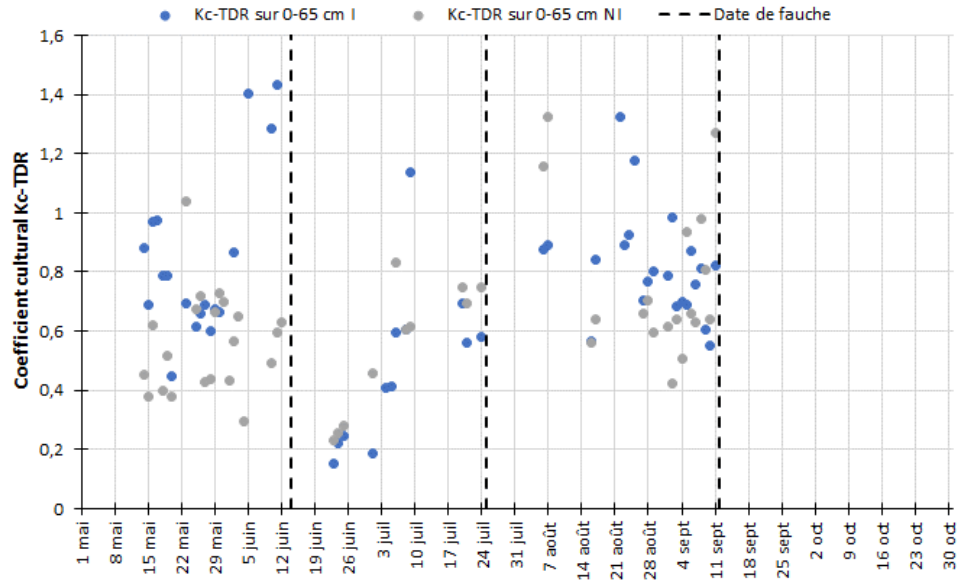


Figure 35. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Saint-Germain2, saison 2023.

4.1.2.4.3 Sites Soya 2021 à 2023

4.1.2.4.3.1 Pluviométrie

La pluviométrie a été comptabilisée de manière cumulative entre les dates de semis et de récolte. Ces valeurs ont été comparées aux valeurs minimales et maximales de la station d'Agrométéo Québec la plus près. Cet exercice a été réalisé pour chacun des sites en culture de soya, annuellement. Les précipitations cumulatives pour la durée de la saison de croissance du soya sont présentées aux Figure 36, Figure 37 et Figure 38, respectivement pour les saisons 2021, 2022 et 2023.

En 2021, le cumulatif a débuté du 8 mai s'est terminé avec la récolte (21 septembre) (Figure 36). Le cumulatif pour cette période a atteint 397,3 mm et se situe à l'intérieur des valeurs minimale et maximale mesurées par la station météorologique d'Agrométéo Québec pour cette même période. Toutefois, il a terminé sa course assez près de la valeur minimale pour la période qui s'est établie à 378,1 mm. La saison s'est articulée en trois temps. Du semis jusqu'au 26 juin, le cumulatif de cette période a été très près des valeurs minimales. Par la suite, de bonnes précipitations ont eu lieu jusqu'à la fin du mois de juillet. Finalement, la dernière période a été marquée par l'absence de précipitation et ce n'est qu'à partir du mois de septembre où de la pluie a de nouveau été enregistrée de manière substantielle.

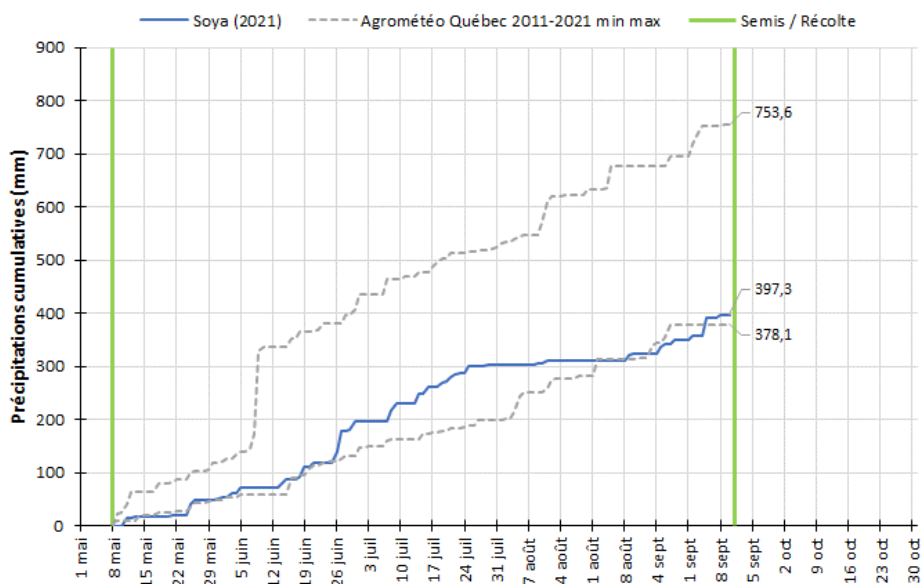


Figure 36. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2021 (mm) en fonction du semis et de la récolte, site Soya, saison 2021.

En 2022, la saison s'est étalée entre le 14 mai et le 19 octobre (Figure 37). Le cumulatif de la saison 2022 a été de 651,6 mm. Pour cette saison, la valeur minimale pour la période 2011-2022 s'est établie à 465,2 mm et la valeur maximale à 774,9 mm. Les précipitations ont été rythmées au courant de la saison, hormis pour la période comprise entre le 22 juillet et le 6 août (plateau). La saison 2023 a été une saison particulière (Figure 38). Sur la durée de la saison (11 mai au 2 octobre), le cumulatif s'est élevé à 570,5 mm, une valeur moyenne. Pour cette période, le cumulatif minimum s'est établi à 381,3 mm tandis que le maximum a culminé à 751,8 mm. Le début de la saison a été plutôt sec avec des précipitations cumulatives qui ont suivi la tendance de la valeur minimale jusqu'au 9-10-11 juillet où des précipitations importantes se sont abattues (147,1 mm). Le reste de la saison a ensuite été marqué par de bonnes précipitations.

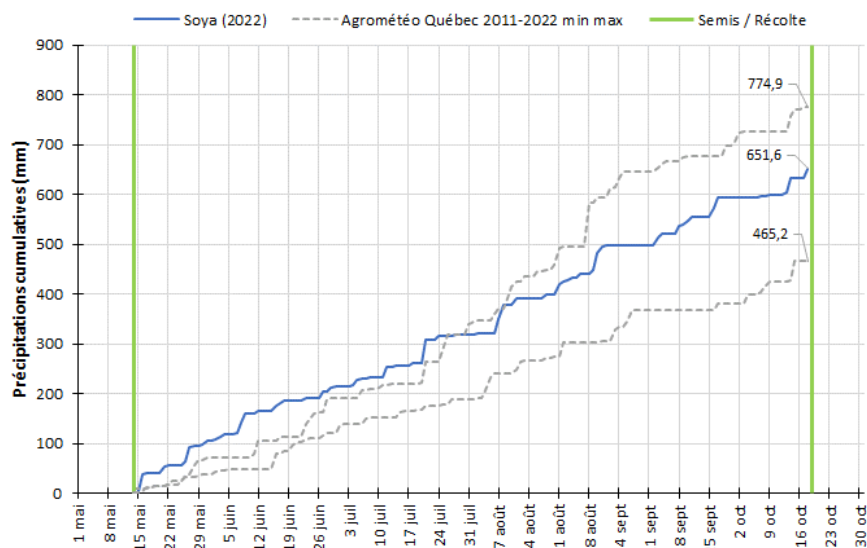


Figure 37. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2022 (mm) en fonction du semis et de la récolte, site Soya, saison 2022.

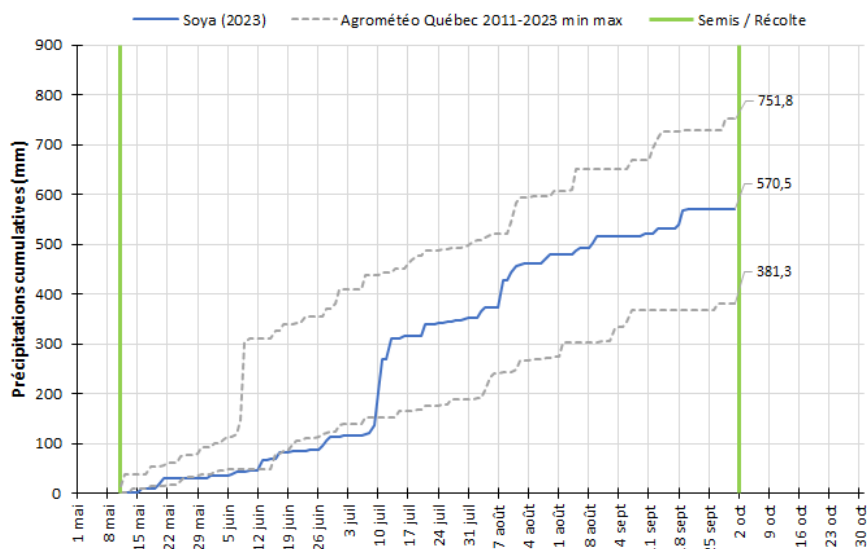


Figure 38. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2023 (mm) en fonction du semis et de la récolte, site Soya, saison 2023.

4.1.2.4.3.2 Évapotranspiration potentielle (ET_p)

L'évapotranspiration potentielle a également été cumulée entre le semis et la récolte. Les données de 2021 à 2023 sont respectivement présentées aux Figure 40 et Figure 41.

En 2021, le cumulatif de l'ET_p s'est situé assez près de la valeur minimale (Figure 39). En effet, entre le 8 mai et le 21 septembre, l'ET_p cumulatif a atteint 475,3 mm, soit 12,6 mm de plus que la valeur minimale. La saison 2022 a poursuivi cette tendance avec un cumulatif qui a établi la valeur minimale pour la période entre 2011 et 2022 (Figure 40). Le cumulatif a atteint 455,7 mm. Finalement, la saison 2023 n'a pas fait exception aux autres saisons (Figure 41). Cette saison a établi aussi une marque minimale pour la période entre 2011 et 2023 avec un cumulatif qui a atteint 433,5mm.

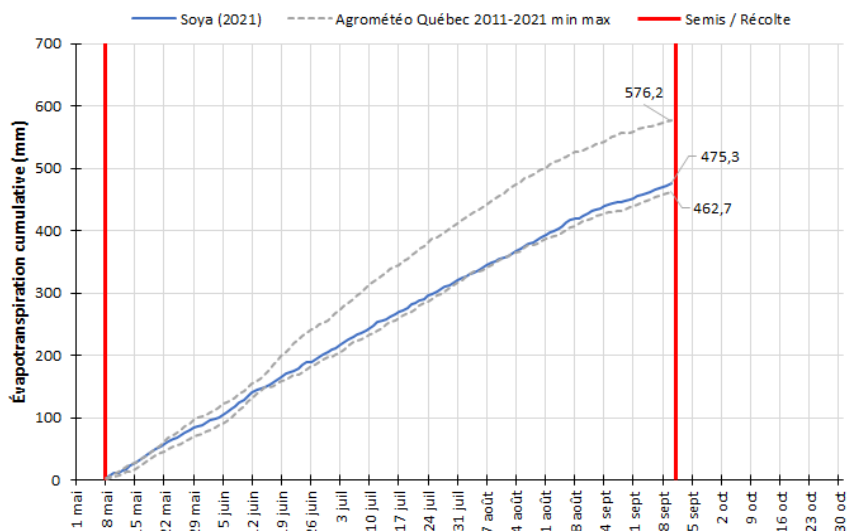


Figure 39. Évapotranspiration potentielle cumulée (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Deschambault SM entre 2011 et 2021 (mm) en fonction du semis et de la récolte, site Soya, saison 2021

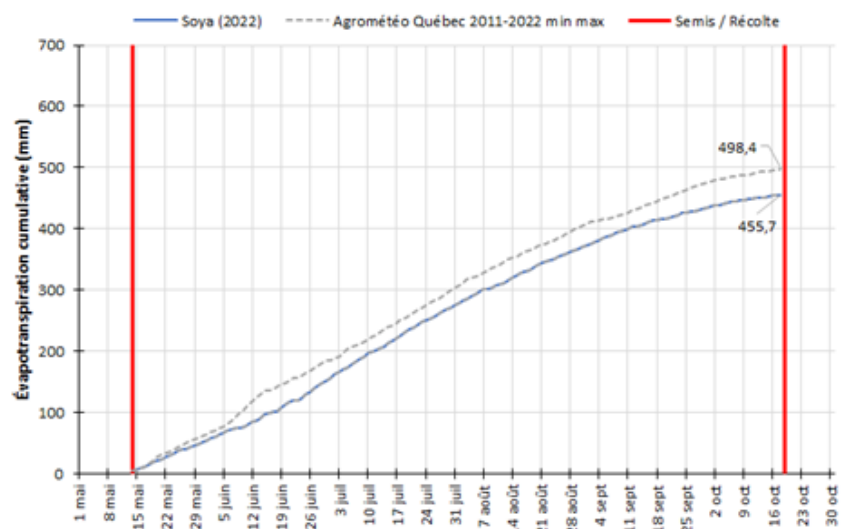


Figure 40. Évapotranspiration potentielle cumulée (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Deschambault SM entre 2011 et 2022 (mm) en fonction du semis et de la récolte, site Soya, saison 2022.

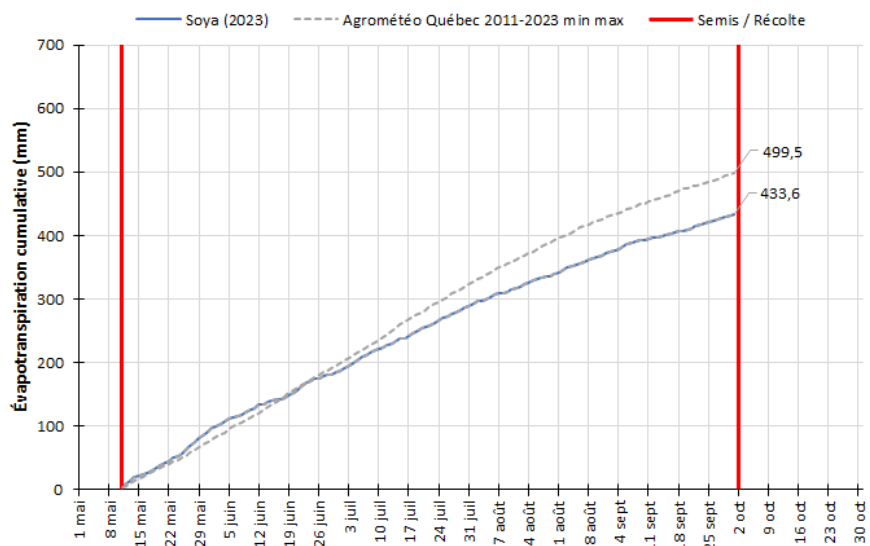


Figure 41. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Deschambault SM entre 2011 et 2023 (mm) en fonction du semis et de la récolte, site Soya, saison 2023.

4.1.2.4.3 Suivi du statut hydrique du sol par TDR

L'évolution du statut hydrique du sol au site Soya, en 2021, entre les traitements a été très similaire de la plantation jusqu'au début août, tant en contexte irrigué (Figure 42) que non irrigué (Figure 43). Les irrigations effectuées au courant de juin ont été suivies par des précipitations et des dernières ont permis de rehausser le statut hydrique du sol des parcelles non irriguées à un seuil comparable aux parcelles irriguées. Un contraste a été observé entre les deux traitements à partir d'août où les courbes se sont distancées considérablement. Un plateau (aucune variation de la teneur en eau volumique du sol) a même été observé du 28 au 30 août dans la parcelle non irriguée.

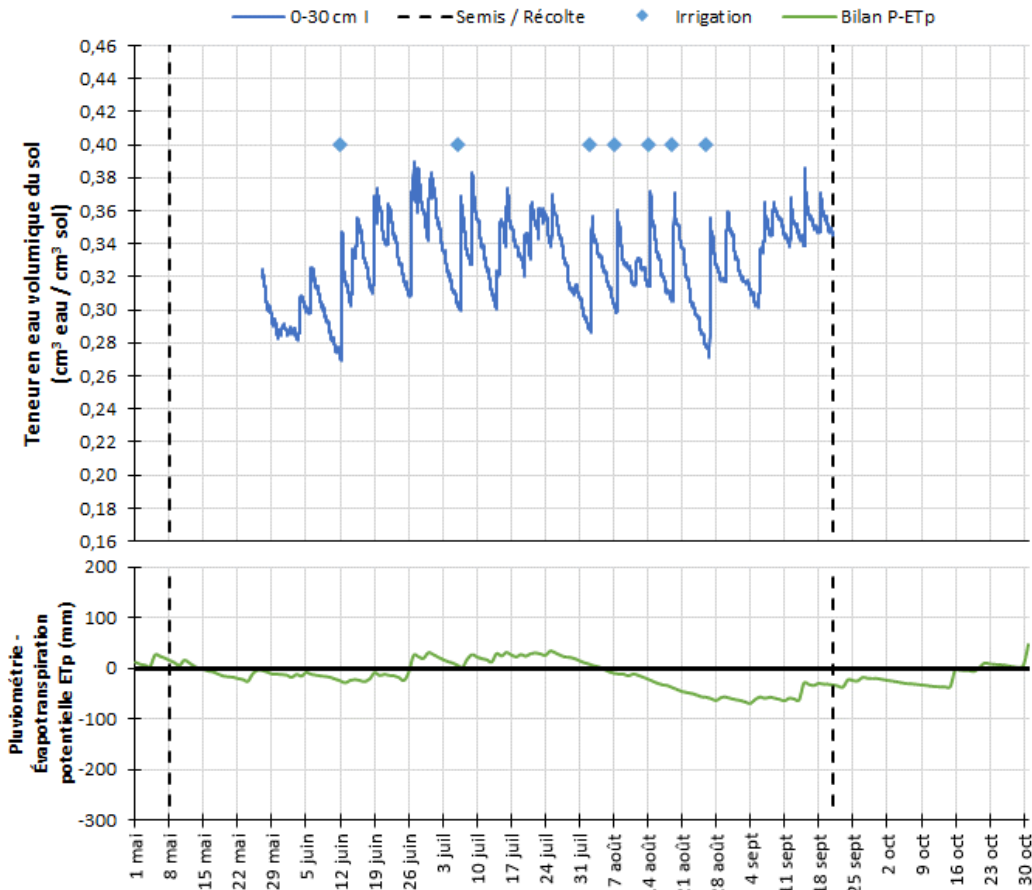


Figure 42. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) et bilan pluviométrie-ET_p (P-ET_p) (mm), traitement irrigué selon la profondeur au site Soya, saison 2021.

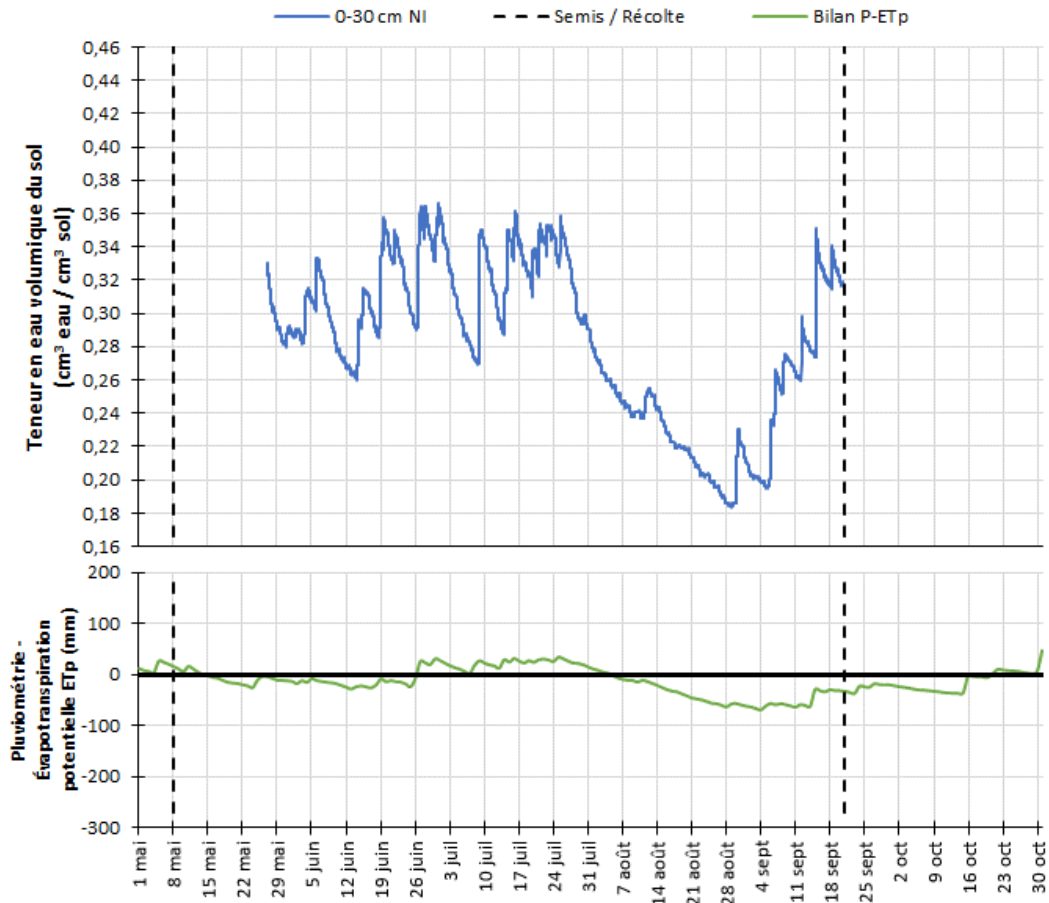


Figure 43. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) et bilan pluviométrie- ET_p ($\text{P}-\text{ET}_p$) (mm), traitement non irrigué selon la profondeur au site Soya, saison 2021.

Pour la saison 2022, les suivis du statut hydrique du sol selon les traitements sont présentés aux Figure 44 et Figure 45, respectivement en contexte avec et sans irrigation. Au début de la saison, le prélèvement en eau s'est observé principalement dans l'horizon 0-30 cm. Par la suite, un prélèvement plus en profondeur a été constaté. La 1^{re} irrigation a eu lieu le 1^{er} août et la 2^e, le 16 août. À partir du début du mois d'août, le prélèvement des plants de la parcelle non irriguée a ralenti en comparaison avec ceux de la parcelle irriguée. Durant cette période, le prélèvement des plants de la parcelle non irriguée dans l'horizon 30-60 cm s'est poursuivi et même accéléré à partir du 4 août, et ce, jusqu'à la prochaine pluie. Un autre plateau (peu de variation de la teneur en eau volumique du sol) a été observé à partir du 8 septembre dans la parcelle non irriguée (principalement 0-30 cm).

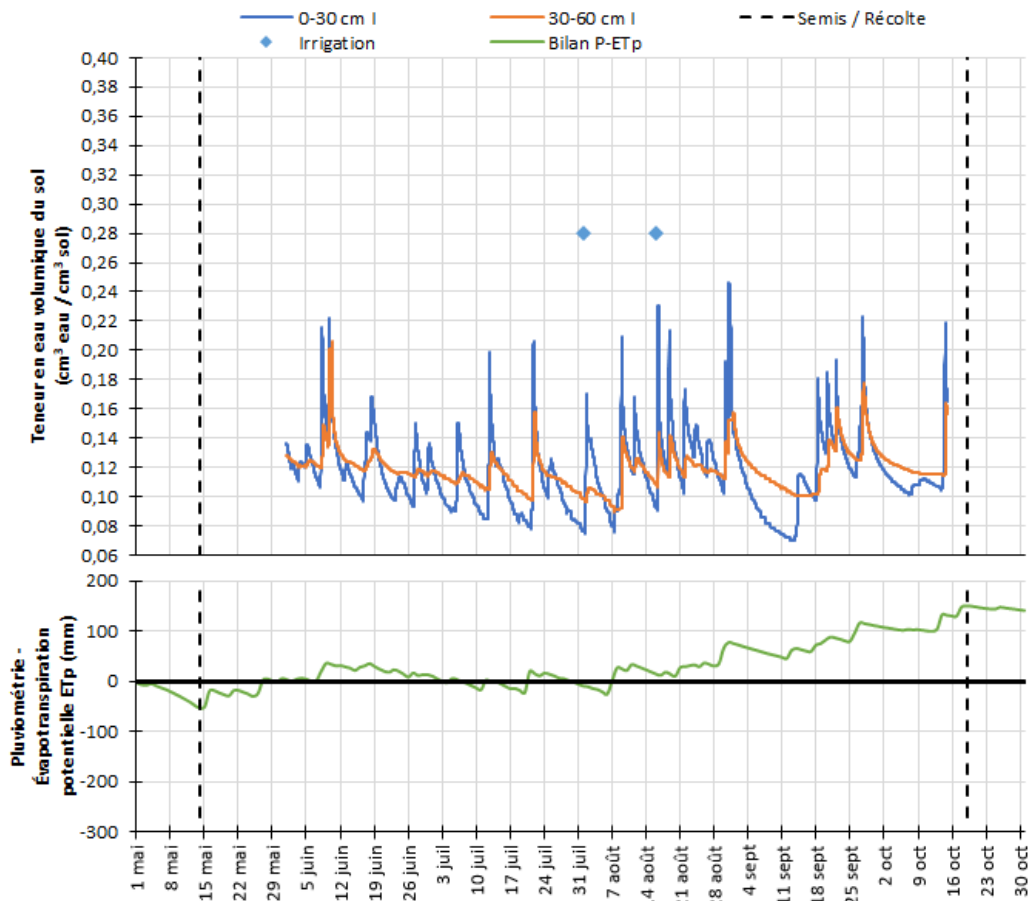


Figure 44. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) et bilan pluviométrie- ET_p (P-ET_p) (mm), traitement irrigué selon la profondeur au site Soya, saison 2022.

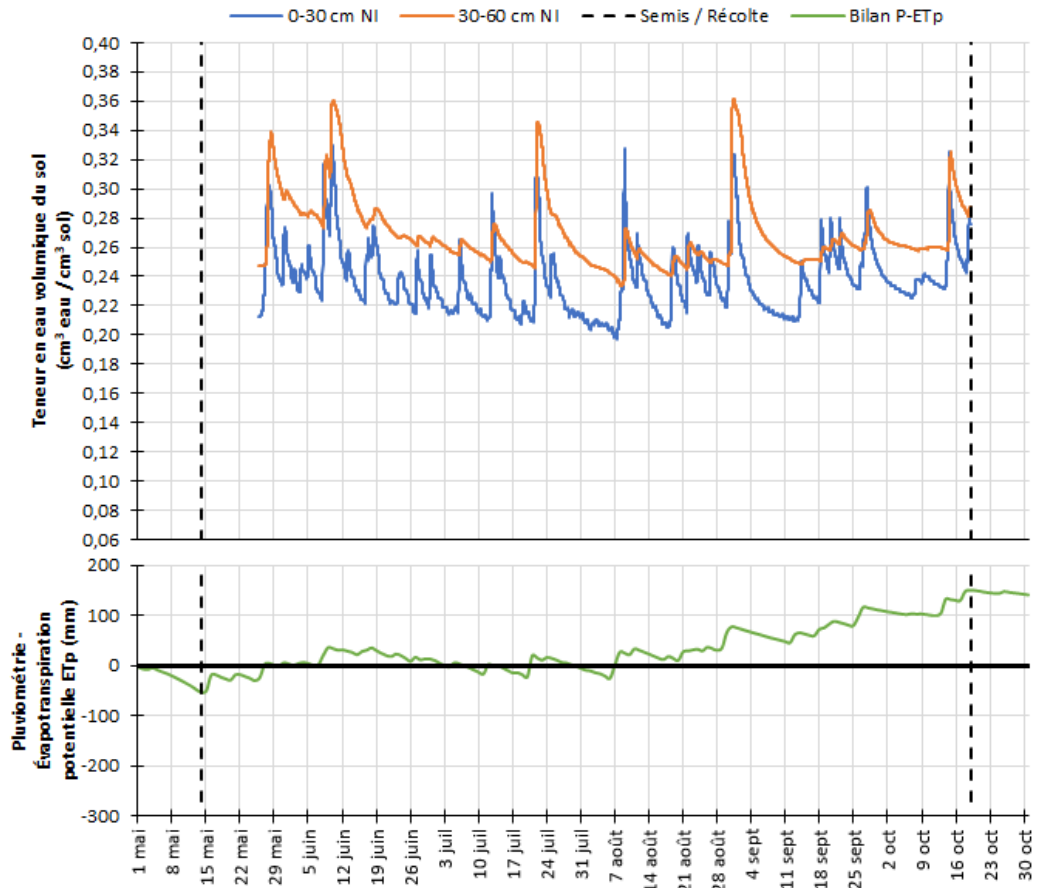


Figure 45. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) et bilan pluviométrie- ET_p ($\text{P}-\text{ET}_p$) (mm), traitement non irrigué selon la profondeur au site Soya, saison 2022.

Finalement, pour la saison 2023, il n'y a pas eu d'épisode d'irrigation. Le statut hydrique du sol a donc été comparable entre les parcelles avec (Figure 46) et sans irrigation (Figure 47).

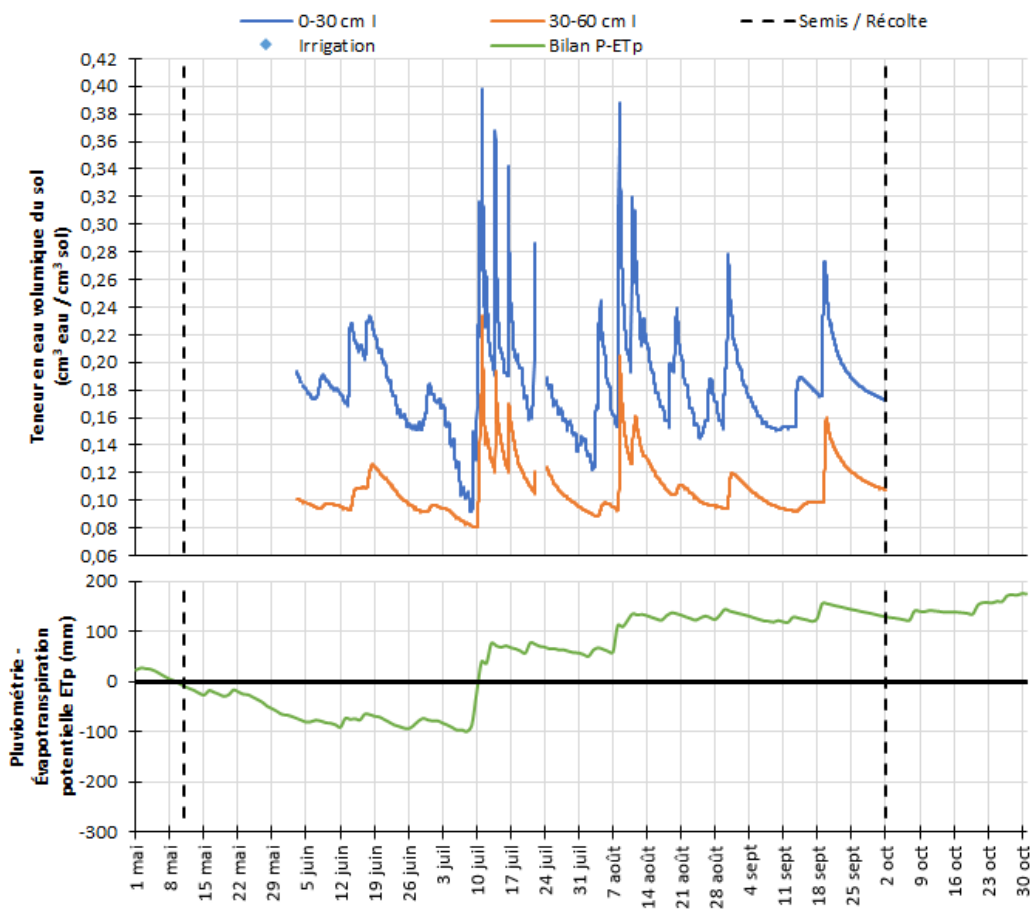
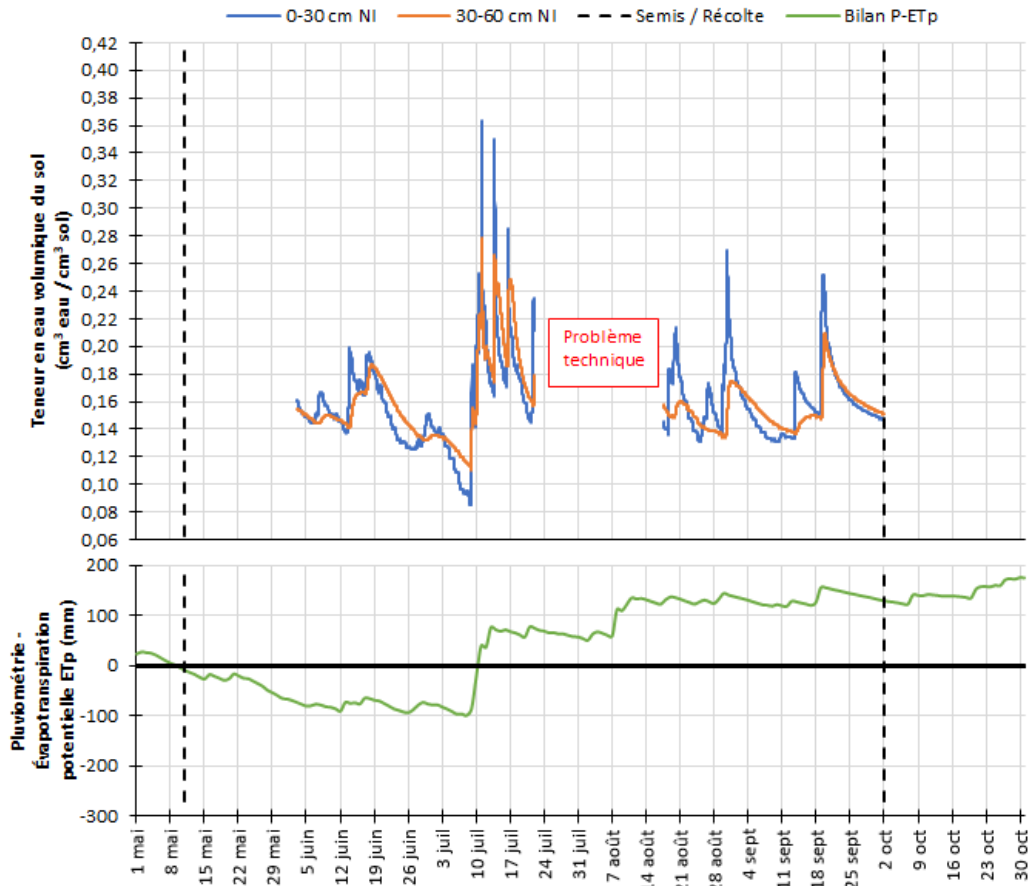


Figure 46. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) et bilan pluviométrie-ET_p (P-ET_p) (mm), traitement irrigué selon la profondeur au site Soya, saison 2023.



4.1.2.4.3.4 Évapotranspiration de la culture (ET_c) et coefficients culturaux (K_c)

L' ET_{c-TDR} et les K_{c-TDR} sont présentés de la Figure 49 à la Figure 55. Au début de la saison 2021, le prélèvement en eau entre les traitements a été assez comparable (Figure 47). Par la suite, une divergence a pu être observée entre les traitements. Les K_{c-TDR} du traitement non irrigué ont été inférieurs à ceux du traitement irrigué et ont suivi une tendance décroissante dès le début d'août. Les prélèvements en eau plus faible du traitement non irrigué se sont poursuivis pratiquement durant tout le mois d'août. Ce phénomène est clairement attribuable à une contrainte de prélèvement en eau puisque le suivi du prélèvement en eau du 1^{er} au 15 juillet avait démontré une capacité équivalente ou supérieure du traitement non irrigué à prélever de l'eau (Figure 49). Globalement, un coefficient cultural maximal de l'ordre de 1 a été mesuré au courant de la saison 2021.

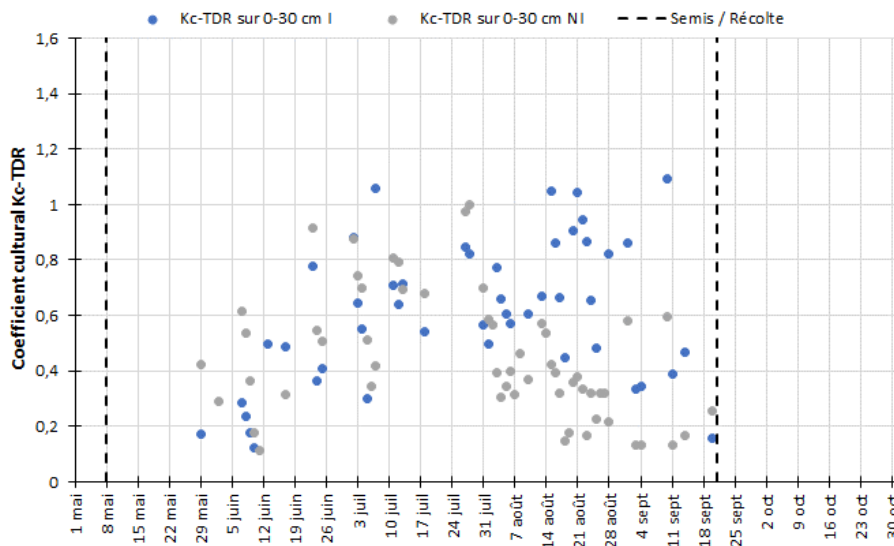


Figure 48. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Soya, saison 2021 (bleu = irrigué et gris = non irrigué).

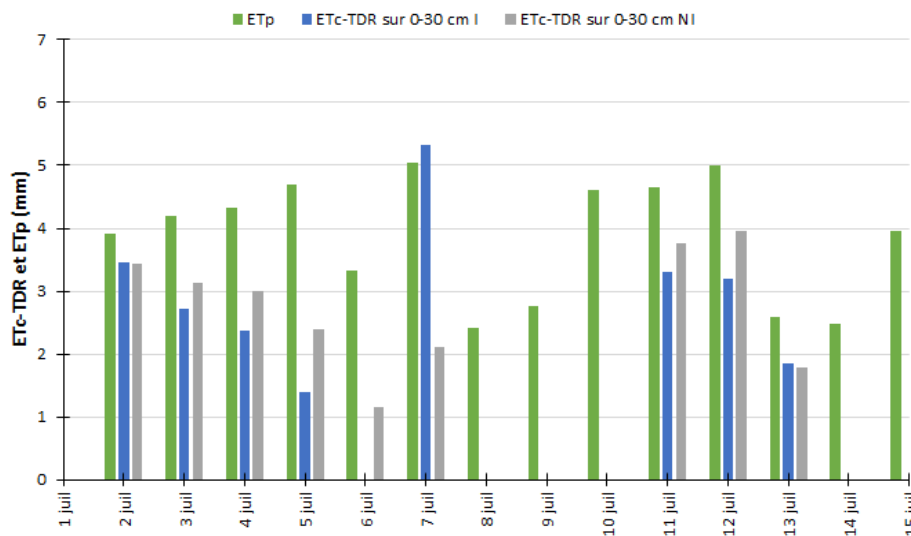


Figure 49. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_{c-TDR}) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près, site Soya, 1^{er} au 15 juillet 2021.

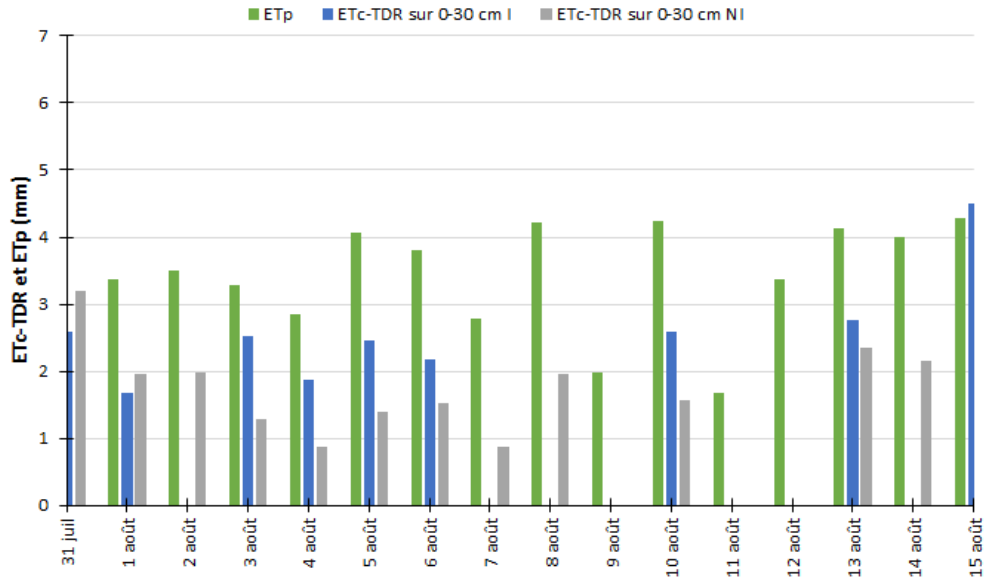


Figure 50. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c-TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près, site Soya, 31 juillet au 14 août 2021.

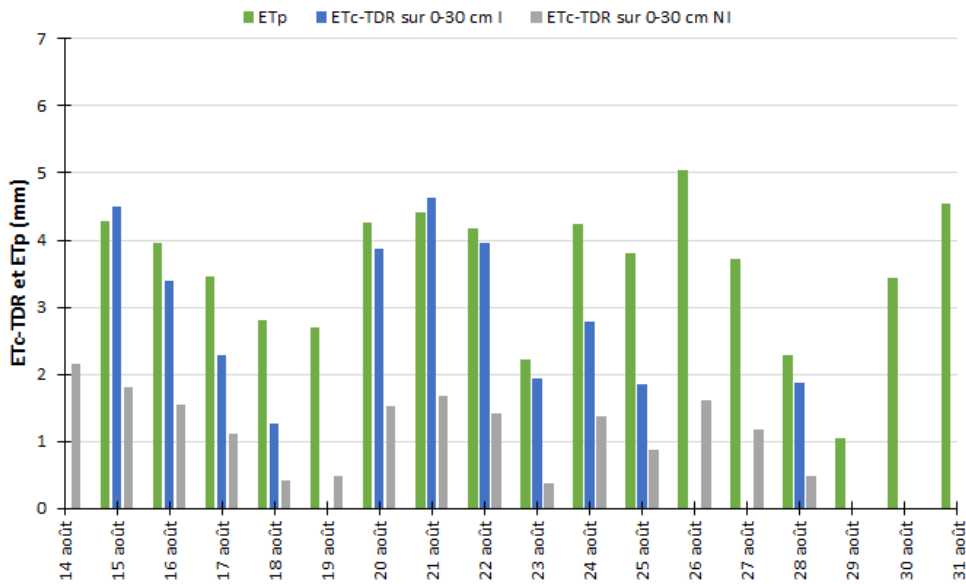


Figure 51. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c-TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près, site Soya, 14 au 31 août 2021.

En 2022, peu de différence entre les traitements a été mesurée. Une période de contrainte de prélèvement a été observée au début du mois de septembre, et ce, pour les deux traitements (Figure 52).

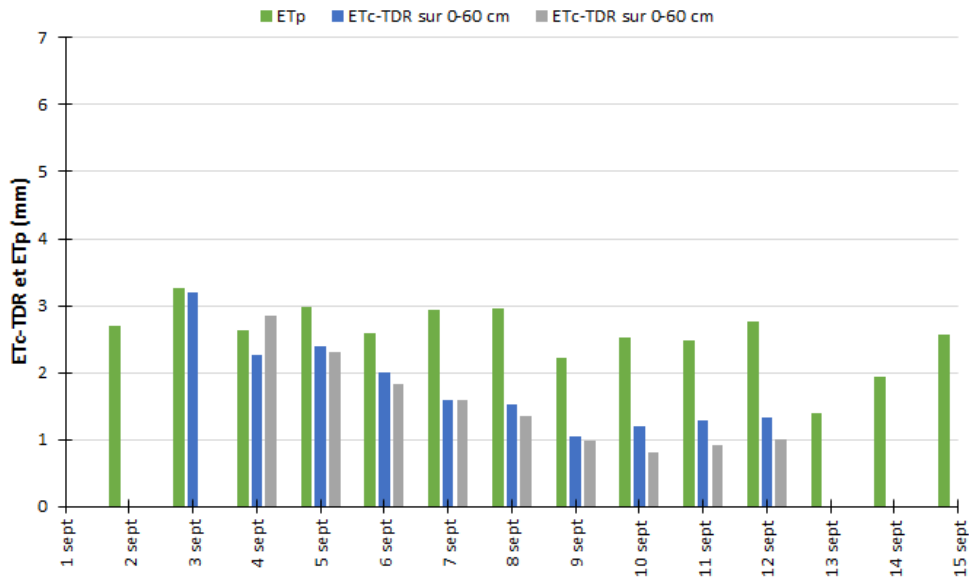


Figure 52. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près, site Soya, 1^{er} au 15 septembre 2022.

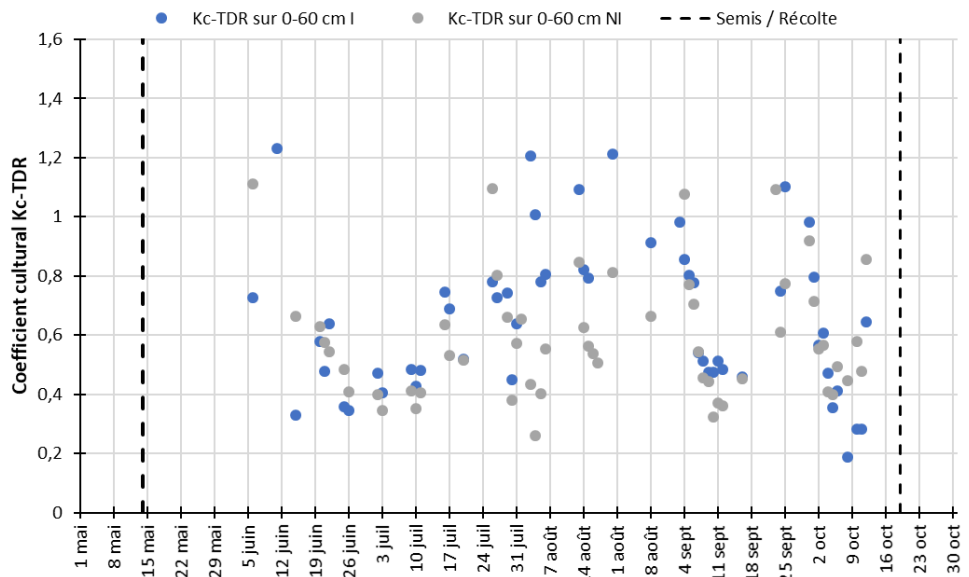


Figure 53. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Soya, saison 2022 (bleu = irrigué et gris = non irrigué).

En 2023, il n'a y aucune différence de prélèvement entre les traitements. Des K_{c-TDR} maximaux de l'ordre de 1,2 ont été mesurés, une valeur légèrement supérieure aux saisons antérieures.

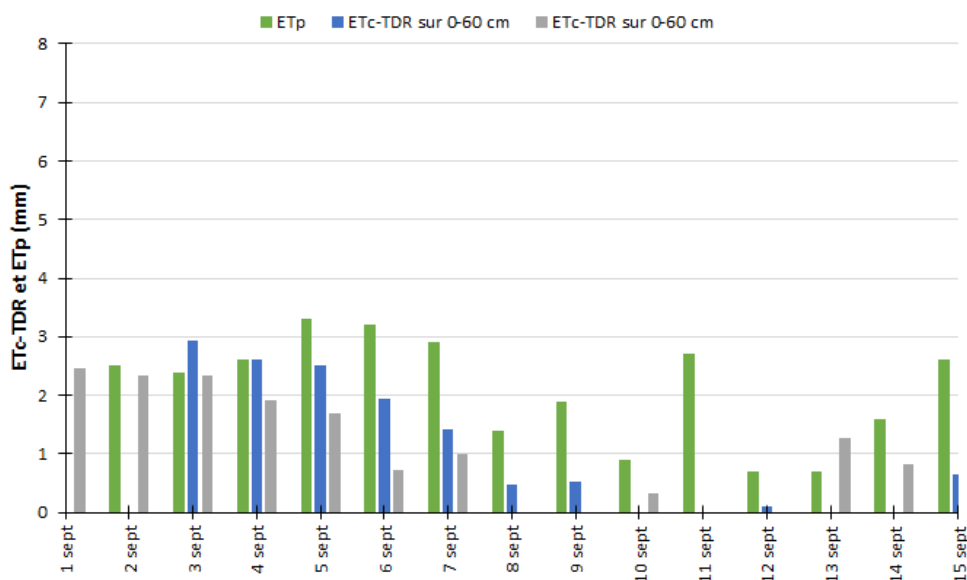


Figure 54. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_c -TDR) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station d'Agrométéo Québec la plus près, site Soya, 1^{er} au 15 septembre 2023.

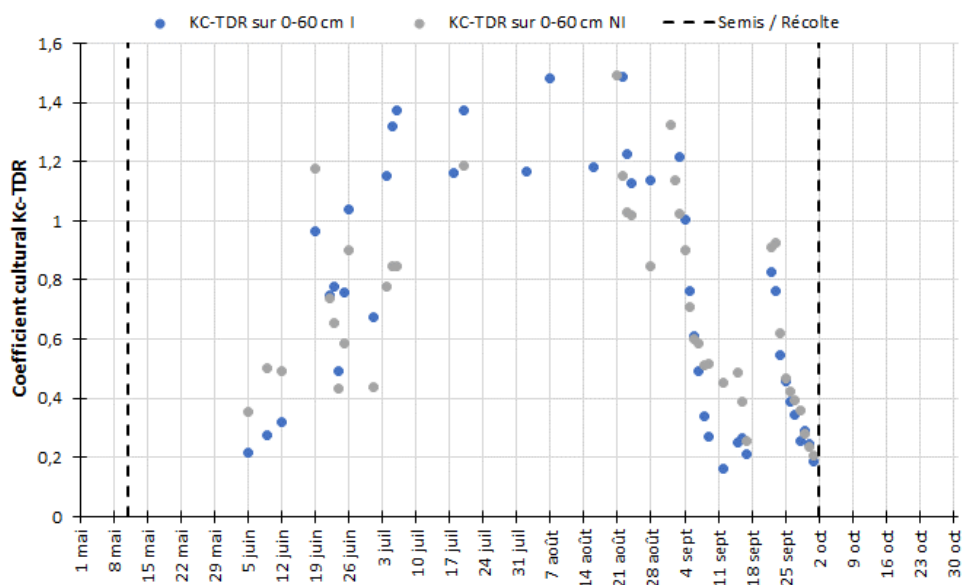


Figure 55. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Soya, saison 2023 (bleu = irrigué et gris = non irrigué).

4.1.2.4.4 Site Maïs-grain 2021 à 2023

4.1.2.4.4.1 Pluviométrie

La pluviométrie cumulative, entre la date du semis et celle de la récolte, a été comparée aux valeurs minimales et maximales de la station d'Agrométéo Québec la plus près du site. Cet exercice a été réalisé pour chacun des sites en culture de maïs-grain, annuellement. Les précipitations cumulatives pour la saison de croissance du maïs-grain sont présentées aux Figure 56, Figure 57 et Figure 58, respectivement pour les saisons 2021, 2022 et 2023.

En 2021, le cumul des précipitations a débuté le 1^{er} mai et s'est terminé avec la récolte du 13 octobre (Figure 56). Le cumulatif pour cette période a atteint 470,3 mm, soit sous la valeur minimale mesurée par la station météorologique d'Agrométéo Québec pour cette même période (484,4 mm). Du 1^{er} mai jusqu'au 26 juin, le cumulatif de cette période a été très près des valeurs minimales. Par la suite, de bonnes précipitations ont eu lieu jusqu'à la fin du mois de juillet. Finalement, la dernière période a été marquée par l'absence de précipitation et ce n'est qu'à partir du mois de septembre où des précipitations ont à nouveau été enregistrées de manière substantielle. La période entre le 24 juillet et le 4 septembre a particulièrement été marquée par l'absence de précipitations.

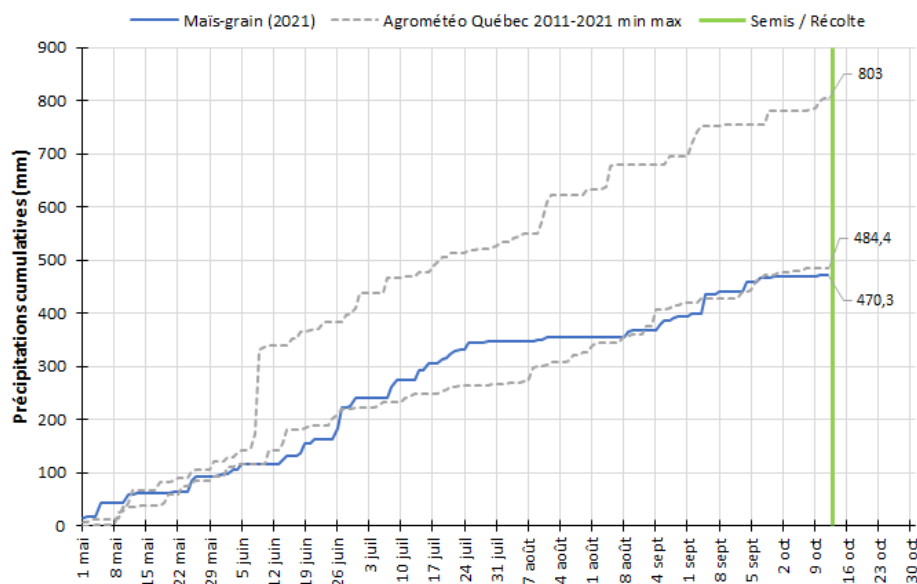


Figure 56. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2021 (mm), entre le 1^{er} mai et la récolte, site Maïs-grain, saison 2021.

En 2022, la saison s'est étalée entre le 13 mai et le 27 octobre (Figure 57). Le cumulatif de la saison 2022 a été de 660,4 mm. La valeur minimale pour la période 2011-2022 s'est établie à 484,8 mm et la valeur maximale à 801,3 mm. Les précipitations ont été rythmées au courant de la saison, hormis pour la période entre le 22 juillet et le 6 août (plateau). Les conditions de 2023 ont été les mêmes qu'au site en soya (Figure 58). Pour la saison complète (7 mai au 30 octobre), le cumulatif s'est élevé à 641,7 mm, une valeur moyenne. Pour cette période, le cumulatif minimum s'est établi à 527,6 mm, tandis que le maximum a culminé à 891,5 mm. Le début de la saison a été plutôt sec avec des précipitations cumulatives qui ont suivi la tendance de la valeur minimale jusqu'au 9-10-11 juillet, où des précipitations importantes ont été mesurées (147,1 mm). Le reste de la saison a été marqué par de bonnes précipitations.

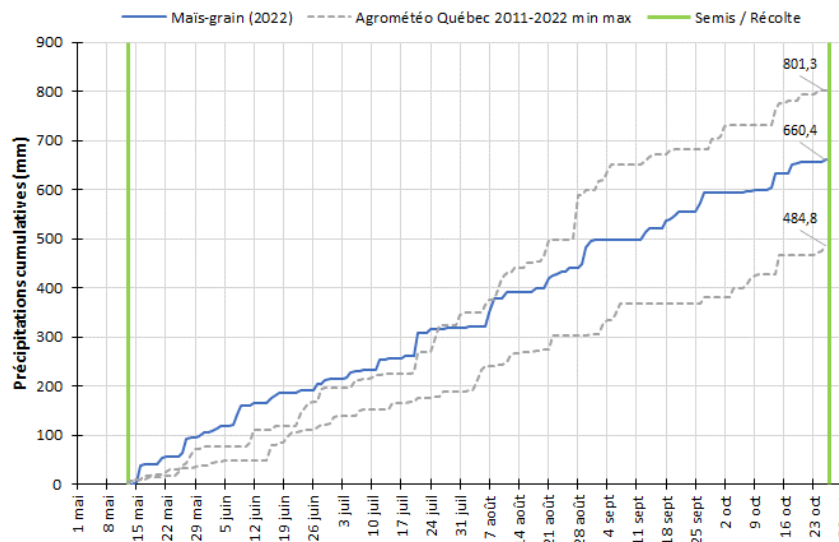


Figure 57. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2022 (mm) en fonction du semis et de la récolte, site Maïs-grain, saison 2022.

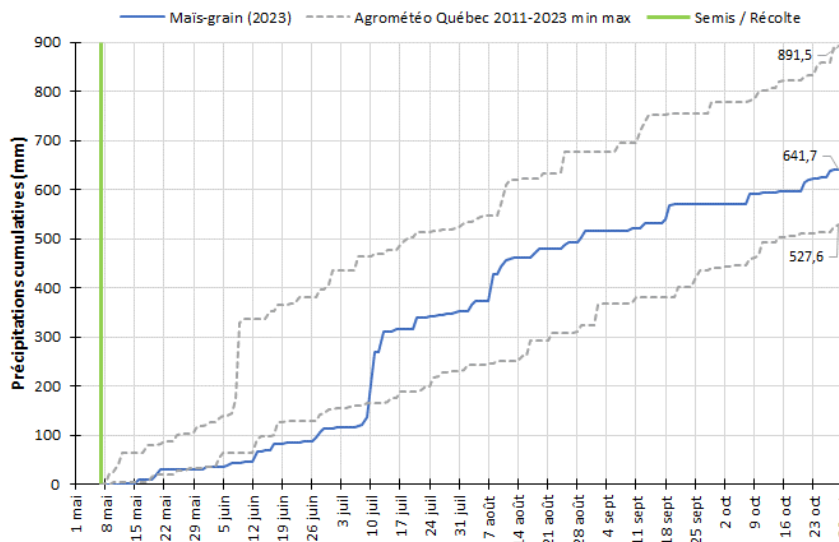


Figure 58. Précipitations cumulatives (mm) mesurées au site, précipitations minimale et maximale cumulatives à la station d'Agrométéo Québec la plus près entre 2011 et 2023 (mm) en fonction du semis et de la récolte, site Maïs-grain, saison 2023.

4.1.2.4.4.2 Évapotranspiration potentielle (ET_p)

L'évapotranspiration potentielle a été cumulée du semis jusqu'à la récolte, tout comme les précipitations. Les données de 2021 à 2023 sont respectivement présentées aux Figure 59, Figure 60 et Figure 61. En 2021, le cumulatif de l'ET_p s'est situé dans la fourchette inférieure des valeurs. Le cumulatif pour la saison a atteint 523,8 mm, soit assez près de la valeur minimale qui s'est élevée à 515,2 mm. Pour 2022, le cumulatif de l'ET_p pour la saison a établi la valeur minimale pour la période entre 2011 et 2022. Précisément, le cumulatif a atteint 471,5 mm. Au courant de la même période, le cumulatif maximal s'est élevé à 513,0 mm. Finalement, en 2023, le cumulatif de l'ET_p, a suivi une tendance très similaire à 2022. Un cumulatif minimal a donc été fixé pour la période entre 2011 et 2023. Cette valeur minimale s'est donc élevée à 483,5 mm. À titre de comparaison, la valeur maximale pour cette même période s'est établie à 562,1 mm.

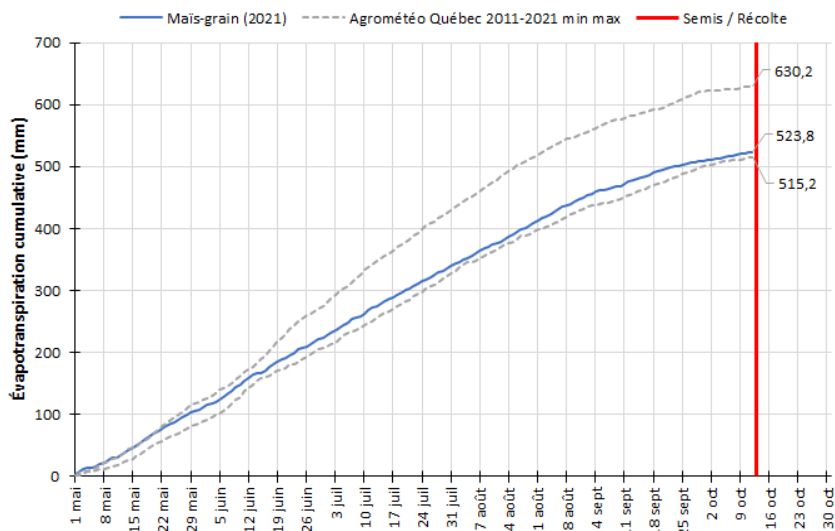


Figure 59. Évapotranspiration potentielle cumulée (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimales et maximales cumulatives à la station Deschambault SM entre 2011 et 2021 (mm), entre le 1^{er} mai et la récolte, site Maïs-grain, saison 2021.

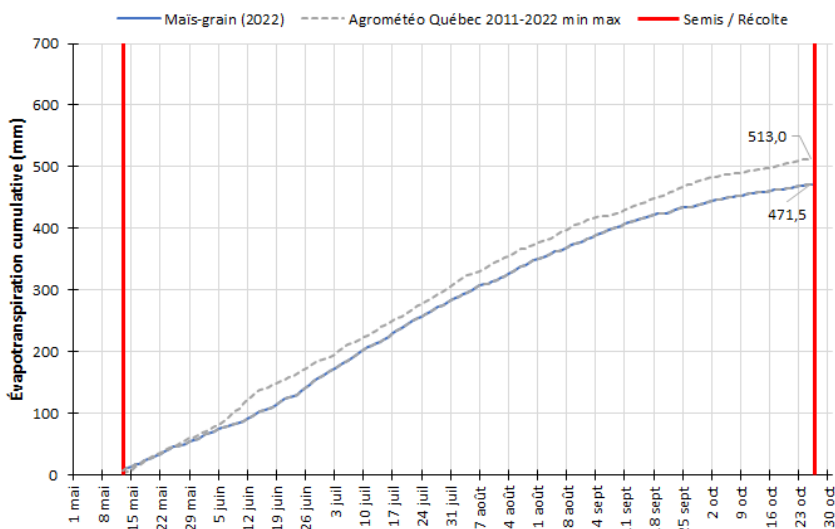


Figure 60. Évapotranspiration potentielle cumulée (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimales et maximales cumulatives à la station Deschambault SM entre 2011 et 2022 (mm) en fonction du semis et de la récolte, site Maïs-grain, saison 2022.

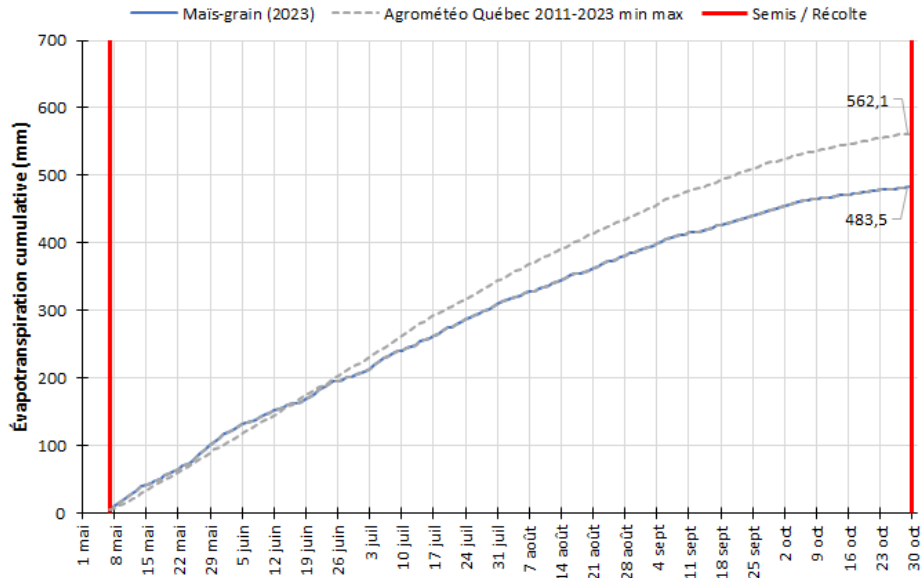


Figure 61. Évapotranspiration potentielle cumulative (mm) de la saison et évapotranspirations potentielles minimale et maximale cumulatives à la station Deschambault SM entre 2011 et 2023 (mm) en fonction du semis et de la récolte, site Maïs-grain, saison 2023.

4.1.2.4.4.3 Suivi du statut hydrique du sol par TDR

Le suivi du statut hydrique du sol pour le site Maïs-grain, avec et sans irrigation est respectivement présenté aux Figure 62 et Figure 63, pour la saison 2021. Au début de la saison, le statut hydrique du sol entre les traitements a été très similaire malgré une irrigation le 12 juin. Les 14 et 15 juin, des précipitations de 8,8 et de 6 mm ont permis de réhumecter le profil 0-30 cm pour le traitement non irrigué. Durant le mois d'août, le statut hydrique du sol des traitements a été assez différent. En effet, la consigne de déclenchement de l'irrigation a été atteinte à cinq reprises. Durant cette période, un assèchement progressif des horizons 0-30 et 30-60 cm a été observés. De plus, au 28 août, le prélèvement en eau du 0-30 et du 30-60 cm a atteint un plateau. Par la suite, aucun prélèvement n'a pu être observé dans le 30-60 cm jusqu'au 6 septembre.

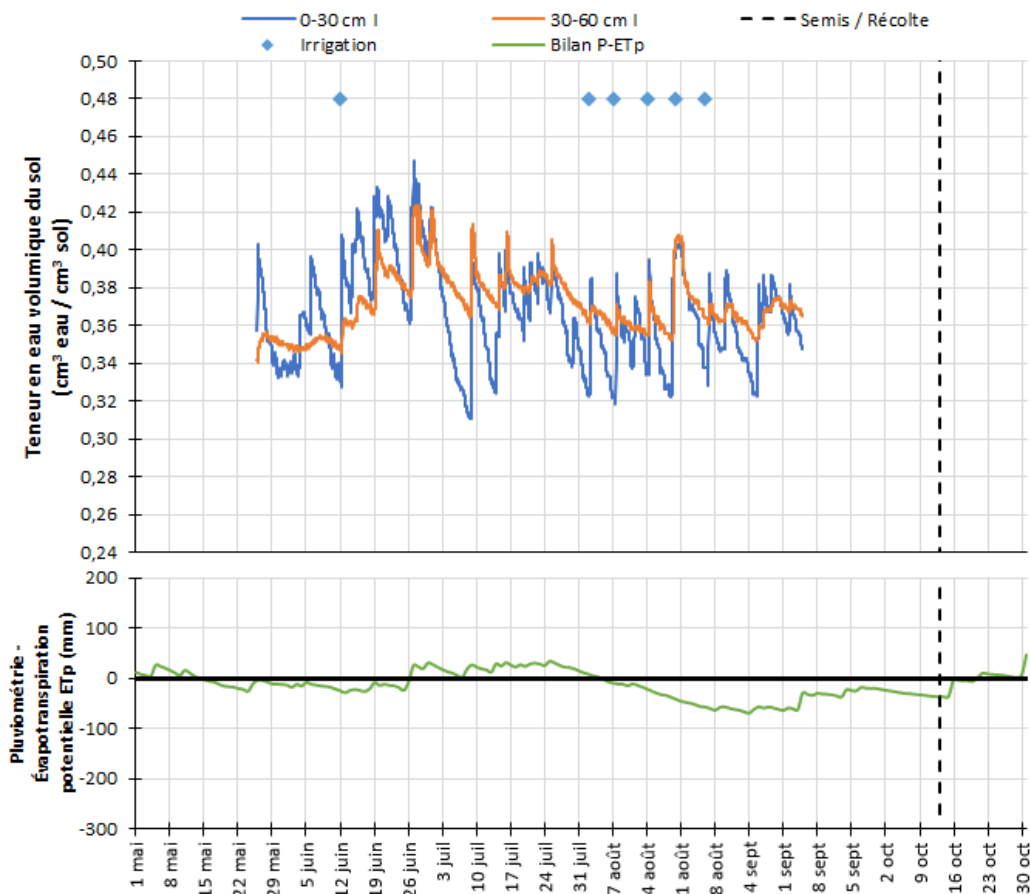
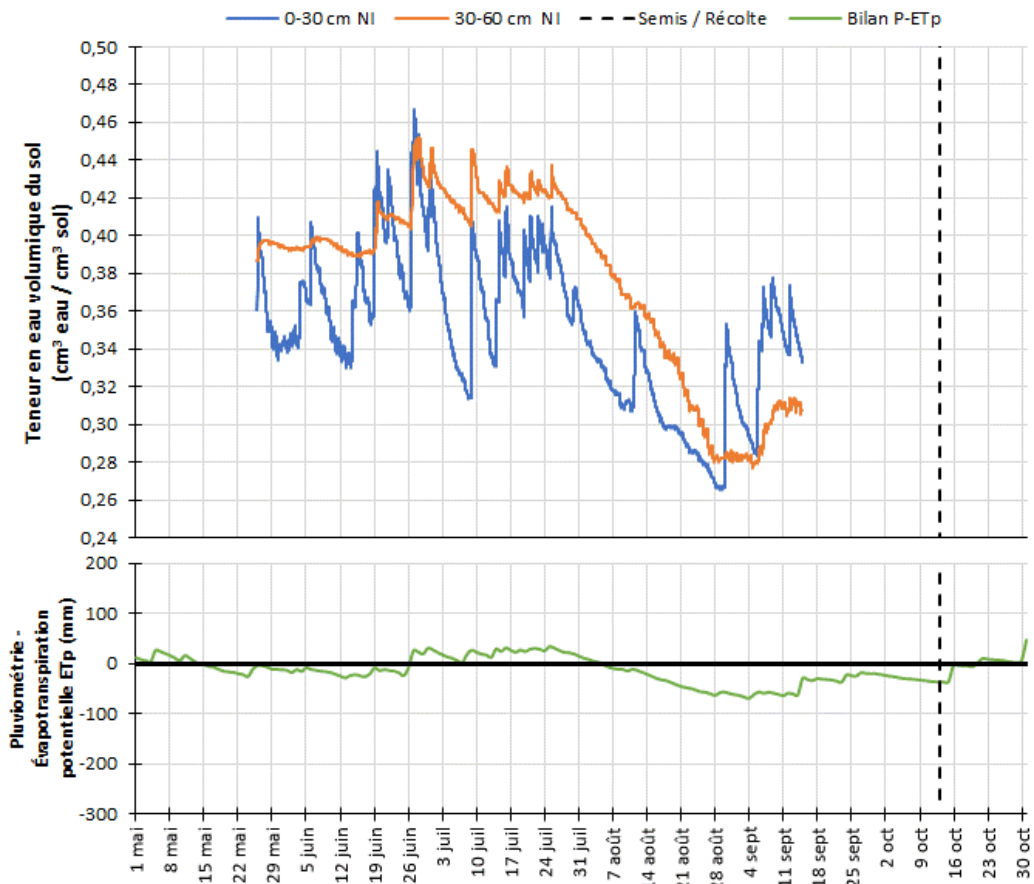


Figure 62. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm³ eau / cm³ sol) et bilan pluviométrie-ET_p (P-ET_p) (mm), traitement irrigué selon la profondeur au site Maïs-grain, saison 2021.



En 2022, le suivi du statut hydrique du sol avec et sans irrigation est respectivement présenté aux Figure 64 et Figure 65. Un contraste entre les traitements a été observé au début d'août. À la suite de l'irrigation du 1^{er} août, le prélèvement en eau durant cette période (jusqu'au 7 août) a été moins important pour le traitement non irrigué, en comparaison avec le traitement irrigué. À première vue, l'irrigation du 16 août ne semble pas avoir eu autant d'impact que la précédente. Néanmoins, les prélèvements mesurés des périodes du 19 au 21 août ainsi que du 4 au 14 septembre semblent avoir été plus importants dans le cas du traitement irrigué tant au niveau du 0-30 cm que du 30-60 cm.

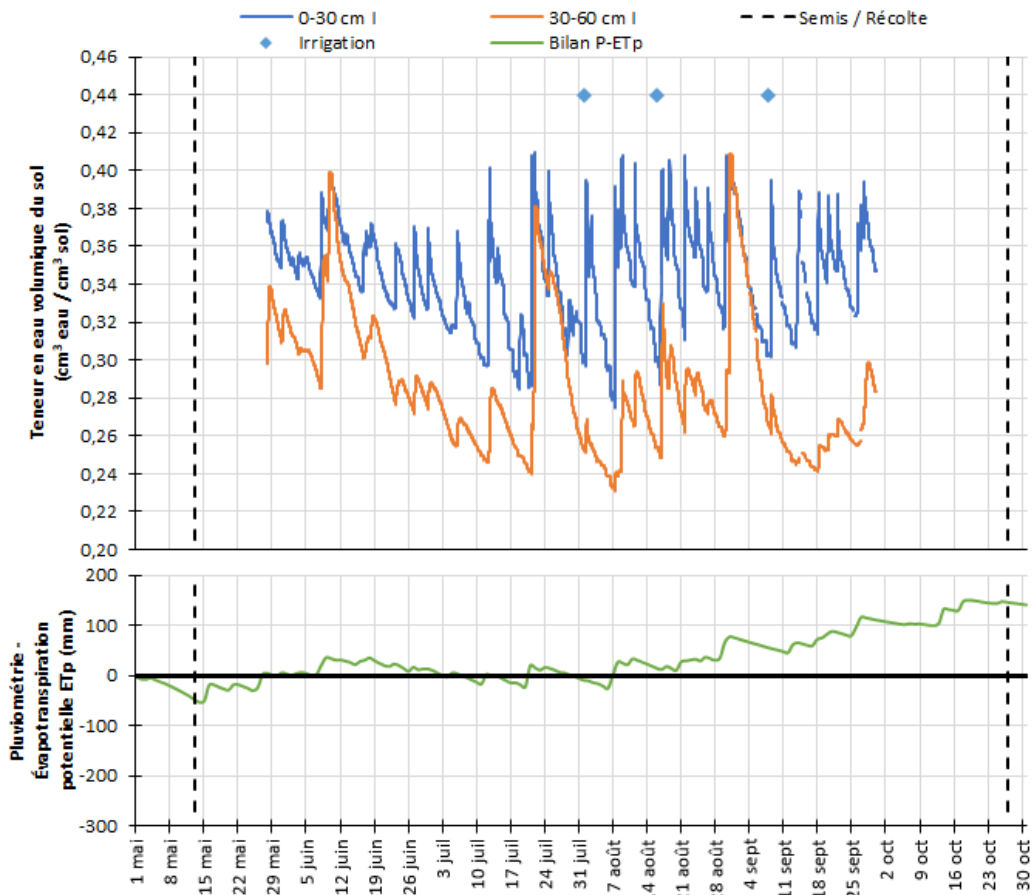


Figure 64. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) et bilan pluviométrie-ET_p (P-ET_p) (mm), traitement irrigué selon la profondeur au site Maïs-grain, saison 2022.

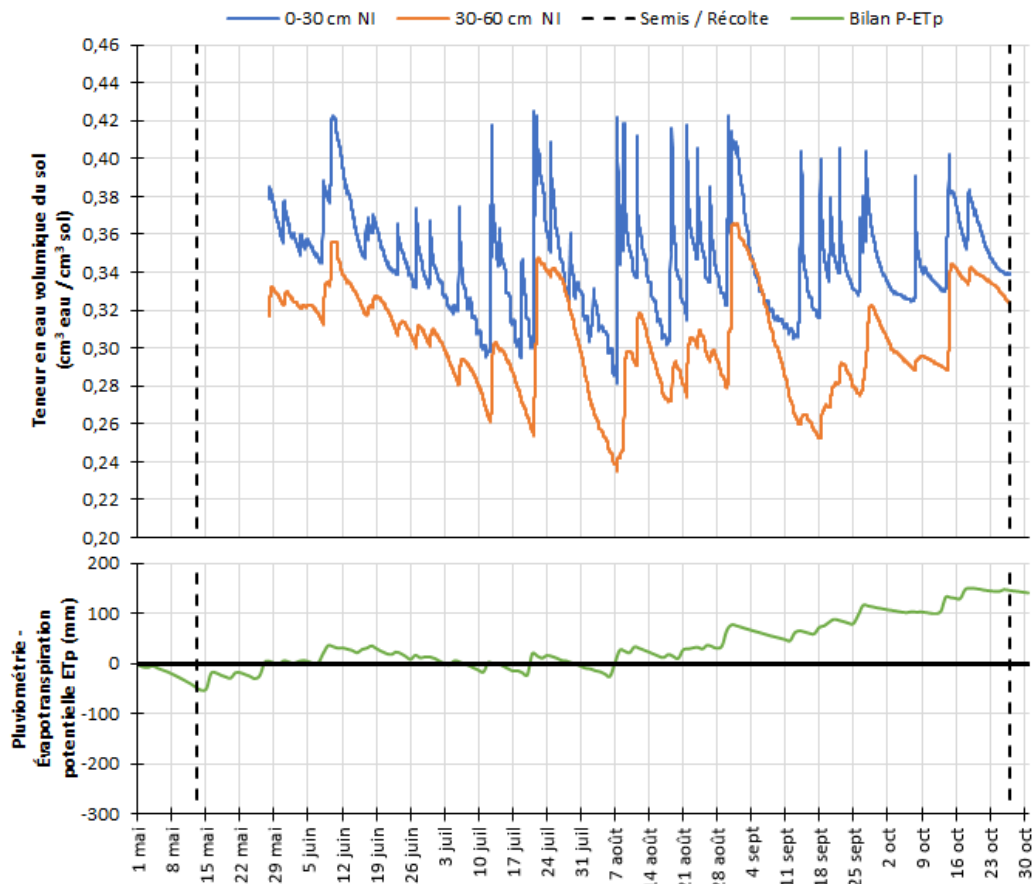


Figure 65. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) et bilan pluviométrie- ET_p ($\text{P}-\text{ET}_p$) (mm), traitement non irrigué selon la profondeur au site Maïs-grain, saison 2022.

Finalement, pour la saison 2023, il n'y a pas eu d'épisode d'irrigation. Le statut hydrique du sol a donc été comparable entre les parcelles du traitement irrigation (Figure 660 et sans irrigation (Figure 67).

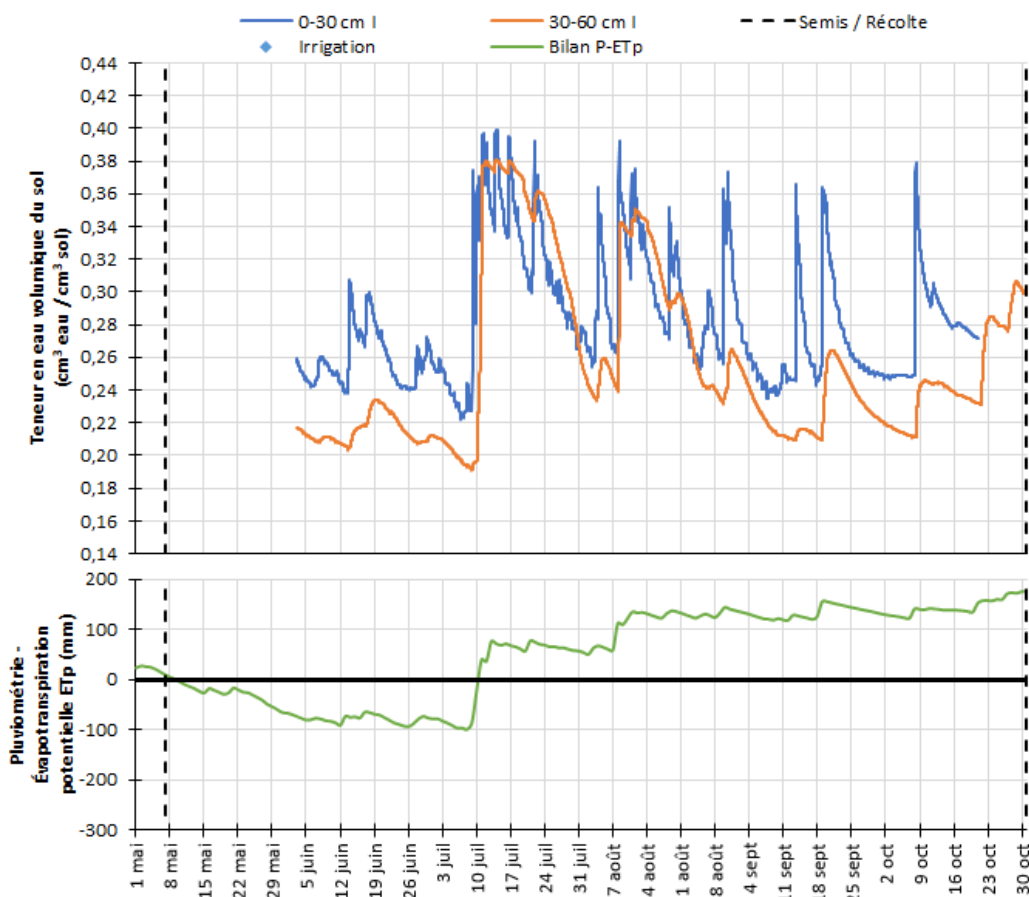


Figure 66. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) et bilan pluviométrie-ET_p (P-ET_p) (mm), traitement irrigué selon la profondeur au site Maïs-grain, saison 2023.

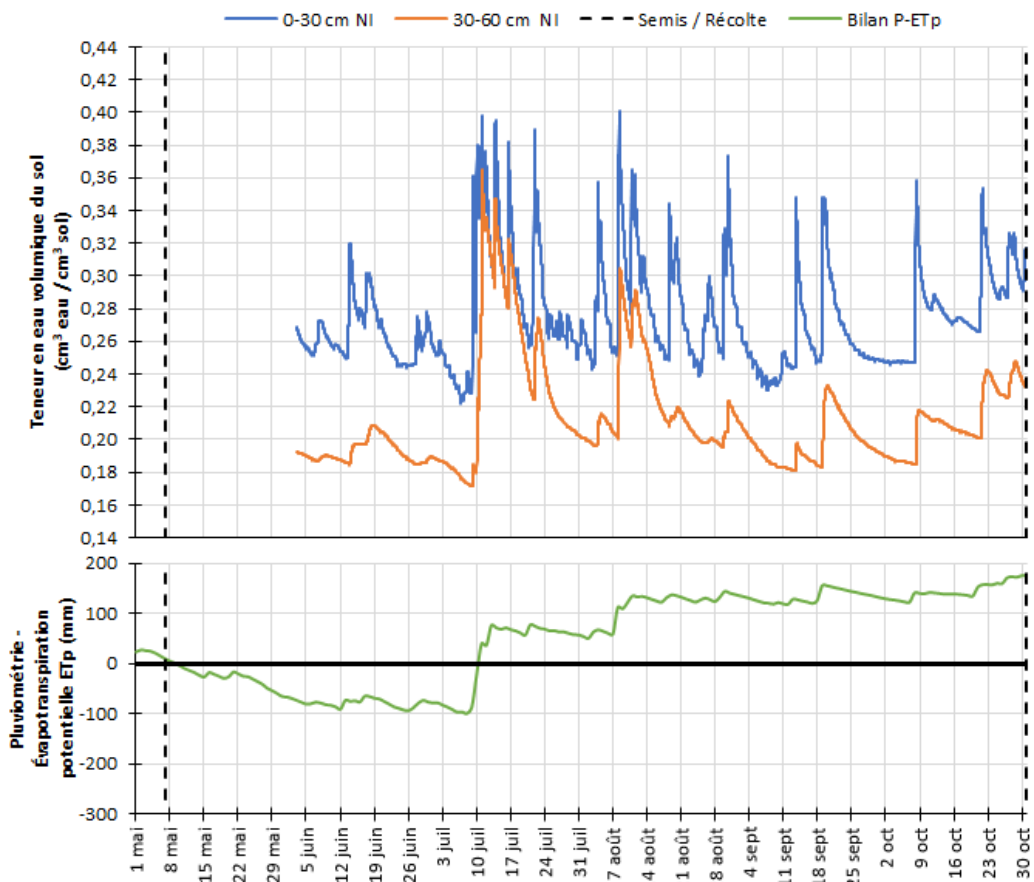


Figure 67. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$) et bilan pluviométrie- ET_p ($\text{P}-\text{ET}_p$) (mm), traitement non irrigué selon la profondeur au site Maïs-grain, saison 2023.

4.1.2.4.4 Évapotranspiration de la culture (ET_c) et coefficients culturaux (k_c)

L' ET_{c-TDR} et le K_{c-TDR} sont présentés de la Figure 68 à la Figure 71. En 2021, le prélèvement en eau du traitement irrigué semble avoir été plus élevé de manière générale (Figure 67). Des valeurs maximales de K_{c-TDR} entre 1,0 et 1,2 pour le traitement irrigué ont été mesurées (Figure 69). Pour le traitement non irrigué, les valeurs maximales ont atteint entre 0,8 et 1,0.

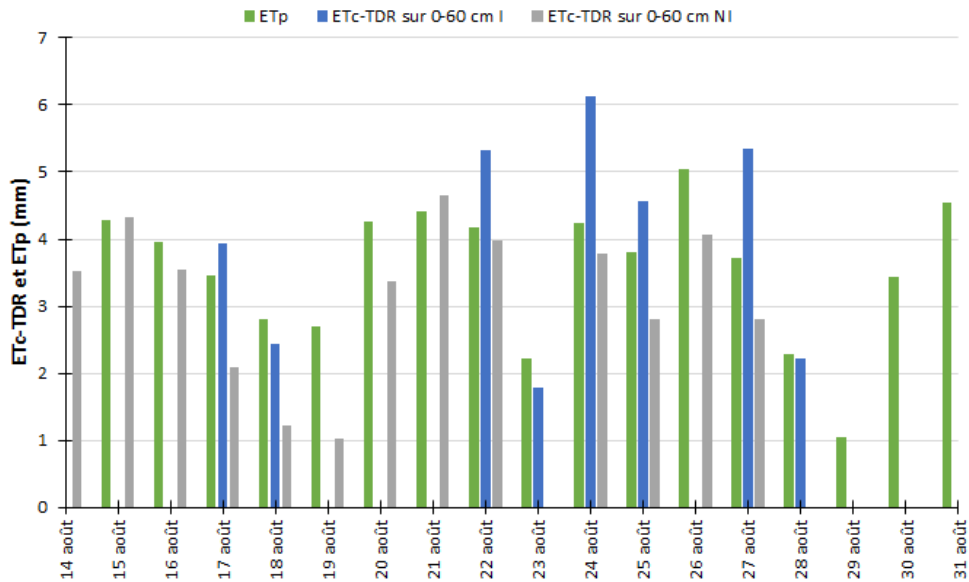


Figure 68. Évapotranspiration de la culture estimée par TDR (ET_{c-TDR}) (mm), évapotranspiration potentielle (ET_p) à la station Agrométéo Québec la plus près, site Maïs-grain, 14 au 31 août 2021.

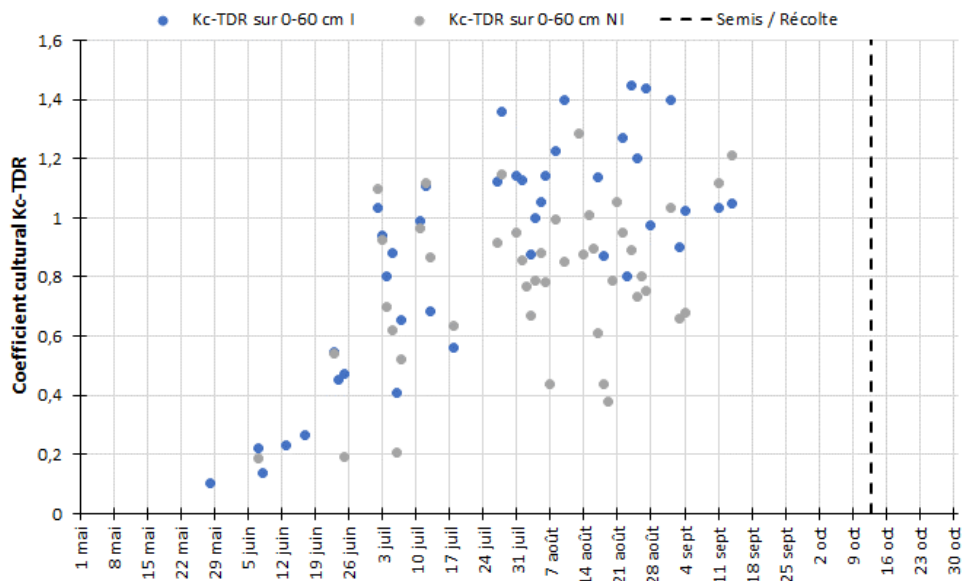


Figure 69. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Maïs-grain, saison 2021 (bleu = irrigué et gris = non irrigué).

En 2022, la différence entre les deux traitements s'est atténuée (Figure 70. Les écarts entre les valeurs maximales ont été moins visibles. Des valeurs maximales de l'ordre de 1,5 pour les deux traitements ont pu être mesurées. En l'absence d'épisode d'irrigation en 2023, il était attendu que les mesures de prélèvements en eau entre les parcelles mesurées soient similaires, ce qui fut effectivement le cas (Figure 71).

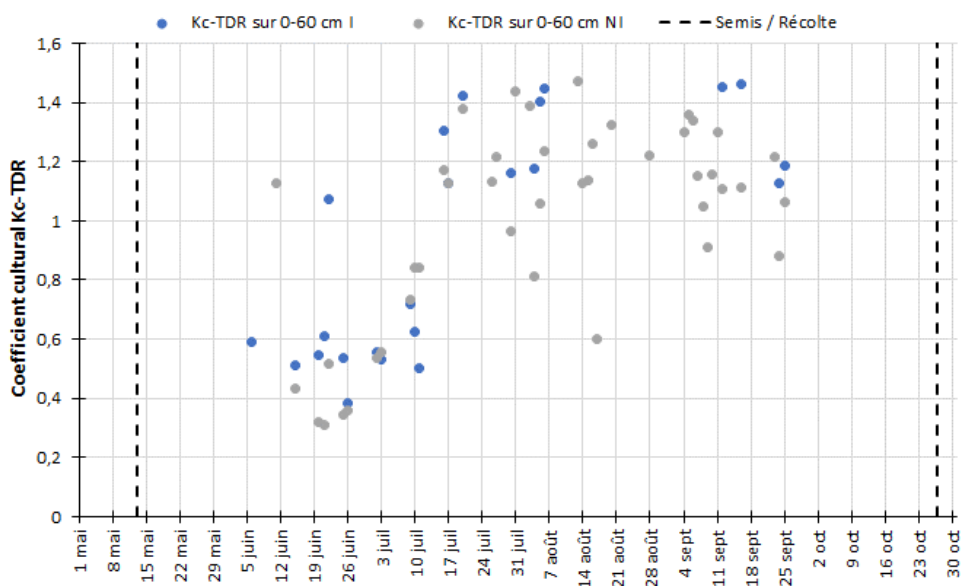


Figure 70. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Maïs-grain, saison 2022 (bleu = irrigué et gris = non irrigué).

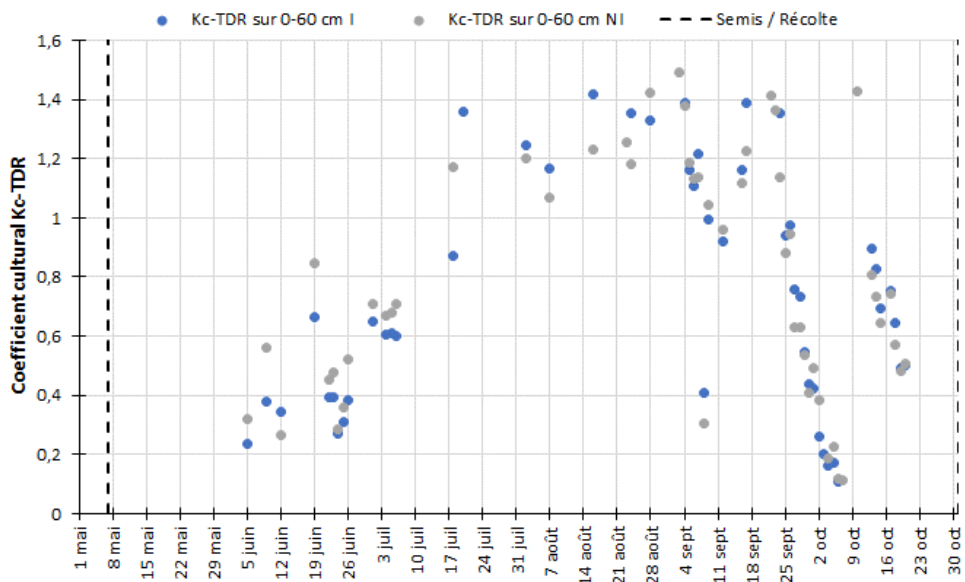


Figure 71. Chronique du coefficient cultural calculé par TDR, site Maïs-grain, saison 2023 (bleu = irrigué et gris = non irrigué).

4.1.3 Enracinement des cultures

Le site Saint-Germain1 est un exemple pour constater la croissance racinaire d'une culture fourragère en implantation. Comme présenté aux Figure 13 et Figure 14, le développement racinaire se fait assez rapidement dès l'implantation. En effet, le prélèvement dans le profil 30-60 cm débute à la mi-juillet. Lorsque le statut hydrique du sol n'est pas limitant, le prélèvement se fait principalement dans l'horizon plus superficiel (0-30 cm). Toutefois, lorsque l'horizon de surface s'assèche, le prélèvement en profondeur peut s'intensifier. Ce phénomène a été observé notamment en 2022 avec la parcelle non irriguée (Figure 16). Le prélèvement en eau des profils 20-45 et 50-75 cm a globalement été plus élevés dans la parcelle non irriguée. De plus, ce suivi a également permis de constater qu'un développement racinaire est possible dans le profil 50-75 cm. Toutefois, à cette profondeur, le prélèvement est faible et moins élevé qu'il ne l'est entre 20-45 ou 0-30 cm.

Au site Saint-Pascal, comme discuté précédemment, la nature pédologique du sol, ainsi que le mauvais écoulement de l'eau au-delà de 40 cm ont complexifié l'analyse. La stagnation de l'évolution du statut hydrique dans le profil 30-60 cm et la quasi-absence de prélèvement observé au courant de la saison 2021 a permis de renforcer cette idée (Figure 3 et Figure 4). Dans ces conditions, le système racinaire a probablement été limité par l'absence d'oxygène (anoxie). Dans ce contexte limitant où le système racinaire ne se développe pas en profondeur et lorsqu'une période prolongée sans précipitations, ce système cultural peut être plus à risque de subir un stress hydrique.

Au site Saint-Germain2, la présence de forte pierrosité en profondeur a permis de jeter un regard sur leur impact potentiel sur le développement racinaire. Les Figure 31 et Figure 32 ont bien démontré que même dans un contexte de forte pierrosité, le développement racinaire s'est fait quand même. Au mois de mai 2023, avec une absence prolongée sans précipitation, du prélèvement en eau a pu être observé dans l'horizon 40-65 ou 35-60 cm. La contrainte de ces horizons en profondeur provient de leur faible réserve en eau facilement utilisable. En effet, la présence de pierrosité diminue la capacité du sol à retenir de l'eau et ces horizons ont été rapidement épuisés.

En début de saison, les prélèvements se sont concentrés en surface dans l'horizon 7,5-22,5 cm pour les sites en soya de 2022 et 2023 (Figure 72 et Figure 73).

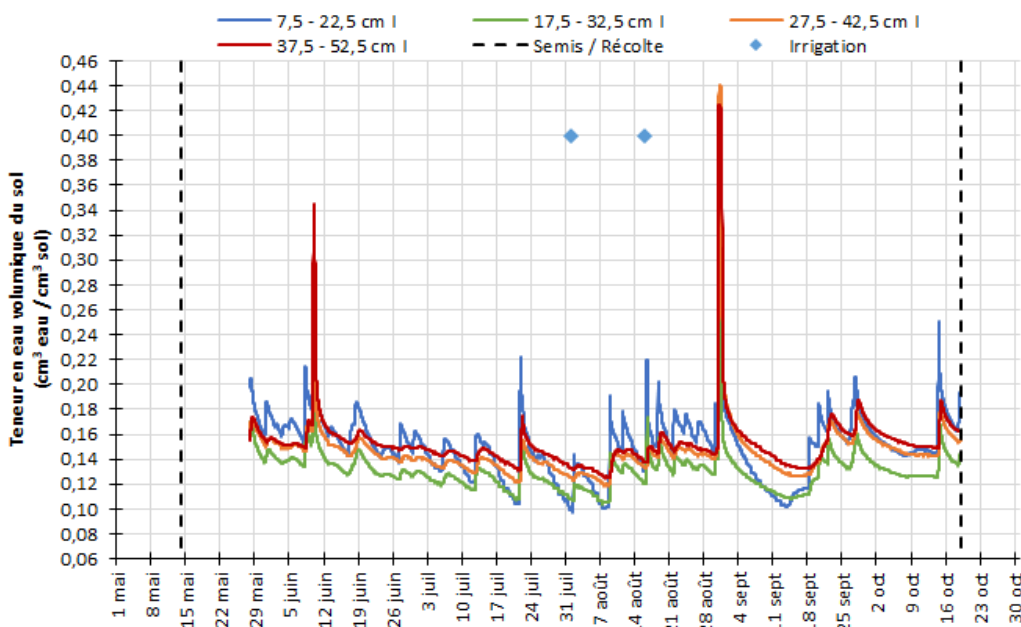


Figure 72. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$), traitement irrigué selon la profondeur (installation horizontale) au site Soya, saison 2022.

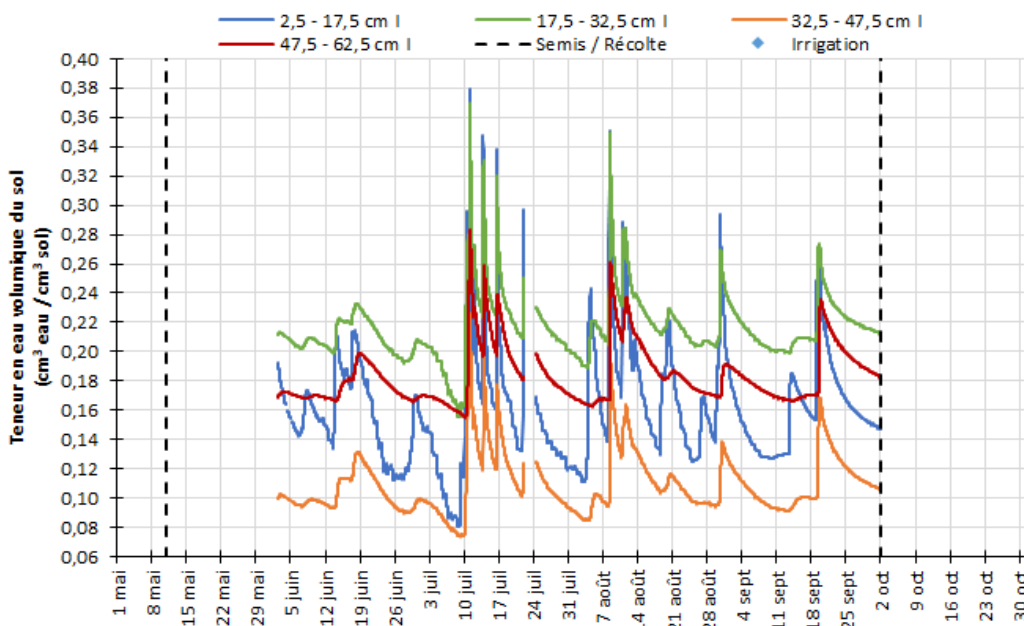


Figure 73. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$), traitement irrigué selon la profondeur (installation horizontale) au site Soya, saison 2023.

Par la suite, durant une période d'assèchement au mois de juillet 2022, il a été possible de comparer le prélèvement selon les profondeurs (Figure 74). Durant cette période, le prélèvement a été très actif dans le profil 7,5-22,5 cm et 17,5-32,5 cm. Au fur et à mesure que les profils superficiels se sont asséchés, du prélèvement dans les profils plus profonds a pu être observé (plus visible à partir du 27 juillet et très évident au 31 juillet). Toutefois, le prélèvement en profondeur (27,5-52,5 cm) a été de bien moindre importance que celui en surface (7-32,5 cm). En 2023, la profondeur d'installation des sondes a été repoussée jusqu'à 62,5 cm. Un exemple de prélèvement est présenté à la Figure 75. Au cours de cette période, du prélèvement jusqu'à 32,5 cm a été clairement visible et actif. Il a également été possible de constater du prélèvement dans le profil 32,5-47,5 cm (plus faible et moins clair). Cependant, au-delà de 47,5 cm, le statut hydrique du sol a évolué de manière très graduelle est du prélèvement quotidien a été difficilement observable.

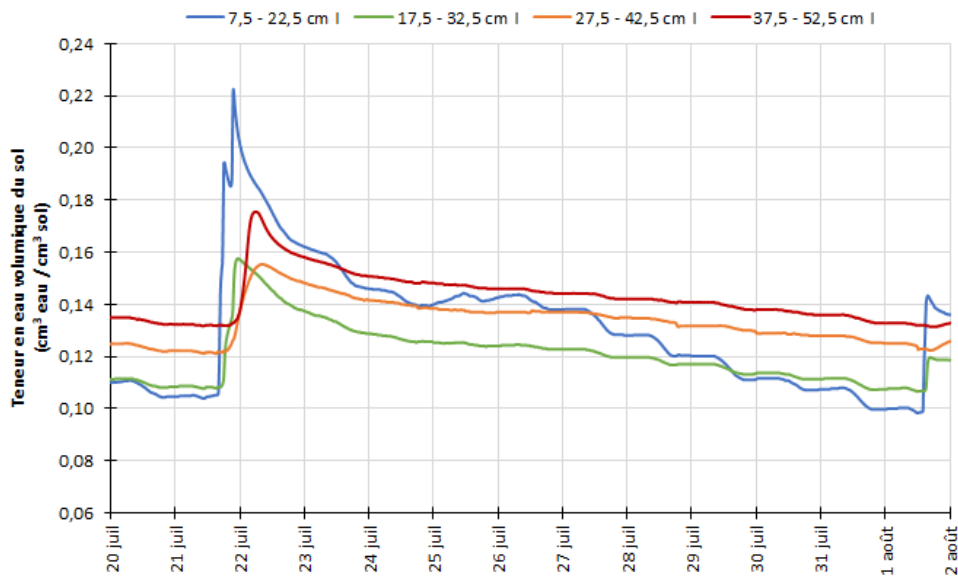


Figure 74. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$), traitement irrigué selon la profondeur (installation horizontale) au site Soya, 20 juillet au 2 août 2022.

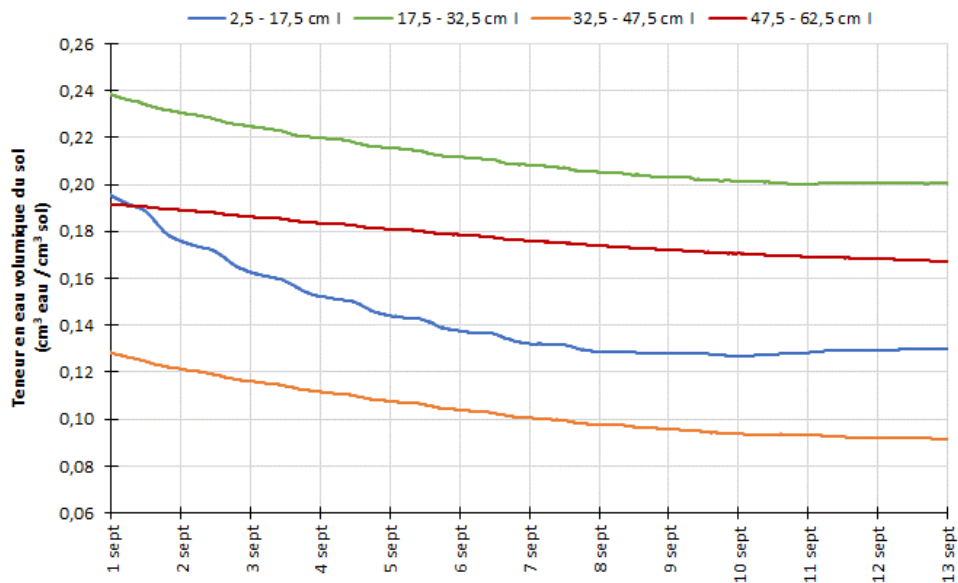


Figure 75. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$), selon la profondeur (installation horizontale) au site Soya, 1^{er} septembre au 13 septembre 2023.

Le même exercice a été réalisé avec le maïs-grain en 2022 et 2023 et le résultat des suivis est présenté aux Figure 76 et Figure 77. En 2022, le prélèvement en eau a été très actif et clairement observable sur l'ensemble des profils instrumentés. Comme le démontre la période du 2 au 7 août 2022 (Figure 78), le prélèvement a été facilement observable dans le profil 37,5-52,5 cm. En 2023, la profondeur d'installation a été repoussée jusqu'à 77,5 cm. Au courant de la saison 2023, le statut hydrique du profil 62,5-77,5 cm a été très stable, ce qui indique un prélèvement en eau très limité à cette profondeur.

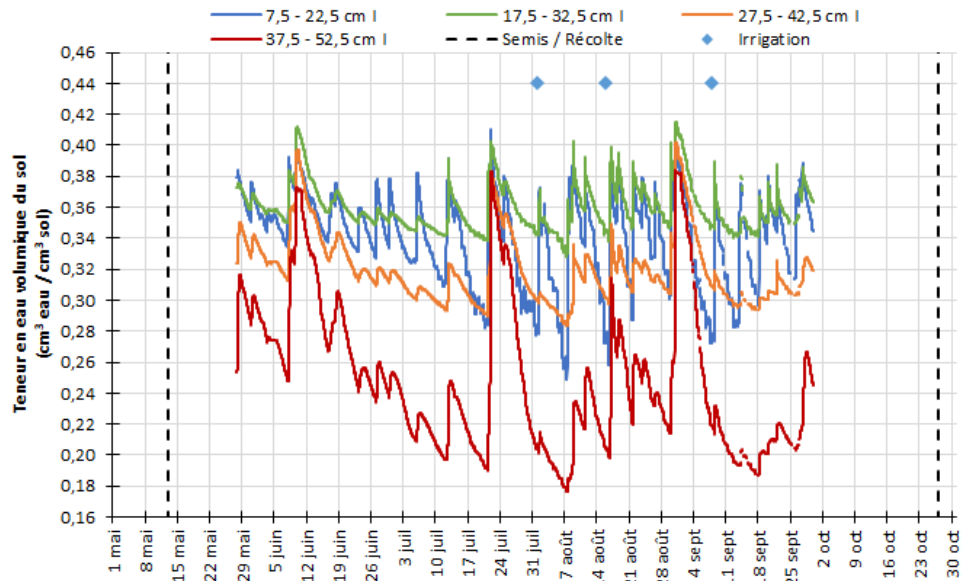


Figure 76. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm³ eau / cm³ sol), traitement irrigué selon la profondeur (installation horizontale) au site Maïs-grain, saison 2022.

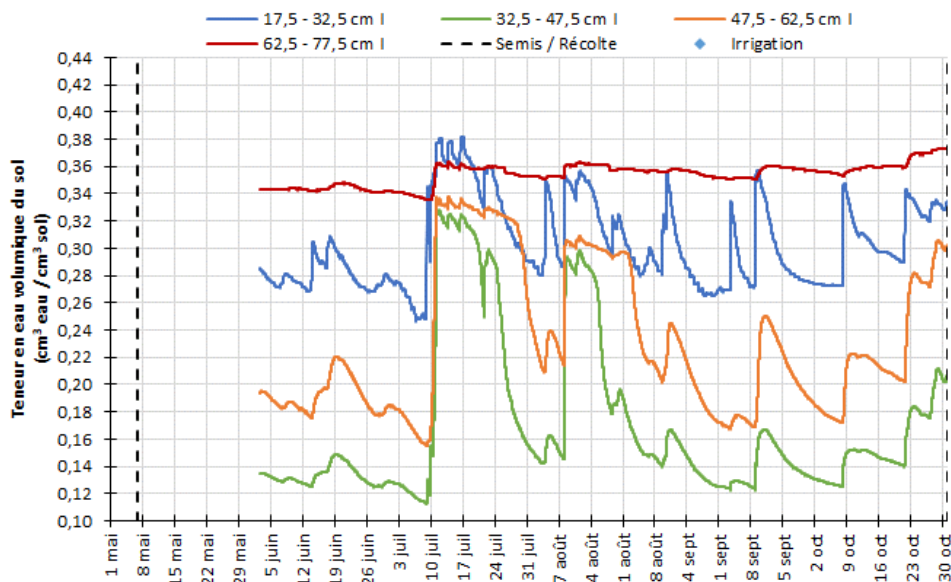


Figure 77. Chronique de la teneur en eau volumique du sol (cm³ eau / cm³ sol), traitement irrigué selon la profondeur (installation horizontale) au site Maïs-grain, saison 2023.

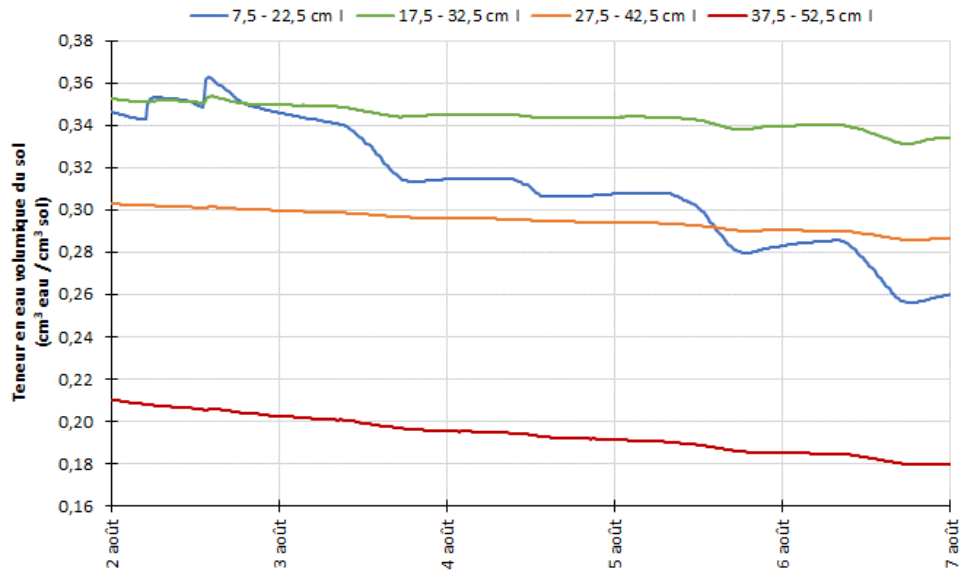


Figure 78. Chronique de la teneur en eau volumique du sol ($\text{cm}^3 \text{ eau} / \text{cm}^3 \text{ sol}$), traitement irrigué selon la profondeur (installation horizontale) au site Maïs-grain, 2 au 7 août 2022.

4.1.4 Hauteur d'eau provenant des précipitations potentiellement valorisables par la culture (HEPPVC)

La HEPPVC est respectivement présentée en contextes de plantes fourragères pérennes, de soya et de maïs-grain aux Figure 79, Figure 80 et Figure 81. Au site Saint-Germain1, l'HEPPVC a fluctué entre 47 et 61 % au terme de la saison (31 octobre) selon les années. En 2021 et 2022, les irrigations effectuées ont diminué l'HEPPVC du traitement irrigué. En maintenant un statut hydrique du sol plus humide, la probabilité qu'une pluie survienne, alors que la réserve facilement utilisable n'était pas encore épuisée, augmente. En 2023, l'irrigation n'a pas exercé une grande influence sur l'HEPPVC. Le faible nombre d'irrigations est un facteur explicatif. Aux sites soya, l'HEPPVC a varié entre 26 à 42 % selon les saisons et les traitements. Pour le soya, le kc maximum mesuré par TDR a différé entre les traitements. En 2022, cela a fait une certaine différence, principalement au mois de juillet.

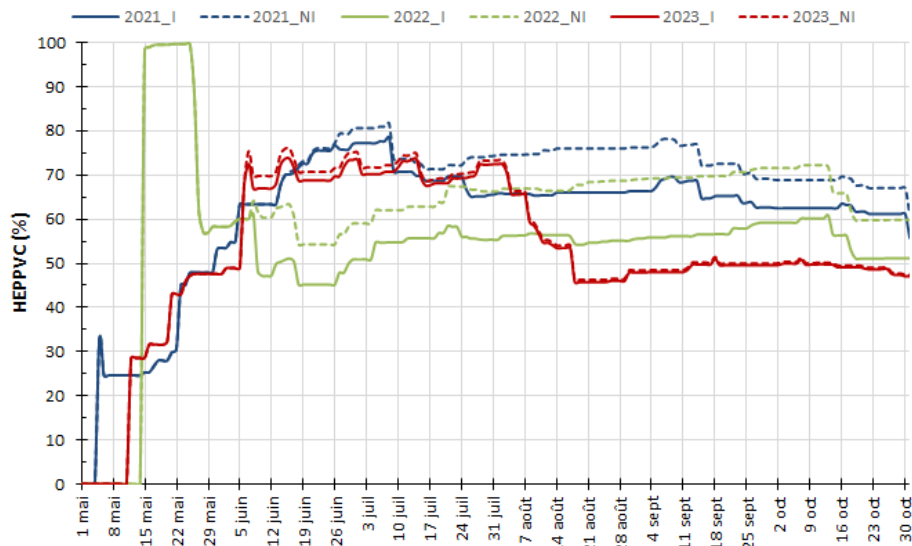


Figure 79. Hauteur d'eau provenant des précipitations potentiellement valorisables par la culture (%), selon le traitement et la saison, site Saint-Germain1.

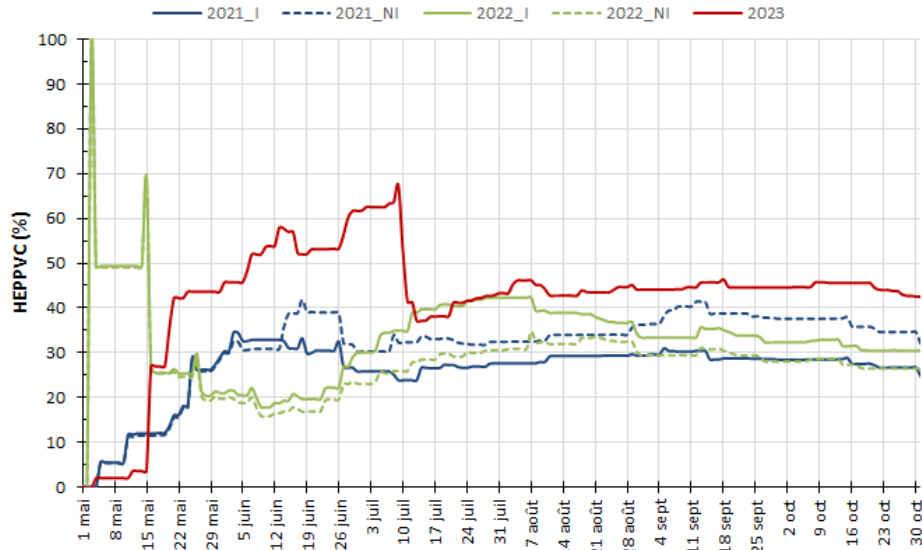


Figure 80. Hauteur d'eau provenant des précipitations potentiellement valorisables par la culture (%), selon le traitement et la saison, sites Soya.

L'exercice a également été mené pour le maïs-grain et l'HEPPVC a varié entre 46 et 53 % aux termes des saisons. Les fluctuations entre les traitements ont été globalement faibles. L'HEPPVC, comme calculée, considère la hauteur d'eau qui peut être retenue dans le profil de sol actuellement colonisé par le système racinaire. Une pluie d'importance tombée en début de saison et qui viendrait humecter un profil plus important que la profondeur racinaire actuelle pourrait tout de même contribuer au prélèvement de la culture au fur et à mesure que le système racinaire se développe. Ainsi, il n'est pas impossible que cette méthode théorique sous-estime la réelle HEPPVC.

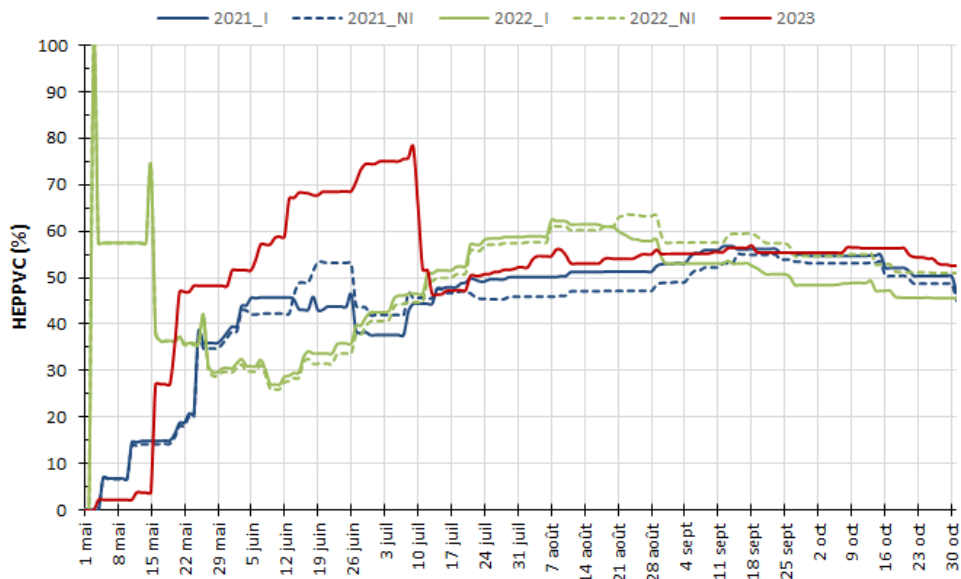


Figure 81. Hauteur d'eau provenant des précipitations potentiellement valorisables par la culture (%), selon le traitement et la saison, sites Maïs-grain.

4.1.5 Suivis physiologiques

4.1.5.1 Masse en matières sèches des parties aériennes et rendement en grains

4.1.5.1.1 Maïs-grain

Les rendements mesurés aux sites Maïs-grain sont présentés au Tableau 6. Les paramètres mesurés et analysés sont la biomasse aérienne humide, la teneur en humidité des grains à la récolte, le rendement humide en grains, le rendement des grains stabilisé à 14 % d'humidité et le poids spécifique. Pour chacun des paramètres, différents modèles statistiques ont été évalués pour tester les effets. La comparaison des modèles testés avec les critères d'informations est présentée au Tableau 7. Le modèle avec le plus petit AIC a été celui avec un effet de l'année seulement pour l'ensemble des paramètres, à l'exception du rendement des grains stabilisés où il s'agit du modèle nul qui a obtenu le plus petit AICc. Ainsi, pour l'ensemble des paramètres, l'effet du traitement ou de l'interaction n'a pu être supporté puisque l'ajout de ces termes augmente les AICc. Les valeurs présentées au Tableau 6 ne sont donc pas significativement différentes pour un paramètre donné. Pour 2023, les paramètres n'ont pas été analysés statistiquement puisqu'il n'y a pas eu d'irrigation, donc aucun traitement n'a été appliqué aux parcelles.

Tableau 6. Rendement en biomasse aérienne humide (t/ha), humidité des grains à la récolte (%), rendement en grains humide et stabilisé (t/ha) et poids spécifique (kg/hl) mesurés lors des récoltes pour le site Maïs-grain selon le traitement, saison 2021 à 2023.

Année	Traitement	Biomasse aérienne humide (t/ha)	Teneur d' humidité des grains à la récolte (%)	Rendement humide (t/ha)	Rendement stabilisé ¹ (t/ha)	Poids spécifique (kg/hl)
2021	Irrigué	37,9	32,0	15,4	11,6	73,62
	Non irrigué	33,8	30,4	14,1	10,6	73,70
	<i>p</i>	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
2022	Irrigué	30,8	25,8	12,4	11,2	73,29
	Non irrigué	31,1	26,0	13,0	11,7	73,05
	<i>p</i>	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
2023	Irrigué	29,6	26,2	9,5	8,6	69,41
	Non irrigué	31,4	26,5	10,3	9,3	69,65
	<i>p</i>	Aucune irrigation, aucune analyse				

¹ Rendement moyen stabilisé et exprimé à 14 % d'humidité.

n.s : non significatif.

Tableau 7. Comparaison des modèles testés, le critère d'information corrigé AICc, l'écart entre les critères d'information corrigés $\Delta AICc$ selon le paramètre analysé, site Maïs-grain (2021-2022).

Paramètre	Test modèle	AICc	$\Delta AICc$
Biomasse aérienne humide	Année	88,60	0
	Nul	91,12	2,63
	Année + Traitement	92,50	3,90
	Traitement	94,50	5,90
	Année x Traitement	95,23	6,63
Teneur d'humidité des grains à la récolte	Année	87,78	0
	Année + Traitement	91,65	3,87
	Année x Traitement	95,54	7,76
	Nul	97,15	9,36
	Traitement	100,50	12,71
Rendement humide	Année	68,80	0
	Année + Traitement	72,80	4,00
	Nul	73,76	4,96
	Traitement	75,88	7,09
	Année X Traitement	78,16	9,36
Rendement stabilisé	Nul	54,30	0
	Traitement	57,74	3,44
	Année	58,85	4,55
	Année + Traitement	62,76	8,47
	Année x Traitement	97,72	13,42
Poids spécifique	Année	24,77	0
	Nul	27,75	2,97
	Année + Traitement	27,83	3,06
	Traitement	30,44	5,67
	Année x Traitement	30,94	6,17

4.1.5.1.2 Soya

Les rendements mesurés aux sites en soya sont présentés au Tableau 8. Les paramètres mesurés et analysés sont la biomasse aérienne humide, la teneur d'humidité des grains à la récolte, le rendement humide en grains, le rendement des grains stabilisé à 14 % d'humidité et le poids spécifique. Pour chacun des paramètres, différents modèles statistiques ont été évalués pour tester les effets. La comparaison des modèles testés avec les critères d'informations est présentée au Tableau 9. En 2022, le site d'essai « soya » a subi un dépérissement au courant de la saison de croissance. Le dépérissement a atteint le feuillage, le collet et le système racinaire des plants. Les symptômes incluaient les caractéristiques suivantes : 1) présence de plages de coloration jaune sur les feuilles, près de la marge; 2) sur quelques feuilles, présence de brûlures brun-noir internervaires; 3) dans le collet, présence d'une légère coloration brune; et 4) des racines brunes. Des plants complets ont été envoyés au Laboratoire d'expertise et de diagnostic en phytoprotection du MAPAQ le 12 août. Le diagnostic final a été reçu le 17 août : « La partie basale des plantes (racines et collets) est infectée par un complexe fongique formé de *Fusarium*, *Pythium sp.* et *Rhizoctonia sp.* Chez le soya, ces organismes phytopathogènes sont respectivement responsables de la pourriture fusarienne (ou fusariose)¹, de la pourriture pythienne² et du rhizoctone commun³. Cette association d'infections fongiques peut expliquer le dépérissement des plantes. Veuillez noter que *Fusarium sp.* isolé dans l'échantillon n'est pas *Fusarium virguliforme*, organisme responsable de la mort subite du soya ».

Le modèle avec le plus petit AIC a été celui avec un effet de l'année seulement pour l'ensemble des paramètres à l'exception de la teneur d'humidité des grains à la récolte où il s'agit du modèle nul qui a obtenu le plus petit AICc. Puisqu'il y avait des valeurs uniquement pour 2022, un modèle de la variance a été inclus pour prendre en compte l'hétérogénéité. Ainsi, pour l'ensemble des paramètres, l'effet du traitement ou d'interaction n'a pu être supporté puisque l'ajout de ces termes augmente les AICc. Les valeurs présentées Tableau 9 ne sont donc pas significativement différentes pour un paramètre donné. Pour 2023, les paramètres n'ont pas été analysés statistiquement puisqu'il n'y a pas eu d'irrigation, donc aucun traitement n'a été appliqué aux parcelles.

Tableau 8. Rendement en biomasse aérienne humide (t/ha), humidité des grains à la récolte (%), rendement en grains humide et stabilisé (t/ha) et poids spécifique (kg/hl) mesurés lors des récoltes pour le site Soya selon le traitement, saison 2021 à 2023.

Année	Traitement	Biomasse aérienne humide (t/ha)	Teneur d' humidité des grains à la récolte (%)	Rendement humide (t/ha)	Rendement stabilisé ¹ (t/ha)	Poids spécifique (kg/hl)
2021	Irrigué	8,1	n.d.	3,8	3,5	72,74
	Non irrigué	9,5	n.d.	4,0	3,6	73,40
	<i>p</i>	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
2022	Irrigué	4,0	17,4	1,4	1,4	71,71
	Non irrigué	3,9	14,8	1,4	1,4	71,77

¹ <https://extension.umn.edu/pest-management/fusarium-root-rot-soybean>

² <https://cropprotectionnetwork.org/encyclopedia/pythium-seedling-blight-and-root-rot-of-soybean>

³ <https://www.iriisphytoprotection.qc.ca/Fiche/Champignon?imageId=1927>

	<i>p</i>	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
2023	Irrigué	9,1	10,5	3,5	3,7	73,42
	Non irrigué	9,2	10,1	3,7	3,9	73,17
	<i>p</i>	Aucune irrigation, aucune analyse				

¹ Rendement moyen stabilisé et exprimé à 14 % d'humidité.

Tableau 9. Comparaison des modèles testés, le critère d'information corrigé AICc, l'écart entre les critères d'information corrigés $\Delta AICc$ selon le paramètre analysé, site Soya (2021-2022).

Paramètre	Test modèle	AICc	$\Delta AICc$
Biomasse aérienne humide	Année	70,36	0
	Année + Traitement	74,19	3,83
	Année X Traitement	77,83	7,47
	Nul	82,49	12,13
	Traitement	85,85	15,49
Teneur d'humidité des grains à la récolte ¹	Nul	60,59	0
	Traitement	65,23	4,64
Rendement humide	Année	34,21	0
	Année + Traitement	37,42	3,21
	Année X Traitement	40,96	6,76
	Nul	66,73	32,52
	Traitement	69,62	35,41
Rendement stabilisé	Année	31,55	0
	Année + Traitement	34,92	3,36
	Année X Traitement	38,83	7,27
	Nul	61,81	30,25
	Traitement	64,72	33,17
Poids spécifique	Année	41,83	0
	Année + Traitement	44,03	2,20
	Année X Traitement	46,94	5,11
	Nul	52,16	10,32
	Traitement	54,52	12,69

¹ Données uniquement pour 2022. Un modèle de la variance à cause de l'hétérogénéité a été inclus.

4.1.5.1.3 Cultures fourragères

Les rendements en biomasses aériennes humide et sèche pour le site Saint-Germain1 sont présentés au Tableau 10 (2021) et au Tableau 11 (2022-2023). Globalement, les rendements obtenus avec l'irrigation sont significativement différents durant les 3 années suivies. En 2021, en année d'implantation, le rendement n'a pas été significativement différent à la 1^{re} coupe. À la 2^e, le rendement humide en contexte irrigué a été de 18,7 t/ha, comparativement à 3,7 t/ha en absence d'irrigation. Le rendement sec a été de 3,6 et 1,3 t/ha, respectivement avec et sans irrigation. En 2022 et 2023, un total de 6 coupes a été effectué. Rapporté en rendement moyen par coupe, 20,8 t/ha ont été obtenus avec l'irrigation et 14,3 t/ha, sans irrigation, soit une différence d'environ 6,5 t/ha. Autrement dit, de la 1^{re} à la 6^e coupe, près de 40 t/ha (humide) ont été récoltées en condition irriguée, comparativement à celle non irriguée.

Tableau 10. Rendements en biomasses aériennes humide et sèche (t/ha) mesurées au site Saint-Germain1 selon la date de récolte et le traitement, saison 2021 (Prairie en implantation).

Année	Date de récolte	Traitement	Rendement (t/ha)	
			Humide	Sec
2021	5 juillet (Coupe 1)	Irrigué	18,4	3,4
		Non irrigué	17,0	3,7
		<i>p</i>	n.s.	n.s.
	16 août (Coupe 2)	Irrigué	18,7 (16,9-20,5)	3,6 (3,2-4,0)
		Non irrigué	3,7 (1,9-5,5)	1,3 (0,9-1,7)
		<i>p</i>	0,0001	0,003

() : intervalles de confiance à 95 %.

Tableau 11. Rendements en biomasses aériennes humide et sèche (t/ha) mesurées au site Saint-Germain1 selon le traitement rapporté en moyenne par coupe, saison 2022-2023.

Traitement	Rendement (t/ha)	
	Humide	Sec
Irrigué	20,8 (12,6-15,9)	3,4 (3,0-3,8)
Non irrigué	14,3 (19,4-22,3)	2,7 (2,3-3,0)
	<i>p</i>	< 0,0001

() : intervalles de confiance à 95 %.

Pour le site Saint-Pascal (2021), comme il n'y a pas eu d'irrigation déclenchée, les traitements n'ont pu être évalués (**Erreur ! Référence non valide pour un signet.**). Une différence entre les traitements aurait indiqué une hétérogénéité du site.

Pour le site Saint-Germain2 (2022 et 2023), le rendement n'est pas significativement différent entre les traitements.

Tableau 12. Rendements en biomasses aériennes humide et sèche (t/ha) mesurées aux sites Saint-Pascal et Saint-Germain2 selon la date de récolte et le traitement, saison 2021 à 2023.

Année	Site	Date de récolte	Traitement	Rendement (t/ha)	
				Humide	Sec
2021	Saint-Pascal	14 juin	Irrigué	18,5	4,8
			Non irrigué	19,8	5,1
		Aucune irrigation, aucune analyse			
		26 juillet	Irrigué	11,8	3,6
			Non irrigué	11,8	3,7
		Aucune irrigation, aucune analyse			
2022	Saint-Germain2	17 juin	Irrigué	29,1	4,0
			Non irrigué	19,5	2,9
		<i>p</i> n.s.			
		4 août	Irrigué	13,1	2,4
			Non irrigué	13,3	2,3
		<i>p</i> n.s.			
2023	Saint-Germain2	14 juin	Irrigué	22,0	3,9
			Non irrigué	13,5	2,6
		<i>p</i> n.s.			
		25 juillet	Irrigué	14,2	2,8
			Non irrigué	14,3	2,8
		<i>p</i> n.s.			
12 septembre	Irrigué	6,6	1,2		
	Non irrigué	7,5	1,4		
<i>p</i> n.s.					

Tableau 13. Comparaison des modèles testés, le critère d'information corrigé AICc, l'écart entre les critères d'information corrigés $\Delta AICc$ selon le paramètre analysé, site Saint-Germain1 (2021 à 2023).

Année	Récolte	Paramètre	Test modèle	AICc	$\Delta AICc$
2021	1	Rendement humide	Nul	40,69	0
			Traitement	47,90	7,21
		Rendement sec	Nul	18,17	0
	2	Rendement humide	Traitement	48,28	0
			Nul	67,18	18,90
		Rendement sec	Traitement	24,58	0
2022-2023	Récoltes combinées (6)	Rendement humide	Traitement	277,25	0
			Nul	299,03	21,78
		Rendement sec	Traitement	94,05	0
			Nul	109,30	15,25

Tableau 14. Comparaison des modèles testés, le critère d'information corrigé AICc, l'écart entre les critères d'information corrigés $\Delta AICc$ selon le paramètre analysé, site Saint-Germain 2 (2022-2023).

Année	Paramètre	Test modèle	AICc	$\Delta AICc$
2022	Rendement humide	Récolte	107,90	0
		Traitement + récolte	116,34	8,44
		Traitement	119,28	11,37
		Nul	119,57	11,66
		Traitement X récolte	120,64	12,74
	Rendement sec	Récolte	35,55	0
		Traitement + récolte	43,85	8,30
		Nul	44,33	8,77
		Traitement	50,94	15,38
		Traitement X récolte	51,07	15,52
2023	Rendement humide	Récolte	141,95	0
		Traitement + récolte	148,98	7,03
		Nul	153,99	12,05
		Traitement	158,11	16,17
		Traitement X récolte	159,64	17,69
	Rendement sec	Récolte	59,28	0
		Traitement + récolte	66,35	7,06
		Nul	75,92	16,64
		Traitement X récolte	77,86	18,57
		Traitement	80,03	20,75

4.1.5.2 Prévalences des mauvaises herbes

La biomasse récoltée est composée de plusieurs espèces et ces dernières ont été identifiées et triées selon les cinq groupes présentés au Tableau 15. Une grande variabilité des proportions a été observée entre les sites, les traitements et les années. Cela est attribuable au mélange fourrager qui a été utilisé, à l'évolution de la composition des espèces du champ au fil des années et l'hétérogénéité du champ. Au site Saint-Germain1, certaines espèces annuelles ont été mélangées au semis. À la 1^{re} récolte, la représentation du pois fourrager a été de 15 à 30 % du mélange, autrement composé de luzerne, de graminées, de trèfle et de mauvaises herbes. L'irrigation n'a pas eu d'effet significativement différent sur la composition des espèces parce que le modèle nul a obtenu un AIC inférieur (AIC_nul=47,97, AIC_Irrigation=49,90). L'effet du traitement n'a pu être supporté. De plus, le modèle nul a permis d'expliquer autant de variance (40,6 %) que le modèle avec le traitement (40,7 %).

Tableau 15. Proportions de luzerne, de graminées, de trèfle, de pois et de mauvaises herbes (%) qui composent la biomasse récoltée selon le site, la date de récolte et le traitement (base sèche), saison 2021-2023.

Année	Site	Date de récolte	Traitement	Luzerne	Graminées	Trèfle	Pois	Mauvaises herbes
				(%)				
2021	Saint-Germain1	5 juillet	Irrigué	4,2	69,3	0,1	15,6	10,8
			Non irrigué	3,1	54,1	1,4	31,3	10,0
		16 août	Irrigué	9,6	23,4	34,4	3,4	29,2
			Non irrigué	8,1	41,0	30,8	0,6	19,6
	Saint-Pascal	14 juin	Irrigué	69,6	30,4	-	-	0
			Non irrigué	74,3	25,0	-	-	0,7
		26 juillet	Irrigué	41,4	52,7	-	-	5,9
			Non irrigué	56,4	39,2	-	-	4,4
2022	Saint-Germain1	17 juin	Irrigué	26,5	32,6	30,5	-	10,4
			Non irrigué	15,7	55,1	16,4	-	12,8
		27 juillet	Irrigué	27,8	14,0	54,9	-	3,3
			Non irrigué	32,6	24,6	33,3	-	9,6
	Saint-Germain2	8 septembre	Irrigué	38,3	22,2	22,8	-	16,7
			Non irrigué	33,7	24,8	24,5	-	17,0
		17 juin	Irrigué	4,6	52,6	29,0	-	13,8
			Non irrigué	4,9	48,5	41,6	-	5,0
2023	Saint-Germain1	4 août	Irrigué	14,4	21,1	44,5	-	19,9
			Non irrigué	14,3	18,1	51,6	-	16,0
		14 juin	n.d.					
			25 juillet	n.d.				
Saint-Germain2	12 septembre	Irrigué	26,5	54,5	10,1	-	8,9	
		Non irrigué	41,1	29,7	9,2	-	20,0	
	14 juin	n.d.						
		25 juillet	n.d.					
12 septembre	Irrigué	8,1	57,6	22,6	-	11,7		
	Non irrigué	6,5	46,3	38,1	-	9,1		

4.1.5.3 Qualité des fourrages

Les principaux paramètres suivis sur la qualité des fourrages sont présentés au Tableau 16, tandis que l'ensemble des paramètres sont regroupés à la section ANNEXE. L'analyse statistique sur les paramètres de la qualité n'a pu être effectuée puisque l'échantillonnage était composé d'un échantillon composite de l'ensemble des parcelles d'un traitement donné.

En 2021, au site Saint-Germain1, l'irrigation semble principalement avoir influencé le contenu en matière sèche et la protéine brute. L'écart semble également être plus important lors de la 2^e coupe où l'analyse de l'échantillon des parcelles irriguées a rapporté une augmentation de l'humidité et de la protéine brute respectivement de 16,9 % et 8 %. Un pourcentage plus élevé de protéine brute indique normalement un mélange de meilleure qualité, qui permettra de favoriser la performance zootechnique des élevages.

Pour 2022, les résultats obtenus au Saint-Germain1 présentent des écarts assez importants en ce qui a trait à la matière sèche et à la protéine brute. La différence la plus importante au niveau de la protéine brute a été mesurée lors de la récolte du 17 juin avec un écart de 6,9 % en faveur du traitement non irrigué. Par la suite, la protéine brute a été plus élevée pour le traitement irrigué avec 21,7 % contre 19,5 % pour le traitement non irrigué au 27 juillet et de 19,6 % contre 16,1 % pour le traitement non irrigué au 8 septembre. Pour la matière sèche, lors de la récolte du 8 septembre, celle-ci atteignait 41,1 % dans le traitement non irrigué tandis qu'elle s'élevait à 18,8 % dans le traitement irrigué. La fibre ADF, représentant le contenu en cellulose, en lignine et en cendres, a fluctué selon les récoltes. La fibre ADF pour le traitement irrigué a été plus élevée le 17 juin (35,6 % contre 31,0 %), plus faible lors de la récolte du 27 juillet (28,9 % contre 30,6 %) et du 8 septembre (31,6 % contre 33,3 %). Ces résultats suggèrent que le traitement irrigué aurait engendré une diminution de la digestibilité du mélange fourrager au 17 juin et, inversement, augmenté la digestibilité du mélange lors des deux récoltes subséquentes.

Pour le site Saint-Germain2, les analyses ont révélé des résultats assez similaires selon les paramètres. Au 17 juin, la protéine brute du mélange a été légèrement supérieure pour le traitement irrigué avec 23,0 % comparativement à 21,4 % pour le traitement non irrigué. Parallèlement, la fibre ADF du traitement irrigué est légèrement plus élevée que le traitement non irrigué (25,0 % contre 24,3), signe d'une moins bonne digestibilité du mélange fourrager.

Finalement, pour 2023, les résultats sont très similaires entre les analyses. Le nombre limité d'irrigations de la saison 2023 n'est probablement pas étranger à ces résultats.

Tableau 16. Qualité du fourrage selon le site, la date de récolte ainsi que le traitement, saison 2022.

Année	Site	Date de récolte	Traitement	Matière sèche	Humidité	Protéine brute	Fibre ADF	Fibre NDF (estimée)
				(%)				
2021	Saint-Germain1	5 juillet	Irrigué	17,4	82,6	18,9	25,0	41,5
			Non irrigué	24,3	75,7	14,3	29,7	47,0
		16 août	Irrigué	14,7	85,3	24,6	25,9	42,5
			Non irrigué	31,6	68,4	16,6	26,5	43,2
	Saint-Pascal	14 juin	n.d.					
		26 juillet	Échantillon composite	19,7	80,3	20,1	35,8	54,1
2022	Saint-Germain1	17 juin	Irrigué	21,0	79,0	13,6	35,6	n.d.
			Non irrigué	15,6	84,4	20,5	31,0	n.d.
		27 juillet	Irrigué	16,0	84,0	21,7	28,9	n.d.
			Non irrigué	19,9	80,1	19,5	30,6	n.d.
	8 sept.	Irrigué	18,8	81,2	19,6	31,6	49,1	
		Non irrigué	41,1	58,9	16,1	33,3	51,1	
	Saint-Germain2	17 juin	Irrigué	16,8	83,2	21,4	25,0	n.d.
			Non irrigué	16,5	83,5	23,0	24,3	n.d.
		4 août	Irrigué	15,0	85,0	22,5	22,4	n.d.
			Non irrigué	18,0	82,0	17,7	29,4	n.d.
2023	Saint-Germain1	14 juin	Irrigué	19,6	80,4	15,5	29,3	46,5
			Non irrigué	18,4	81,6	14,1	31,1	48,6
		25 juillet	Irrigué	21	79	17,5	30,6	48,0
			Non irrigué	24,2	75,8	16,3	34,6	52,6
	12 septembre	Irrigué	22,3	77,7	21,9	27,2	44,0	
		Non irrigué	19,2	80,8	21,3	29,7	47,0	
	Saint-Germain2	14 juin	Irrigué	20,1	79,9	13,5	31,1	48,6
			Non irrigué	20,6	79,4	15,5	24,3	40,6
		25 juillet	Irrigué	17,3	82,7	18,2	28,6	45,6
			Non irrigué	21,2	78,8	19,5	24,8	41,2
12 septembre		Irrigué	20,4	79,6	20,1	28,3	45,3	
		Non irrigué	20	80	17,6	31	48,4	

4.2 Objectif 1b. Estimer, à partir de simulations, les gains de rendement associés à l'irrigation en climat futur.

Cette section fait l'objet d'un rapport présenté en annexe à la section 11.2 « (Objectif 1b). Simulation des impacts des changements climatiques sur les besoins en eau d'irrigation du maïs, du soya et des plantes fourragères avec le modèle STICS. »

4.3 Objectif 2. Évaluer les coûts de l'irrigation et ses effets sur la rentabilité de la méthode d'irrigation choisie.

Cette section fait l'objet d'un rapport présenté en annexe à la section 11.3 (Objectif 2). Analyse économique.

4.4 Objectif 3. Évaluer les besoins en eau de cette pratique sur les ressources hydriques en période d'étiage et son effet cumulatif sur les autres utilisateurs du territoire visé.

Les résultats de la démarche d'évaluation des ressources hydriques disponibles en période d'étiage sont présentés dans la section ci-bas. Il est important de noter que la disponibilité en eau est estimée à partir d'un exercice de modélisation conduit à l'échelle régionale et qu'elle peut ne pas refléter les conditions réelles observées localement. Il aussi est important de comprendre que les cartes présentées ci-dessous se limitent au territoire agricole potentiellement irrigable, mais aucune information n'est présentée sur la pression exercée par les autres usagers (résidentiel, industriel, commercial et institutionnel). Pour une caractérisation complète de la disponibilité, ces différentes sources de prélèvements devraient être prises en considération. Les cartes ne permettent donc pas une analyse exhaustive de la pression exercée sur les ressources en eau induite par l'impact cumulatif de l'ensemble des préleveurs. À ce sujet, nous référons le lecteur à consulter l'information contenue dans l'Atlas de l'eau du MELCCFP.

La carte des sols irrigables est présentée à la Figure 82. Les superficies présentées au Tableau 17 recensent, par région administrative, les surfaces réelles en ajustant selon les proportions de chaque membre (défini comme étant irrigable) de chaque polygone.

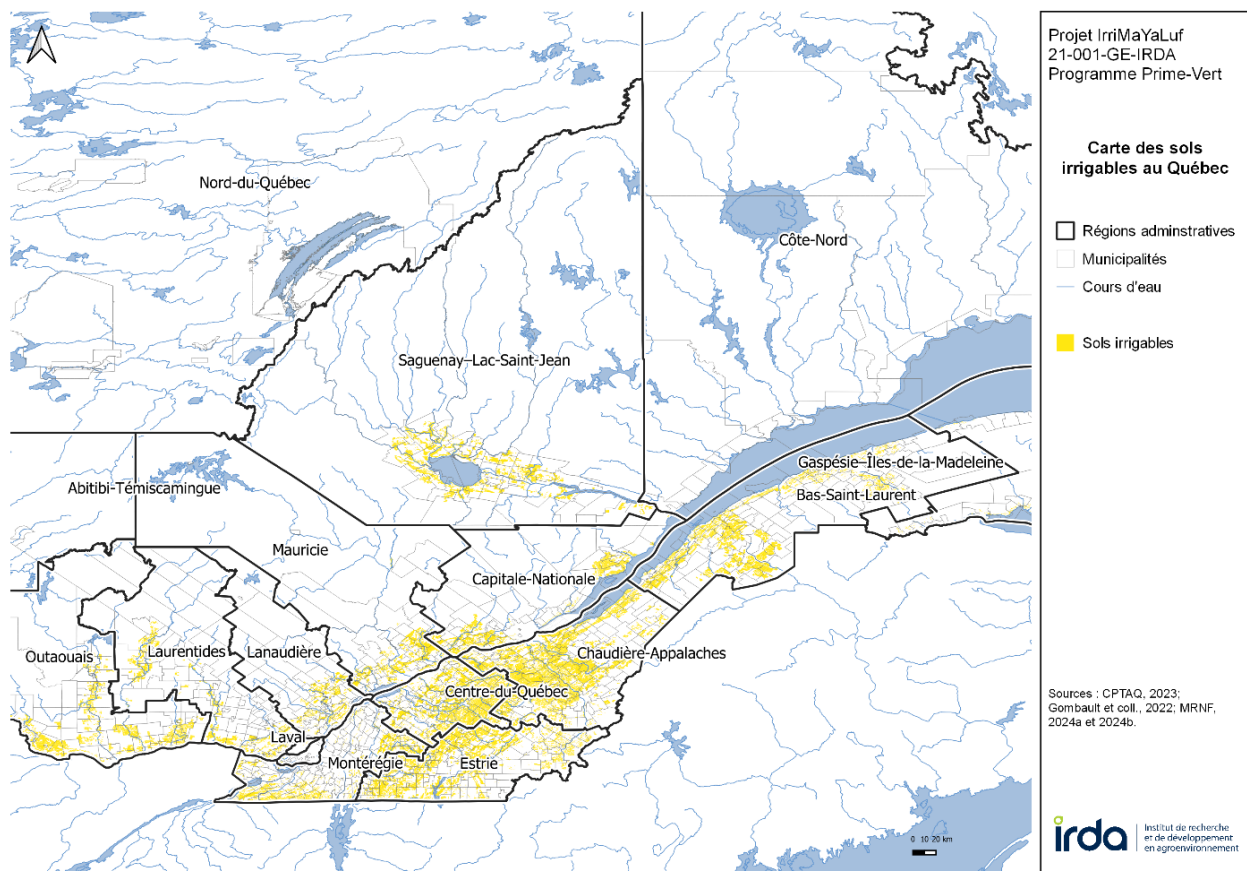


Figure 82. Sols irrigables du Québec agricole.

Tableau 17. Superficies irrigables par régions administratives au Québec.

Régions administratives	Superficie irrigable (ha)
Chaudière-Appalaches	295 156
Montérégie	216 639
Estrie	184 646
Bas-Saint-Laurent	181 064
Centre-du-Québec	159 260
Outaouais	148 143
Saguenay - Lac-Saint-Jean	111 961
Capitale-Nationale	96 511
Laurentides	92 289
Mauricie	86 863
Lanaudière	47 143
Gaspésie - Îles-de-la-Madeleine	9 873
Laval	1 501
Abitibi-Témiscamingue	869
Montréal	523

Les cartes présentées de la Figure 83 à Figure 85 ci-dessous doivent être interprétées avec précaution compte tenu des limites de l'approche méthodologique. Ces limitations découlent principalement du fait que la disponibilité en eau estimée est issue d'un exercice de modélisation à l'échelle régionale empreint de nombreuses sources d'incertitudes et qu'aucune validation exhaustive des résultats n'a été effectuée. L'information est présentée à une échelle locale (celle des unités irrigables relativement homogènes - UIRH), mais doit plutôt s'interpréter sur une base relative et à une échelle plus large, par comparaison des secteurs présentant des disponibilités contrastées. L'absence d'information décrivant la disponibilité en eau (surface ou souterraine) doit aussi être considérée pour interpréter adéquatement l'information présentée dans les cartes.

Dans chaque figure (la Figure 83 à Figure 85), l'estimation de la disponibilité de l'eau par UIRH est présentée en mm par année, période correspondant à une saison de culture de mai à septembre. Les résultats sont présentés en trois catégories : 0 à 120 mm/an, 120 à 240 mm/an et plus de 240 mm/an. Les cartes régionales sont présentées à la section 11.7. Les secteurs indiqués en jaune correspondent aux UIRH pour lesquels l'estimation de la disponibilité de l'eau n'est pas disponible.

Dans la carte de la disponibilité de l'eau de surface (Figure 83), les secteurs pour lesquels aucune donnée n'est disponible concernent principalement le sud de la Gaspésie, la MRC du Témiscouata au Bas-Saint-Laurent, le sud de l'Estrie, l'Île d'Orléans, en aval de la rivière Saint-Maurice dans le coin de Trois-Rivières, autour de Mont-Laurier dans les Laurentides, autour de Gracefield en Outaouais et les petits bassins versants orphelins en bordure du Fleuve Saint-Laurent. Les secteurs dont l'estimation de la disponibilité est dans la fourchette 0-120 mm/a sont concentrés en aval de la rivière Du Chêne dans la MRC de Lotbinière, entre la rivière Chaudière et la rivière Etchemin, à l'est de la rivière Batiscan dans la région de Portneuf, dans les sols irrigables entre les rivières Saint-François et Nicolet Sud-Ouest, de part et d'autre de la rivière Noire (MRC Acton, Haute-Yamaska et Val-Saint-François), à l'ouest de la rivière Saint-François dans la MRC de Drummond et en bordure de la rivière des Outaouais au niveau de la MRC de Pontiac en Outaouais. Autrement, la grande majorité du territoire irrigable montre des disponibilités supérieures à 240 mm/an.

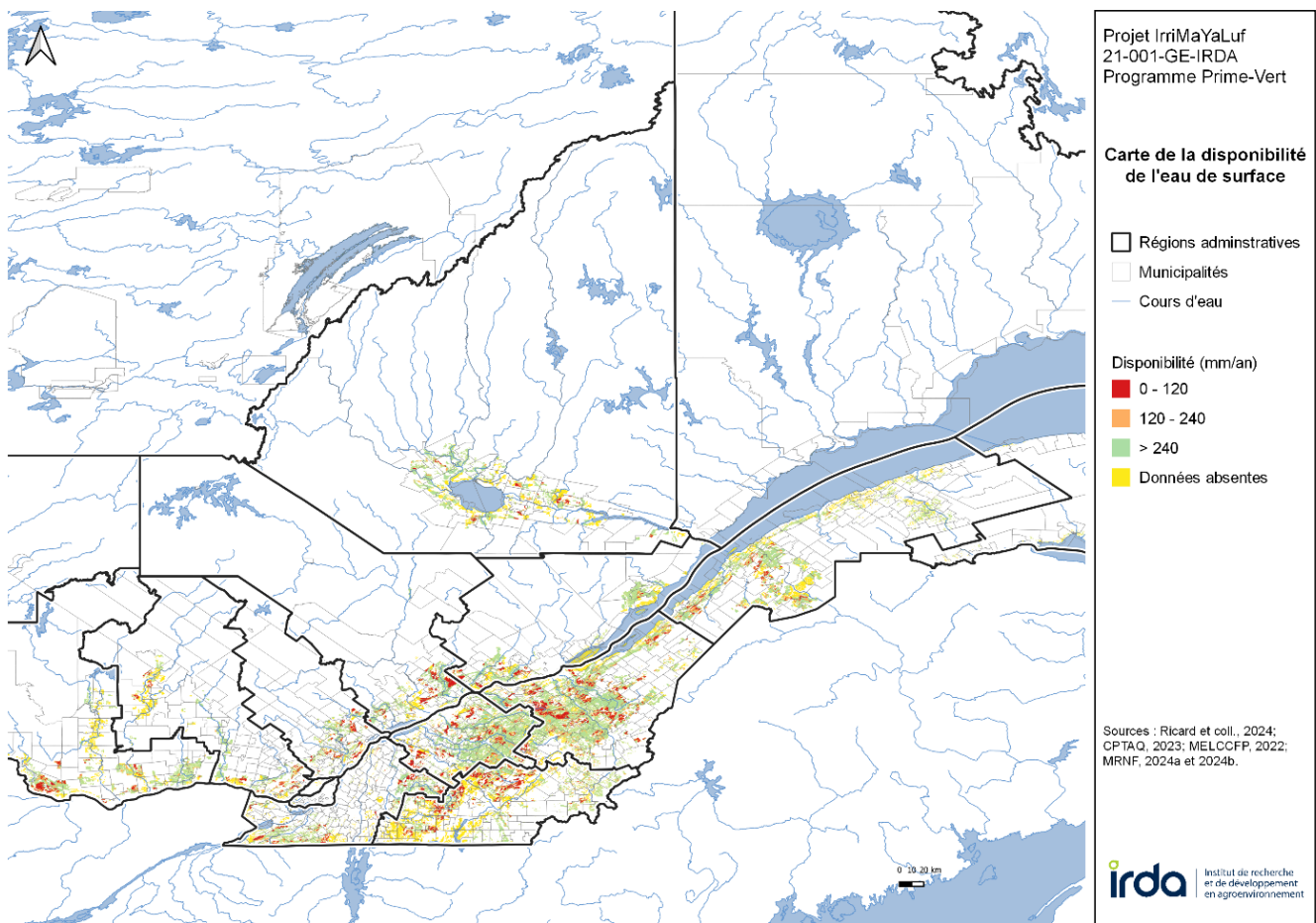


Figure 83 Disponibilité estimée de l'eau de surface (mm/a) par unité irrigable relativement homogène (UIRH).

Dans la carte de la disponibilité de l'eau souterraine (Figure 84), les secteurs pour lesquels aucune donnée n'est disponible concernent le sud de la Gaspésie, la région d'Amqui et celle de l'île d'Orléans. Les valeurs sont moins contrastées que celles de la disponibilité de l'eau de surface, se situant en grande majorité dans la tranche 120 à 240 mm/an. Peu de secteurs sont supérieurs à 240 mm/an. Quelques secteurs sont davantage concentrés dans la catégorie 0 à 120 mm/an : le sud de Lanaudière dans la tourbière de Lanoraie, dans l'ouest de la Montérégie, aux alentours de Saint-Valérien-de-Milton (Montérégie), de Saint-Gilles (Chaudière-Appalaches), de Deschambault-Grondines (MRC de Portneuf) et dans la MRC de Pontiac en Outaouais.

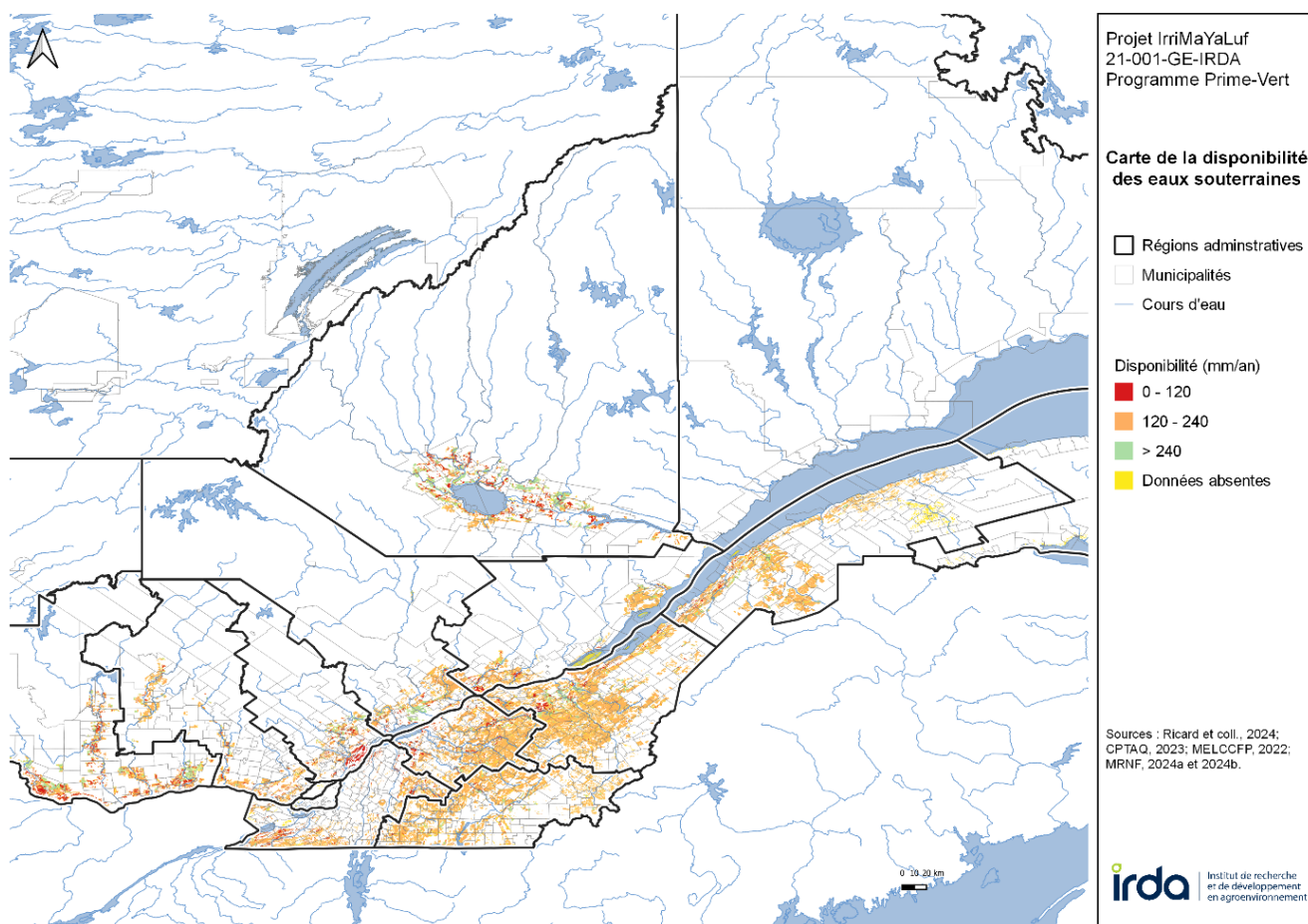


Figure 84. Disponibilité estimée de l'eau souterraine (mm/an) par unité irrigable relativement homogène (UIRH).

La Figure 85 présente la disponibilité totale en eau, représentant la somme des disponibilités de surface et souterraine. Dans la grande majorité du territoire, l'estimation de la disponibilité est supérieure à 240 mm/a. Il est possible d'identifier quelques secteurs localisés où la disponibilité est inférieure à 240 mm/a :

- le long des rivières Gatineau et du Lièvre (Outaouais-Laurentides), dans la MRC Brome-Missisquoi, autour du Lac-Memphrémagog et dans le secteur de Beaumont, où il y a un manque de données de la disponibilité de l'eau de surface;
- dans la tourbière de Lanoraie, dans la MRC Drummond (Saint-Pie-de-Guire et Saint-Bonaventure), où les estimations des disponibilités de l'eau de surface et des eaux souterraines sont faibles;
- autour de Deschambault-Grondines, au Saguenay – Lac-Saint-Jean, en bordure du fleuve dans le Bas-Saint-Laurent et dans la MRC Témiscouata, où les données de surface sont incomplètes et où les estimations de la disponibilité des eaux souterraines sont faibles.

Ces secteurs pourraient éventuellement faire l'objet d'une analyse plus poussée de leur vulnérabilité, en tenant compte de l'impact des changements climatiques, notamment.

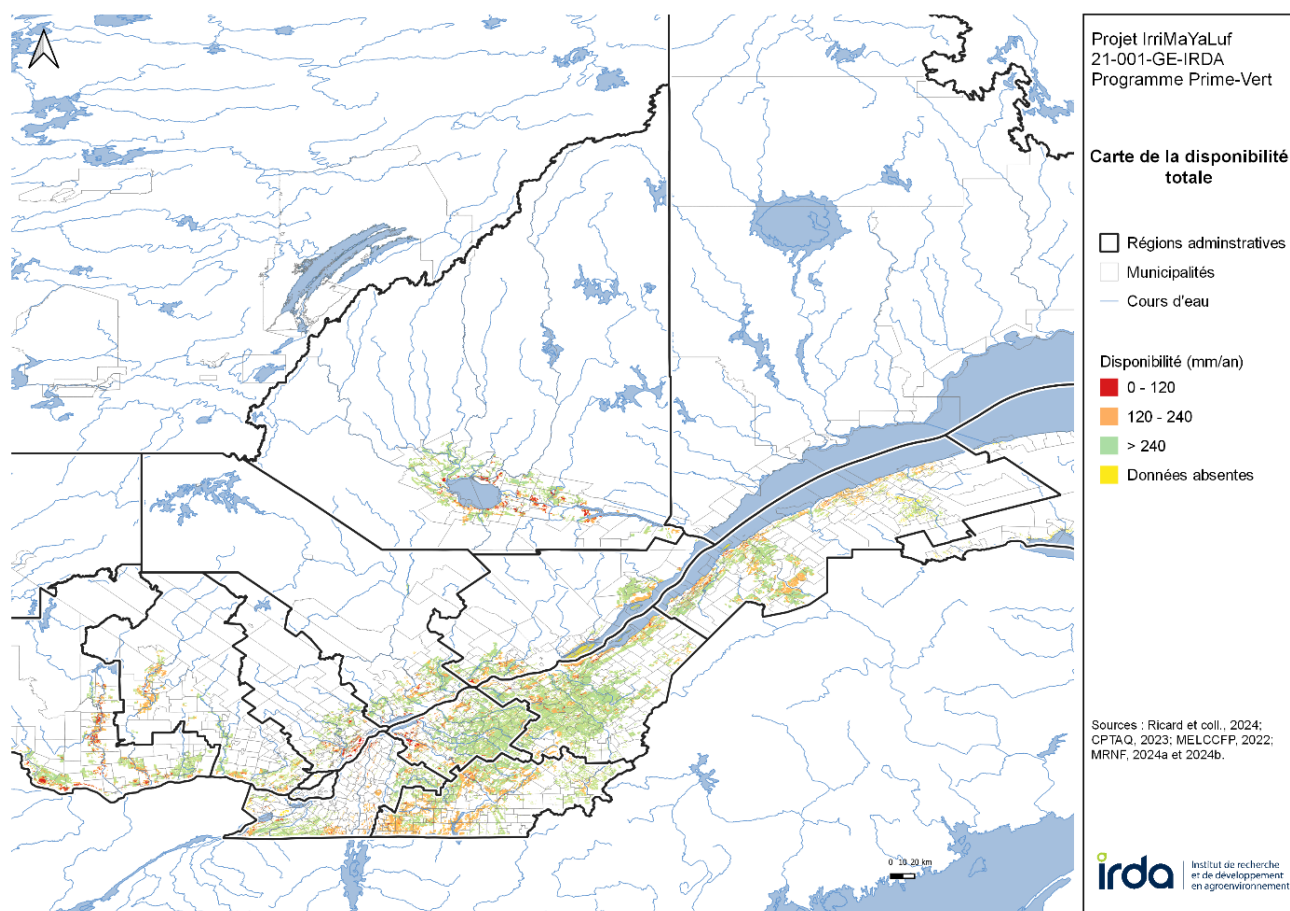


Figure 85. Disponibilité totale (mm/a) par unité irrigable relativement homogène (UIRH).

5 CONCLUSION

Les résultats des essais terrain confirment que le stress hydrique observé a eu un impact négatif sur le rendement de la luzerne et de la fléole (région Kamouraska), mais pas pour le maïs-grain et le soya (région Portneuf). Toutefois, les résultats réalisés avec le modèle STIC (simulations) confirment la pertinence agronomique de l'irrigation pour l'ensemble des cultures à l'étude. Des essais terrain de plus grande envergure permettraient possiblement d'y voir plus clair. Les cultures ont besoin d'eau et cette pratique est un moyen efficace d'intervention quand le statut hydrique du sol ne répond plus au besoin de la culture. Toutefois, la variabilité des conditions météo empêche toute prescription universelle de gestion de l'irrigation, si ce n'est de s'outiller pour évaluer à quelle vulnérabilité au stress hydrique est exposé un système cultural donné. Certains facteurs comme le type de sol et la qualité de ce dernier sont des facteurs qui peuvent diminuer la vulnérabilité d'un système cultural au déficit hydrique, mais qui peuvent aussi l'augmenter, comme c'est le cas avec les conditions attendues en climat futur.

L'évaluation des besoins en eau de cette pratique sur les ressources hydriques en période d'étiage a été faite selon un territoire délimité par la présence de sols à potentiel irrigable en territoire agricole. La Chaudière-Appalaches, la Montérégie, l'Estrie, le Bas-Saint-Laurent et le Centre-du-Québec se partagent 64 % des 1 632 441 ha de sols identifiés comme irrigables. Les secteurs dont l'estimation de la disponibilité en eau (cumulée surface et souterraine, exprimé sur une base annuelle) est dans la fourchette 0-120 mm/an (mai à septembre) sont concentrés en aval de la rivière Du Chêne dans la MRC de Lotbinière, entre la rivière Chaudière et la rivière Etchemin, à l'est de la rivière Batiscan dans la région de Portneuf, dans les sols irrigables entre les rivières Saint-François et Nicolet Sud-Ouest, de part et d'autre de la rivière Noire (MRC Acton, Haute-Yamaska et Val-Saint-François), à l'ouest de la rivière Saint-François dans la MRC de Drummond et en bordure de la rivière des Outaouais au niveau de la MRC de Pontiac en Outaouais. Autrement, la grande majorité du territoire irrigable montre des disponibilités supérieures à 240 mm/an. Malgré une disponibilité a priori suffisante pour répondre aux besoins actuels des cultures en présence (les essais au champ et les simulations convergent pour un besoin en eau d'au moins 100 mm/an ou 1000 m³/ha), il est important de rappeler que l'analyse proposée dans le cadre du présent projet ne tient pas compte de l'impact cumulatif des prélèvements sur le territoire ainsi que de la pression éventuellement exercée par les changements climatiques sur les besoins en eau des cultures et la disponibilité de la ressource.

La disponibilité des ressources en eau, en contextes de sols dits irrigables, n'est généralement pas un enjeu aussi important que celui ayant trait à l'aspect économique. Les conditions étudiées dans les scénarios ne permettent généralement pas d'obtenir un gain économique à irriguer ces cultures (30 ha) avec un canon enrouleur. Lorsqu'il est intéressant, ce sont lorsque les rendements, les prix et les pertes sont élevés, soit des situations qui ont peu de chance de se produire suffisamment souvent pour rentabiliser l'équipement. Plus spécifiquement, avec le rendement (7,6 t/ha) et le prix de référence (245 \$/t) de la FADQ pour la région du Kamouraska et avec un scénario de faibles pertes (10 %) il en coûte 43 295 \$ en irrigation pour en sauver 5586 \$. Pour un scénario de pertes élevées (50 %), il en coûte 58 434 \$ pour en sauver 41 895 \$. Enfin, lors d'une année où le canon enrouleur n'est pas utilisé, il en coûtera quand même 28 156 \$. Pour le maïs-grain, le rendement (7,4 t/ha) et le prix de référence utilisés (241 \$/t) de la FADQ pour la Capitale-Nationale et la Beauce, sont similaires aux fourrages, et par conséquent, les conclusions le sont aussi. Pour le soya, avec un rendement (2,6 t/ha) et un prix (530 \$/t) de référence, pour un scénario de pertes à 10 %, il en coûte 43 295 \$ pour sauver 4166 \$, alors qu'avec des pertes de 50 %, il en coûtera 58 343 \$ pour sauver 20 829 \$.

Une nuance importante est à soulever en contexte de production de plantes fourragères pour nourrir des animaux, où ce sont ces derniers qui permettent de générer des revenus. Les enjeux ayant trait aux sources alternatives de nourriture, en cas de pertes importantes dues au stress hydrique, doivent être considérés.

6 RÉFÉRENCES

- Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). 2002. Le système canadien de classification des sols, 3^e édition, Presses scientifiques du CNRC, Ottawa, Canada, 196 p.
- Akaike, H., 1974. A new look at the statistical model identification. IEEE Transactions on Automatic Control. Volume: 19, No. 6.
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes et M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration – Guidelines for computing crop Requirements. FAO Irrigation and drainage no. 56, Food and Agriculture organization, Rome 333 p.
- Boivin, C., Anderson, L., Ricard, S. et J.T. Denault (2024). EstimEau : un outil d'aide à la décision pour améliorer la gestion de l'eau et prévenir les conflits d'usage; VOLET 1 – Estimation des besoins en eau des exploitations agricoles. Rapport IRDA. 95 pages.
- Boivin et coll., 2018. Gestion raisonnée de l'irrigation – Guide technique. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. 312 p.
- Commission canadienne des grains (CCG), 2019. Procédure et équipement pour déterminer le poids spécifique. [En ligne]. <https://www.grainscanada.gc.ca/fr/qualite-grains/classement-des-grains/facteurs-de-classement/facteurs-de-classement-du-ble-canadien/procedures-et-equipement-a-suivre-pour-determiner-le-poids-specifique.html>. Page consultée le 25 janvier 2022.
- Commission de protection du territoire agricole du Québec. 2023. Zone agricole du Québec. [Jeu de données], dans Données Québec. [<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/zone-agricole-du-quebec>].
- Gee, G.W. et J.W. Bauder, 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.
- Gombault, C., Bossé, C., Lapointe, M. et Blais-Gagnon, A., C., 2022. Guide d'utilisation des données géospatiales de la couverture pédologique du Québec. IRDA. 68 pages. © Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)
- Hartmann, K., Krois, J., Rudolph, A. 2023. Statistics and Geodata Analysis using R (SOGA-R). Department of Earth Sciences, Freie Universitaet Berlin. [En ligne]. https://www.geo.fu-berlin.de/en/v/soga-r/Advances-statistics/Feature-scales/Logratio_Transformations/index.html
- Huchet, F., Gosselin, J.-S., Raynauld, M., Domaine, J. et R. Lefebvre. 2021. Outil de support à l'analyse des demandes d'autorisation de prélèvement d'eau – développement d'une méthodologie pour déterminer les pressions sur les ressources en eau souterraine et les zones de gestion particulière – Rapport final. Rapport de recherche R2061, soumis au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) en août 2021, 320 p.
- Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs du Québec (MELCCFP). 2019. Guide de conception des installations de production d'eau potable. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/potable/guide/documents/volume1.pdf>. Dernier accès: 8 avril 2024.
- MELCCFP. 2022. Atlas hydroclimatique du Québec méridional.
- Ministère des Ressources naturelles et des Forêts. 2024a. Découpage administratif. [Jeu de données], dans Données Québec. [<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/decoupages-administratifs>].

Ministère des Ressources naturelles et des Forêts. 2024b. Géobase du réseau hydrographique du Québec (GRHQ), [Jeu de données], dans Données Québec. [<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/grhq>].

Ricard, S., Osina, M., Huchet, F., Blais-Gagnon, A. et C. Boivin, 2024. EstimEau : un outil d'aide à la décision pour améliorer la gestion de l'eau et prévenir les conflits d'usage; VOLET 2 – Estimation de la disponibilité en eau à l'échelle du Québec agricole. Rapport IRDA et partenaires, 58 pages.

Vallée, J. et C. Boivin. 2023. Irrigation des plantes fourragères : outiller le milieu pour qu'il puisse prendre les bonnes décisions. Rapport final. IRDA. 137 pages.

Vallée, J. et C. Boivin. 2024. Mise à l'essai d'un système d'irrigation goutte-à-goutte mobile en contexte d'entreprises spécialisées dans la production de pommes de terre. Rapport final. IRDA. 61 pages.

7 DIFFUSION DES RÉSULTATS

Conférence

- Rencontre de la table sectorielle grandes cultures, MAPAQ, 27 janvier 2022.
- Irrigations en grandes cultures et plantes fourragères - Possibilités et essais en cours, Demi-journée du producteur du CARN, 15 février 2022.
- Stress hydrique et irrigation des prairies, Colloque sur les plantes fourragères – CRAAQ, 16 février 2022.
- Projet « IrriMaYaLuF », Rencontre conseillers grandes cultures MAPAQ, Complexe scientifique, 16 novembre 2022.
- Déterminer les besoins en eau des cultures, Formation sur la gestion de l'eau en grandes cultures biologiques et conventionnelles. Atelier diagnostic 1, 6 février 2023⁴.
- Déterminer les besoins en eau des cultures, Formation sur la gestion de l'eau en grandes cultures biologiques et conventionnelles. Atelier diagnostic 1, 20 février 2023⁴.

Mention

Développement en gestion raisonnée de l'irrigation, ITAQ Saint-Hyacinthe, 7 mars 2022.

⁴ Projet 22-014-PAD-SPGBQ. Gérer l'eau en grandes cultures biologiques : objectif terrain.

8 POINT DE CONTACT POUR INFORMATION

Responsable du projet

Carl Boivin
Chercheur | Régie de l'eau en productions végétales
Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)
2700, rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8
418 643-2380, poste 430
carl.boivin@irda.qc.ca

9 ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

- Volet essais au champ
 - Principalement l'équipe de l'IRDA de régie de l'eau en productions végétales : Carl Boivin, Jérémie Vallée, Lélia Anderson, Antoine Lamontagne, Félix Lavoie-Lochet, Francis-Olivier Lortie et Megann Desrochers.
 - Analyse statistique : Mick Wu (IRDA).
 - Entreprises agricoles : Ferme Catélie, Ferme Degau, Ferme J.P. Côté, Ferme Madrice et Ferme des Perles.
- Volet disponibilité de l'eau
 - Équipe d'hydrométrie, hydrologie et changements climatiques : Simon Ricard, Arianne Blais-Gagnon et Michael Osina.
- Volet simulation
 - Principalement Sylvestre Delmotte, consultant en agro-environnement, modélisation et démarche participative
 - Guillaume Jégo et Marianne Crépeau, Agriculture et Agroalimentaire Canada.
- Volet économique : CECPA
- Comité de suivi (MAPAQ) : Mikael Guillou, Ayitre Akpakouma et Sarah Brousseau-Trudel.

10 REMERCIEMENTS AUX PARTENAIRES FINANCIERS

Ce projet a été financé par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation dans le cadre du volet 2 du programme Prime-Vert.

11 ANNEXE

11.1 Rapport Pédologie



Balises techniques, économiques, sociales et
environnementales au recours de l'irrigation du maïs, du soya
et des plantes fourragères

Rapport pédologique – Profils 2021-2023

Date : Février 2024

Responsable scientifique : Catherine Bossé, chargée de projets en pédologie

Ce rapport a été produit à l'attention de :
Carl Boivin, IRDA

1 INTRODUCTION

Des essais d'irrigation au champ ont été effectués de 2021 à 2023. Les essais en cultures pérennes (mélange luzerne-fléole en année d'établissement et en année de production) ont été réalisés dans la région du Bas-Saint-Laurent et ceux en grandes cultures (maïs-grain et soya) dans la région de la Capitale-Nationale. La réalisation des profils de sol avait pour but d'identifier des sites répondants à l'irrigation. Les sols sableux et/ou graveleux très perméables étaient particulièrement ciblés. Les deux objectifs principaux pour la réalisation des profils de sols dans le cadre du projet étaient :

- 1- Identifier des sites d'essais à potentiel irrigable;
- 2- Évaluer la variabilité spatiale des sols présents sur le site.

Des profils de sol ont été réalisés à chacun des sites. **Pour les essais de l'année 2021, les profils ont été réalisés au printemps 2022.** En 2022 et 2023, les profils de sols ont été caractérisés avant l'implantation du site. Ces profils ont permis d'identifier les matériaux composant le sol de chacun des sites. La granulométrie, la couleur, la structure, la consistance et la porosité du sol ont été évaluées pour chacun des horizons identifiés. Certaines limitations au niveau de la structure du sol, qui pourraient potentiellement limiter la perméabilité, ont été recensées (une structure lamellaire, massive, une consistance ferme ou une discontinuité lithologique). La série de sols a également été définie. Les sols rencontrés près des cours d'eau présentent généralement une diversité pédologique (variabilité spatiale), d'où la nécessité de réaliser des profils de sols supplémentaires pour s'assurer de l'homogénéité du site.



Figure 1 : Emplacement géographique des sites de la région du Bas-Saint-Laurent.

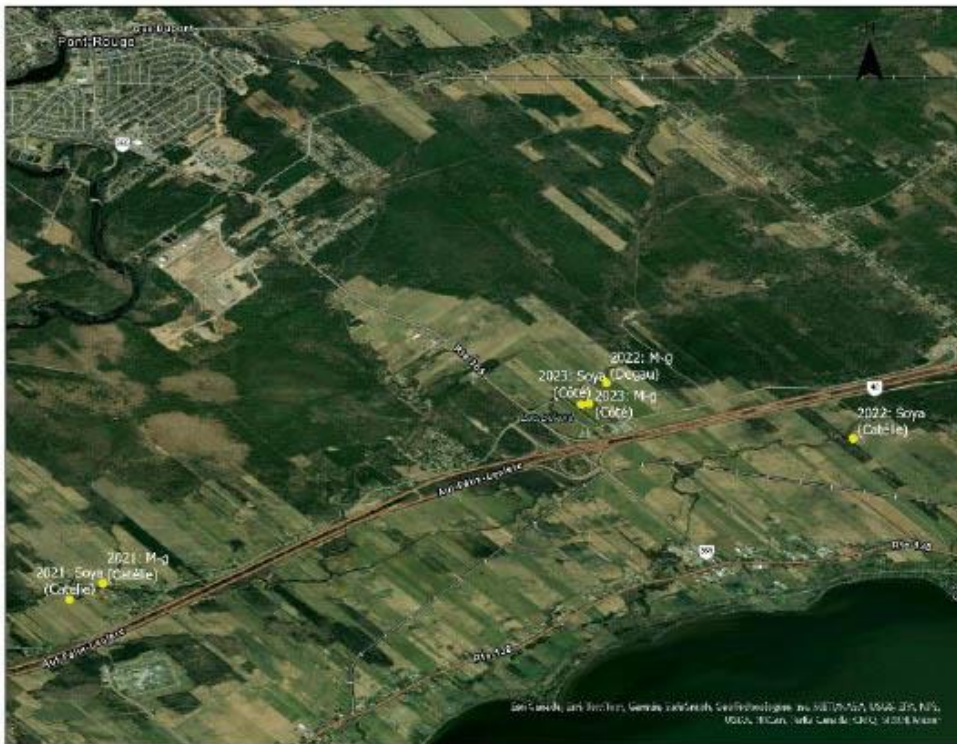


Figure 2 : Emplacement géographique des sites de la région de la Capitale-Nationale, secteur de Portneuf.

2 DESCRIPTION GÉNÉRALE DES PROFILS DE SOLS

Le Tableau 1 résume les caractéristiques importantes des profils de sols réalisés dans le cadre du projet. La série de sols, la profondeur au gley et la classe de drainage naturel y sont répertoriées. Un horizon de sol gleyifié est caractérisé par une couleur grise ou des marbrures très marquées. Le fer est sous sa forme réduite. La couleur est une expression morphologique des sols permettant de caractériser l'hydrologie. La profondeur au gley indique la profondeur (en cm) à laquelle l'horizon gleyifié a été atteint. L'horizon gleyifié permet d'estimer le niveau maximum moyen des eaux souterraines (NMMES) et les fluctuations de la nappe. Ce type d'horizon indique une zone de saturation en eau prolongée par les eaux souterraines et sont aussi des indicateurs du drainage naturel des sols. Dans le cadre du projet, les sites avec une profondeur au gley importante seront privilégiés.

Tableau 1 : Description générale des profils de sols réalisés

Site	Culture	Année	Série de sols	Profondeur au gley	Drainage naturel
Ferme Catélie	Soya	2021	Achigan	40 cm	Imparfait
	Maïs-grain	2021	Chaloupe	25 cm	Mal drainé
	Soya	2022	Saint-Thomas	65 cm	Modéré
Ferme JP Côté	Soya	2023	Morin	Non-atteint	Très rapide
	Maïs-grain	2023	Morin	Non-atteint	Très rapide
Ferme Degau	Maïs-grain	2022	Chicot	60 cm	Modéré
Ferme Madrice	Luzerne-fléole, 1 ^{re} année (2021)	2021 à 2023	Saint-Nicolas	Non-atteint	Rapide
	Luzerne-fléole, 3 ^e année (2022)	2022 et 2023	Saint-Nicolas	Non-atteint	Très rapide
Ferme Les Perles	Luzerne-fléole, 4 ^e année	2021	-	10 cm	Mal drainé



Figure 2 : Profil de sol, ferme JP Côté, maïs-grain (2023)



Figure 4 : Profil de sol, ferme JP Côté, soya (2023)

3 DESCRIPTION DÉTAILLÉE DES PROFILS DE SOLS

Site : Ferme Catélie

Culture : Soya

Année : 2021

Tableau 3 : Description du site

No. de site	2021 : Soya (Catélie)
Série :	Achigan
Sous-groupe :	Podzol humique orthique
Profondeur au gley :	40 cm
Drainage :	Imparfait



Tableau 4 : Description des horizons du site

Horizon	Profondeur	Texture	Fragments	Structure	Consistance	Limitations
Ap	0-23 cm	Sable loameux	-	Subangulaire, moyenne à grossière, faible	-	-
Ae	23-34 cm	-	-	-	-	-
Bfj	34-40 cm	Sable	-	Particulaire	Meuble	-
Bg	40-60 cm	Sable	1-4%	Particulaire	Meuble	-
Cg	> 60 cm	-	5-14%	-	-	-

Le sol de ce site possède une texture de sable loameux en surface (horizon A) et une texture sableuse au niveau du sous-sol (horizon B). La profondeur au gley a été fixée à 40 cm. La structure du sol varie de subangulaire en surface à particulaire en profondeur. La série de sols associée à ce site est Achigan, avec un drainage imparfait.

Le site possède les critères recherchés pour les matériaux (sableux). La structure n'y est pas limitative. Puisque le gley est peu profond (40 cm), le site répondra moins à l'irrigation au printemps ou lors des années pluvieuses. Le site était uniforme.

Site : Ferme Catélie
 Culture : Maïs-grain
 Année : 2021

Tableau 5 : Description du site

No. de site	2021 : Maïs-grain (Catélie)
Série :	Chaloupe
Sous-groupe :	Gleysol humique orthique
Profondeur au gley :	25 cm
Drainage :	Mal drainé



Tableau 6 : Description des horizons du site

Horizon	Profondeur	Texture	Fragments	Structure	Consistance	Limitations
Ap	0-25 cm	Loam limoneux	-	Subangulaire, moyenne à grossière, faible à modéré	Friable	-
Bg	> 25 cm		-	Lenticulaire		Structure lenticulaire

Le sol de ce site possède une texture de loam limoneux tout au long du profil. La profondeur au gley a été fixée à 25 cm. La structure du sol varie de subangulaire en surface à lenticulaire en profondeur. La série de sols associée à ce site est Chaloupe, avec un mauvais drainage.

Le site ne correspond pas aux critères recherchés. La texture du sol est trop lourde avec absence de fragment. De plus, la structure lenticulaire est très limitative pour l'écoulement de l'eau à 25 cm de profondeur.

Site : Ferme Catélie
 Culture : Soya
 Année : 2022

Tableau 7 : Description du site

No. de site	2022 : Soya (Catélie)
Série :	Saint-Thomas
Sous-groupe :	Podzol humique orthique
Profondeur au gley :	65 cm
Drainage :	Modéré



Tableau 8 : Description des horizons

Horizon	Profondeur	Texture	Fragments	Structure	Consistance	Limitations
Ap1	0-10 cm	Sable loameux	1-4 %	Particulaire	Meuble	-
Ap2	10-28 cm	Sable loameux	1-4 %	Subangulaire, grossière, faible	Très friable	-
Bf	28-40 cm	Sable	-	Particulaire	Meuble	-
BC	40-65 cm	Sable	-	Particulaire	Meuble	-
Cg	> 65 cm	Loam sablo-argileux	-	-	-	-

La texture du sol de ce site est un sable loameux en surface (horizon A), un sol sableux au niveau du sous-sol (horizon B) et un sol loam sablo-argileux dans le substratum (horizon C). La profondeur au gley a été fixée à 65 cm. La structure du sol est particulaire, mis à part dans l'horizon Ap2 (10-28 cm) où elle est plutôt de type subangulaire. La consistance varie de meuble à très friable.

Le site possède les critères recherchés pour les matériaux (sableux). La structure n'y est pas limitative. L'horizon Bf (fer oxydé) témoigne que le sol n'était jamais saturé en eau de 0 à 65 cm de profondeur durant toute l'année, ce qui était un élément à considérer pour la recherche de site. Le site était uniforme.

Site : Ferme Côté
 Culture : Soya
 Année : 2023

Tableau 9 : Description du site

No. de site	2023 : Soya (JP Côté)
Série :	Morin
Sous-groupe :	Podzol humo-ferrique orthique
Profondeur au gley :	Non atteint
Drainage :	Très rapide



Tableau 10 : Description des horizons

Horizon	Profondeur	Texture	Fragments	Structure	Consistance	Limitations
Ap1	0-10 cm	Sable loameux	5-14 %	Particulaire	Meuble	-
Ap2	10-33 cm		5-14 %	Subangulaire, moyenne à grossière, faible	Très friable	-
B	33-60 cm		1-4 %	Particulaire	Meuble	-
BC	60-80 cm		1-4 %	Particulaire	Meuble	-
C	> 80 cm		1-4 %	-	-	-

Pour ce site, la texture demeure la même pour tous les horizons de sol, soit un sable loameux. À noter qu'il y a absence de gley dans ce profil. Quant à la structure, elle a été identifiée comme étant particulaire, mis à part pour l'horizon Ap2 (10-33 cm) où elle est de type subangulaire. La consistance varie de meuble à très friable.

Le site possède les critères recherchés pour les matériaux (sableux). La structure n'y est pas limitative. L'horizon B témoigne que le sol n'était jamais saturé en eau sur tout le profil (1 m) durant toute l'année, ce qui en fait un site de qualité. Le site était uniforme.

Site : Ferme Côté
 Culture : Maïs-grain
 Année : 2023

Tableau 11 : Description du site

No. de site	2023 : Maïs-grain (JP Côté)
Série :	Morin
Sous-groupe :	Podzol humo-ferrique orthique
Profondeur au gley :	Non atteint
Drainage :	Très rapide



Tableau 12 : Description des horizons

Horizon	Profondeur	Texture	Fragments	Structure	Consistance	Limitations
Ap1	0-10 cm	Sable loameux	1-4 %	Subangulaire, fine à moyenne, faible	Très friable	-
Ap2	10-30 cm		1-4 %	Subangulaire, moyenne à grossière	Très friable	-
Bf	30-54 cm		1-4 %	Subangulaire, fine à moyenne, faible	Meuble	-
BC	54-80 cm		1-4 %	Particulaire	Meuble	-
C	> 80 cm	-	-		-	-

En ce qui a trait à la texture du sol, celle-ci demeure identique tout au long du profil, soit un sable loameux. Il n’y a pas présence de gley dans ce profil. La structure du sol est généralement de type subangulaire, sauf dans l’horizon BC (54-80 cm) où elle est plutôt de type particulaire. Enfin, la consistance varie de meuble à très friable.

Le site possède les critères recherchés pour les matériaux (sableux). La structure n’y est pas limitative. L’horizon B témoigne que le sol n’était jamais saturé en eau sur tout le profil (1 m) durant toute l’année, ce qui en fait un site de qualité. Le site était uniforme.

Site : Ferme Degau
 Culture : Maïs-grain
 Année : 2022

Tableau 13 : Description du site

No. de site	2022 : Maïs-grain (Degau)
Série :	Chicot
Sous-groupe :	Brunisol mélanique gleyfié
Profondeur au gley :	60 cm
Drainage :	Modéré



Tableau 14 : Description des horizons

Horizon	Profondeur	Texture	Fragments	Structure	Consistance	Limitations
Ap	0-33 cm	Loam sableux fin	5-14 %	Subangulaire, moyenne à grossière, faible à modéré	Très friable	-
Bmgjk	33-60 cm	Loam	15-24 %	Subangulaire, moyenne à grossière, faible	Friable	Structure grossière
Ckg	> 60 cm	-	25-34 %	-	-	-

Pour ce site de la ferme Degau, la texture du sol est un loam sableux-fin en surface (horizon Ap) et un loam caractérise l'horizon B. La profondeur du gley a été fixée à 60 cm. La structure demeure subangulaire dans les horizons Ap (0-33 cm) et Bmgjk (33-60 cm). En surface, la consistance est très friable tandis qu'elle est friable au niveau du sous-sol. Le sol contient entre 5 % en volume de fragments en surface et le volume augmente en profondeur.

Le site est loameux, légèrement plus lourd que le matériau recherché. Cependant, la quantité de fragments retrouvée sur le site pourrait améliorer sa perméabilité. La nappe d'eau fluctue légèrement dans l'horizon B, sans y demeurer en permanence. La structure grossière pourrait s'avérer limitative à 33 cm de profondeur. Le site était uniforme.

Site : Ferme Madrice
 Culture : Luzerne-fléole en 1^{re} année
 Année : 2021

Tableau 15 : Description du site

No. de site	2021 : Luzerne-fléole en 1 ^{re} année (Madrice)
Série :	Saint-Nicolas
Sous-groupe :	Podzol humo-ferrique orthique
Profondeur au gley :	Non-atteint
Drainage :	Rapide



Tableau 16 : Description des horizons

Horizon	Profondeur	Texture	Fragments	Structure	Consistance	Limitations
Ap1	0-13 cm	Loam sablo-argileux	15-24 %	Subangulaire, fine à moyenne, modéré	Très friable	-
Ap2	13-28 cm		15-24 %	Subangulaire, grossière à très grossière, faible à modéré	Friable	Structure grossière
BC	28-90 cm		35-44 %	Particulaire	Meuble	-

La série de sols présente sur le site est Saint-Nicolas et possède un drainage rapide. C'est un sol résiduel, c'est-à-dire qu'il provient de l'altération de la roche mère. La texture de loam sablo-argileux est présente tout au long du profil et la présence de gley n'a pas été détectée. La quantité de fragments augmente en profondeur. Pour l'horizon de surface (Ap), la structure est subangulaire, tandis qu'elle est particulaire pour le sous-sol (horizon BC). La consistance varie de très friable en surface (horizon Ap) à meuble en profondeur (horizon BC).

Le site est légèrement plus lourd que le matériau recherché. Cependant, la quantité de fragments retrouvée sur le site améliore sensiblement sa perméabilité. Le gley n'a pas été atteint signifiant que le niveau maximal des eaux souterraines se situe à une profondeur supérieure à un mètre. La structure pourrait s'avérer limitative entre 13 et 28 cm de profondeur. Le site était uniforme.

Site : Ferme Madrice
 Culture : Luzerne-fléole en 3^e année
 Année : 2022

Tableau 17 : Description du site

No. de site	2022 : Luzerne-fléole en 3 ^e année (Madrice)
Série :	Saint-Nicolas
Sous-groupe :	Podzol humo-ferrique orthique
Profondeur au gley :	Non-atteint
Drainage :	Rapide

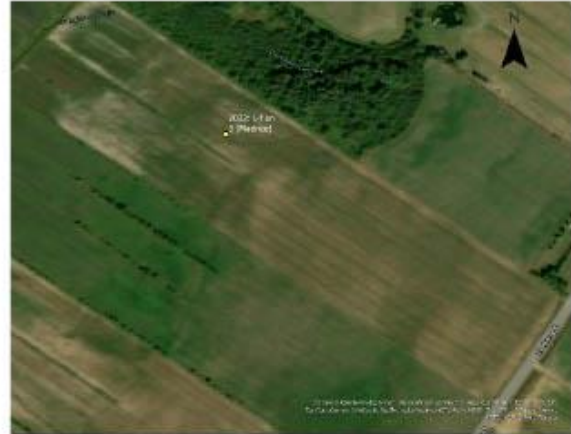


Tableau 18 : Description des horizons

Horizon	Profondeur	Texture	Fragments	Structure	Consistance	Limitations
Ap	0-20 cm	Loam	15-24 %	Granulaire, très fin à fine, modéré	-	-
Bf	20-40 cm		25-34 %	Granulaire, fine à moyenne, modéré	-	-
C	40-80 cm		35-44 %	Particulaire	-	Présence de beaucoup de schistes horizontaux

Sur ce site, la série de sols présente est Saint-Nicolas. Cette série de sols est caractérisée par un drainage rapide. La texture de loam est présente tout au long du profil de sol et la quantité de fragments retrouvée est importante, augmentant sensiblement la perméabilité dans ce type de sol. Quant à la structure, elle est granulaire dans les deux premiers horizons et particulaire dans le dernier.

Le site contient beaucoup de fragments, ce qui correspond au type de sol recherché. Le gley n'a pas été atteint signifiant que le niveau maximum moyen des eaux souterraines se situe à une profondeur supérieure à un mètre, ce qui en fait un site de qualité. La structure n'est pas limitative. Toutefois, la présence de schistes horizontaux entre 40 et 80 cm pourrait s'avérer limitative. Le site était uniforme.

11.2 (Objectif 1b). Simulation des impacts des changements climatiques sur les besoins en eau d'irrigation du maïs, du soya et des plantes fourragères avec le modèle STICS

Simulation des impacts des changements climatiques sur les besoins en eau d'irrigation du maïs, du soya et des plantes fourragères avec le modèle STICS

Sylvestre Delmotte, agr., PhD, consultant en agro-environnement, modélisation et démarche participative. sylvestre@sylvestredelmotte.ca

Guillaume Jégo, PhD, chercheur en modélisation des agrosystèmes, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement de Québec AAC.

Marianne Crépeau, PhD, professionnelle de recherche en modélisation des agrosystèmes, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement de Québec., AAC

Février 2024

1. Introduction

Dans le contexte du projet « Établir des balises techniques, économiques, sociales et environnementales concernant le recours à l'irrigation du maïs, du soya et des plantes fourragères » mené par l'IRDA, l'objectif de ce rapport est de présenter les résultats de modélisations des besoins en eau d'irrigation en climat de référence et futur.

Agriculture et Agro-alimentaire Canada contribue au développement du modèle de culture STICS depuis près de 20 ans. Ce modèle, initialement créée par l'Institut National de Recherche Agronomique en France, vise à reproduire, au pas de temps quotidien, la croissance des plantes cultivées et les cycles de l'eau, de l'azote et du carbone à l'échelle du champ (unité spatiale homogène en termes de climat, de sol et de région).

Le modèle STICS a fait l'objet de multiples travaux de calibration et validation au Canada et notamment au Québec, en particulier par l'équipe de Guillaume Jégo. Ainsi le modèle a été calibré et validé dans les conditions de cultures québécoises (sols, régions et climats) pour le maïs (Jégo et coll., 2011; Saadi et coll., 2022), le soya (Jégo et coll., 2010; Crépeau et coll., 2021), la fléole (Jégo et coll., 2013). La luzerne a récemment été calibrée en Europe (Strullu et coll., 2020) et la performance de ce paramétrage dans les conditions de croissance du Québec a été confirmée récemment (Jégo et coll., en préparation).

Ce rapport présente donc les résultats de deux activités menées avec le modèle STICS :

- La comparaison d'observations et de simulations de croissance des plantes et de l'humidité du sol en condition irriguée et non irriguée, sur la base des suivis réalisés par l'équipe de l'IRDA sur des champs de maïs, soya et plantes fourragères en 2021 et 2022.
- La simulation de la croissance des plantes et des besoins en eau d'irrigation pour 9 stations météo du Québec, pour les climats passés et futurs.

2. Comparaison des observations et simulations

Parmi les différentes situations culturales suivies par l'IRDA en 2021 et 2022, nous avons pu utiliser 5 situations pour réaliser des comparaisons entre les simulations du modèle et les observations de l'IRDA. Il s'agit du suivi du maïs et du soya en 2021 et en 2022 dans la région de Deschambault, ainsi que du suivi d'un champ de luzerne et fléole en mélange en 2022 dans la région de Kamouraska. Le suivi du même champ en 2021 n'a pu être utilisé puisqu'il s'agissait de l'année où la prairie a été implantée avec une plante abris (céréale), rendant impossible la comparaison avec le modèle qui permet de reproduire la croissance d'une culture pure (une seule espèce) ou d'au maximum deux cultures associées. Dans le cas de l'implantation en 2021 de la prairie, il y avait en effet 3 espèces : la céréale et les deux espèces de plantes fourragères. Le second champ suivi en 2022 dans Kamouraska n'a pu être simulé du fait de la nature très pierreuse du sol rendant incertaines à la fois les observations et les simulations de l'eau dans le sol.

Le tableau 1 présente les différents sols de ces différentes situations qui ont été paramétrés dans le modèle STICS. Les informations de texture, pH et matière organique (MO) proviennent des analyses des sols réalisées par le laboratoire de l'IRDA. La densité apparente a été mesurée in-situ

par l'IRDA. Finalement, les valeurs des variables décrivant les caractéristiques de rétention de l'eau dans le sol (humidités à la capacité au champ, au point de flétrissement permanent et à saturation) ont été obtenues, sur la base des informations précédentes, en utilisant le logiciel SPAW Hydrology de l'USDA¹. Ces valeurs ont été ajustées au regard des données observées, quand il apparaissait par exemple que les valeurs d'humidité à la capacité au champ ou les valeurs au point de flétrissement permanent étaient sur ou sous estimées. En plus des sols, chaque régie des cultures a été paramétrée suivant les informations recueillies par l'IRDA : date de semis, date de récolte, dates des apports d'irrigation et volumes réels apportés. Les données météorologiques quotidiennes (température, précipitations, rayonnement, vent et humidité relative) des stations de Deschambault SM et de Kamouraska de 2021 et 2022 ont été utilisées pour les simulations, à l'exception de la variable précipitation qui a été remplacée par les données mesurées au champ par l'IRDA quand elles étaient disponibles. Du fait de l'absence d'information sur la régie de la fertilisation des cultures, mais également pour pouvoir isoler l'effet du stress hydrique sur les plantes, le modèle a été paramétré pour reproduire la croissance des plantes en conditions non limitantes en azote.

a. Biomasse aérienne totale

Le tableau 2 compare les biomasses observées et simulées pour les différentes cultures, années et régies d'irrigation.

En ce qui concerne le maïs, les biomasses observées et simulées sont très proches, à la fois en conditions irriguées et non irriguées. En effet, les biomasses observées diffèrent peu entre les traitements irrigués et non irrigués en 2021 (+1.1 t MS /ha en conditions irriguées) et 2022 (+ 1.1 t MS /ha en conditions irriguées), alors que celles simulées avec et sans irrigation sont identiques (à 20,9 t MS /ha en 2021 et 17,3 t MS / ha en 2022). Le modèle ne prédit donc pas d'effet de l'irrigation sur le rendement ni en 2021 ni en 2022. Cependant, il semble bien reproduire l'effet des différences climatiques (probablement lié aux différences de température) des années 2021 et 2022, puisque dans toutes les conditions, les différences entre observation et simulation sont de l'ordre de quelques pourcents (tableau 2).

Le soya, quant à lui, donne des résultats plus mitigés en termes de comparaison des biomasses. En 2021, le modèle semble surestimer légèrement la biomasse (de 32 et 44% pour les conditions non irriguées et irriguées). Le soya ne semble pas non plus avoir répondu à l'irrigation, à la fois dans les observations et simulations, traduisant probablement l'absence de stress hydrique lors de l'année 2021. Pour l'année 2022, le champ de soya a souffert de problèmes de maladies fongiques (Jérémy Vallée, IRDA, com. Pers.). Ce facteur affectant la croissance des plantes n'est pas reproduit par le modèle STICS, ce qui explique certainement la très forte différence de biomasse simulée par le modèle. Le modèle prévoit pour 2022 des biomasses plus faibles qu'en 2021, tel qu'observé également dans le maïs, traduisant un potentiel climatique plus faible. Néanmoins, là encore, les biomasses simulées avec et sans irrigation ne sont pas différentes, traduisant le fait que le potentiel climatique de 2022 a probablement été davantage limité par la température que par les précipitations à Deschambault.

¹ <https://www.ars.usda.gov/research/software/download/?softwareid=492&modecode=80-42-05-10>

Finalement, les résultats pour le mélange luzerne-fléole sont certainement les plus intéressants au niveau de la réponse des cultures à l'irrigation. À la fois dans les observations et les simulations, la différence entre les biomasses récoltées totales au cours de la saison (3 coupes) sont importantes entre la régie irriguée et non irriguée. L'irrigation (5 apports entre juin et septembre) a permis d'obtenir près de 3 t MS / ha de rendement supplémentaire selon les observations, le modèle prédisant un écart de rendement de 2 t MS / ha. En conditions non irriguées, la différence entre les simulations et les observations est de 11%, alors qu'en conditions irriguées elle est très faible (1%).

Ces résultats sont globalement très satisfaisants puisque les écarts entre les valeurs simulées et observées, sont, sauf dans les conditions particulières du soya en 2022, plutôt faibles. Le modèle reproduit correctement les ordres de grandeur de biomasse, ainsi que les écarts entre traitement irrigués et non irrigués, lorsqu'ils sont significatifs.

b. Humidité du sol

L'IRDA avait équipé chaque champ avec des sondes TDR permettant de mesurer l'évolution du stock d'eau du sol. Puisque le stock d'eau du sol détermine l'accessibilité de l'eau pour la plante, et donc la présence éventuelle de période de stress hydriques qui vont ralentir la croissance de la plante, reproduire adéquatement la dynamique de l'eau dans le sol et en particulier de sa disponibilité est un enjeu majeur pour pouvoir prédire correctement les besoins en eau d'irrigation.

Les figures 1 et 2 présentent la comparaison des dynamiques mesurées et simulées des stocks d'eau dans le sol pour le maïs en 2021 et 2022. Les valeurs observées et simulées sont très proches, à la fois pour les 2 années et pour les deux horizons de sols. Le modèle reproduit donc de façon très satisfaisante les différents processus qui influencent le stock d'eau du sol, à savoir l'infiltration, l'écoulement entre les couches de sol et finalement le prélèvement d'eau par les plantes.

Les figures 3 et 4 présentent ces mêmes résultats pour le soya. Si les résultats semblent également très satisfaisants pour le soya en 2021, à la fois en condition irriguée et non irriguée pour le premier horizon de sol, ils semblent également être dans des ordres de grandeurs raisonnables en 2022 malgré le fait que le modèle simule une croissance de la plante plus élevée que les observations, et surestime donc probablement la transpiration. Néanmoins, puisque nous ne disposons pas de données de suivi de la croissance des plantes au cours de la saison, il est difficile d'estimer à partir de quelle période de l'année le modèle aurait dû estimer des prélèvements d'eau supérieurs du fait de la non-simulation de l'effet des maladies sur la croissance du soya. Au regard de cette incertitude, les résultats nous paraissent donc également très satisfaisants.

Finalement, la figure 5 présente l'évolution de l'eau dans le sol dans le mélange luzerne fléole en 2022. Étant donné la réalisation des fauches, les équipements de mesure ont dû être retirés du champ à chaque fauche et re-installés, ce qui introduit probablement une source d'incertitude sur les mesures. Il est possible d'observer, par exemple pour l'horizon 1 en régie non irriguée, qu'en début de saison, la capacité au champ semble se situer autour de 27% de volume, alors qu'en

milieu de saison, même une grande pluie ne permet pas de remonter le niveau de la réserve en eau du sol au-dessus d'environ 20% du volume de sol. Pour cette situation, si la dynamique semble relativement bien reproduite pour le premier horizon, les écarts entre les observations et les simulations sont plus importants, en particulier pour la régie non irriguée, et pour le second horizon. Malgré plusieurs tests d'ajustement de certains paramètres de sol, nous n'avons pu améliorer ces résultats. Ceci pourrait potentiellement être expliqué par l'hétérogénéité des sols. Aux fins de paramétrage et test du modèle, nous avons fait l'hypothèse que le sol était homogène dans la section irriguée et non irriguée, et nous avons donc paramétré un seul sol pour les deux sections. Or, si le sol est effectivement hétérogène (tel que semble l'indiquer l'ordre de grandeur différent des humidités relatives mesurées dans la section irriguée et non irriguée), il est alors normal que le modèle ne puisse reproduire adéquatement l'humidité du sol. Ces résultats plus mitigés pourraient également être liés à la nature particulière du sol (présence d'un taux élevé de cailloux) et à la plus grande difficulté pour le modèle de reproduire la croissance de deux plantes en compétition pour les mêmes ressources (eau et lumière en particulier).

Nous avons néanmoins considéré que ces résultats étaient satisfaisants pour permettre la réalisation des simulations à plus large échelle spatiale et temporelle présentées dans la section suivante.

Tableau 1 : Description des sols utilisés pour les simulations aux fins de comparaison avec les données observées par l'IRDA.

# champ	Texture	Nom du sol	Épaisseur de l'horizon 1	% d'argile	% de limon	% de sable	pH (eau)	MO (%)	Humidité au point de flétrissement permanent (% massique)	Humidité à la capacité au champ (% massique)	Humidité à la saturation (% massique)	Densité apparente (g/cm ³)
Maïs 2021	Loam limoneux	MLL21	0-30	23.3	56.6	20.1	7.0	2.9	15.4	33.3	49.3	1.34
Maïs 2022	Loam sableux	MLS22	0-30	17.5	8.3	74.2	?	5.2	14.9	23.9	48.3	1.37
Soya 2021	Loam	SL21	0-30	12.5	38.8	48.8	6.4	3.3	9.9	23.6	47.9	1.38
Soya 2022	Sable loameux	SSL22	0-30	11	0.9	88.1	?	3.0	9.2	32	50.3	1.32
Luzerne Fléole 2022	Loam sableux graveleux	LFLS22	0-30	16.7	22.7	60.7	?	4.1	13.3	24.4	47.9	1.38

(suite)

Nom du sol	Épaisseur de l'horizon 2	% d'argile	% de limon	% de sable	Humidité au point de flétrissement permanent (% massique)	Humidité à la capacité au champ (% massique)	Humidité à la saturation (% massique)	Densité apparente (g/cm ³)
MLL21	31-60	23.3	56.6	20.1	14.6	31.7	44.1	1.48
MLS22	31-60	17.5	8.3	74.2	11.4	18.4	40.1	1.59
SL21	31-60	12.5	38.8	48.8	8.1	20.5	41.1	1.56
SSL22	31-60	11	0.9	88.1	8	29.5	42.3	1.53
LFLS22	31-60	16.7	22.7	60.7	10.9	20.4	40.7	1.57

Tableau 2 : Comparaison des biomasses aériennes à la récolte simulées et observées en conditions irriguées et non irriguées.

Biomasse (t MS /ha)		Non irrigué			Irrigué		
	Année	Observée	Simulée	Différence entre simulée et observée (% du rendement observé)	Observée	Simulée	Différence entre simulée et observée (% du rendement observé)
Mais	2021	21.3	20.9	-2%	22.4	20.9	-7%
	2022	17.9	17.3	-3%	18.3	17.3	-5%
Soya	2021	5.7	7.5	32%	5.2	7.5	44%
	2022	2	6.1	205%	2.3	6.3	174%
Luzerne-Fléole	2022	7.9	8.8	11%	10.7	10.8	1%

Maïs 2021 à Deschambault, sol loam-limoneux

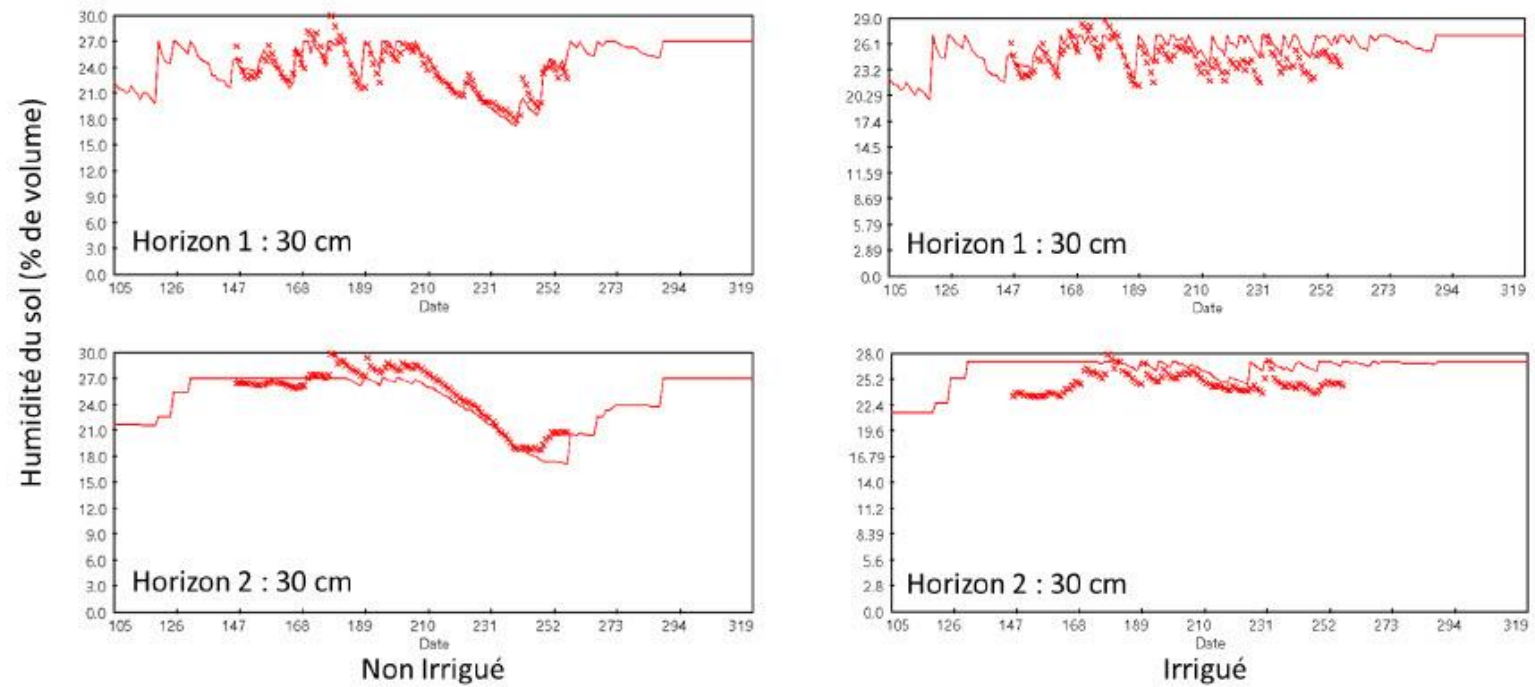


Figure 1 : comparaison de l'humidité du sol (exprimée en % du volume) observée au champ (mesure IRDA) et simulée pour le maïs en 2021. La ligne rouge pleine correspond aux valeurs simulées, la ligne pointillée (x) correspond aux valeurs mesurées par l'IRDA.

Maïs 2022 à Deschambault, sol loam-sableux

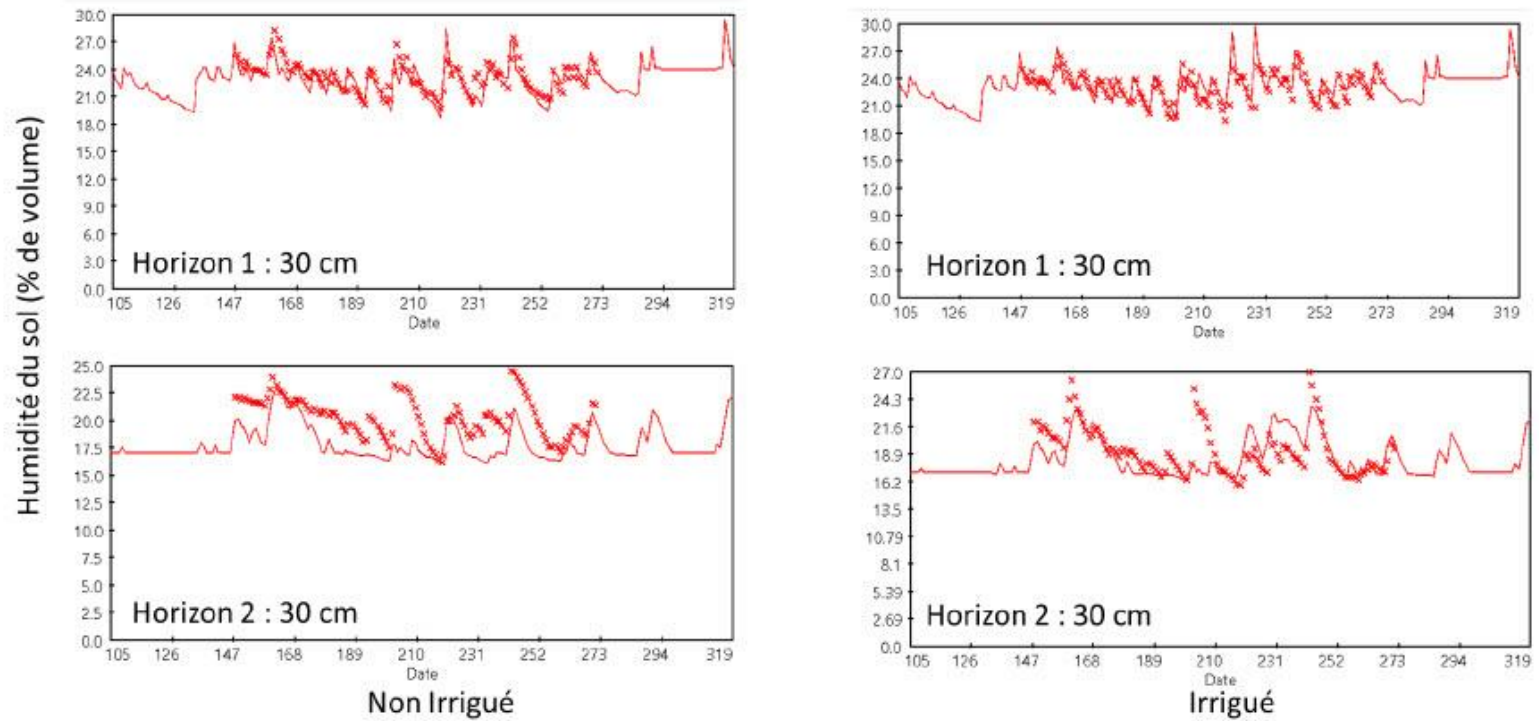


Figure 2 : comparaison de l'humidité du sol (exprimée en % du volume) observée au champ (mesure IRDA) et simulée pour le maïs en 2022. La ligne rouge pleine correspond aux valeurs simulées, la ligne pointillée (x) correspond aux valeurs mesurées par l'IRDA.

Soya 2021 à Deschambault, sol sable-loameux

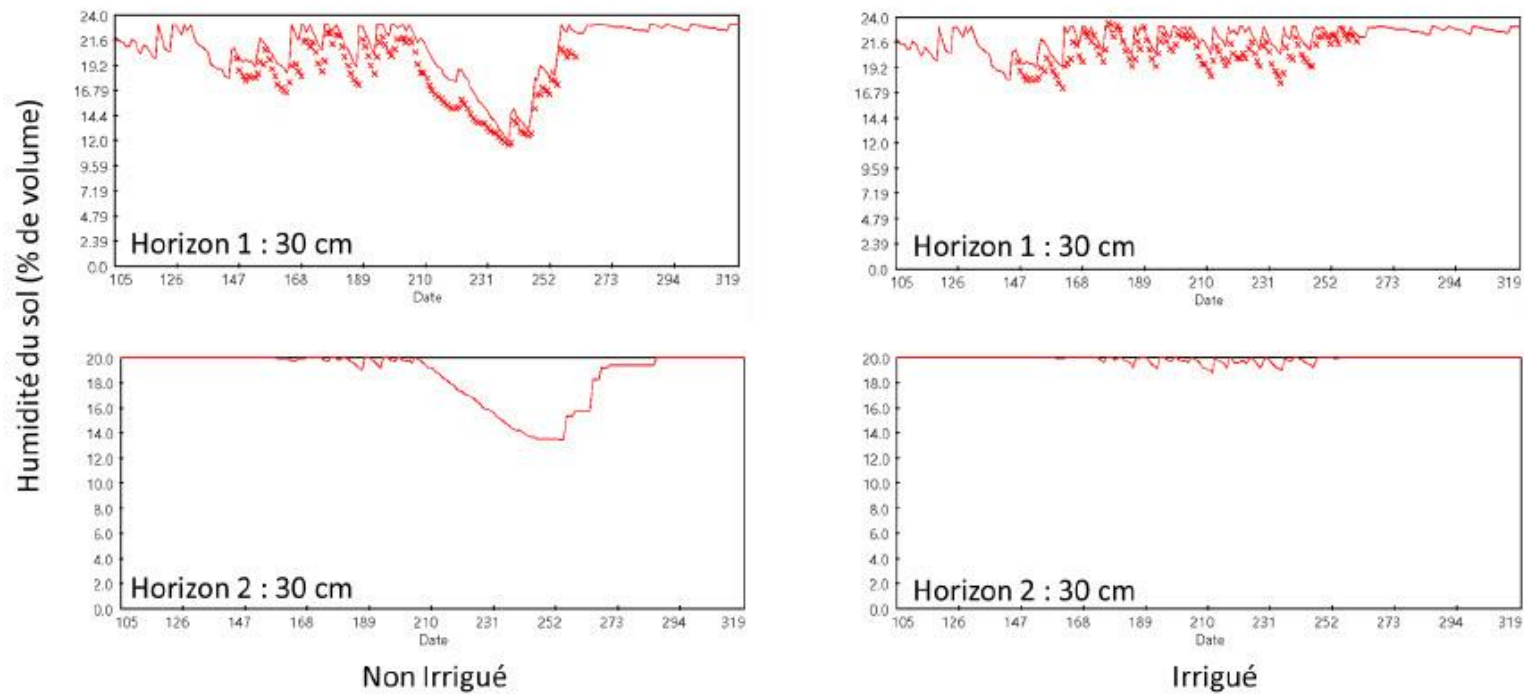


Figure 3 : comparaison de l'humidité du sol (exprimée en % du volume) observée au champ (mesure IRDA) et simulée pour le soya en 2021. La ligne rouge pleine correspond aux valeurs simulées, la ligne pointillée (x) correspond aux valeurs mesurées par l'IRDA. Aucune donnée mesurée n'était disponible en 2021 pour l'horizon 2.

Soya 2022 à Deschambault, sol sable-loameux

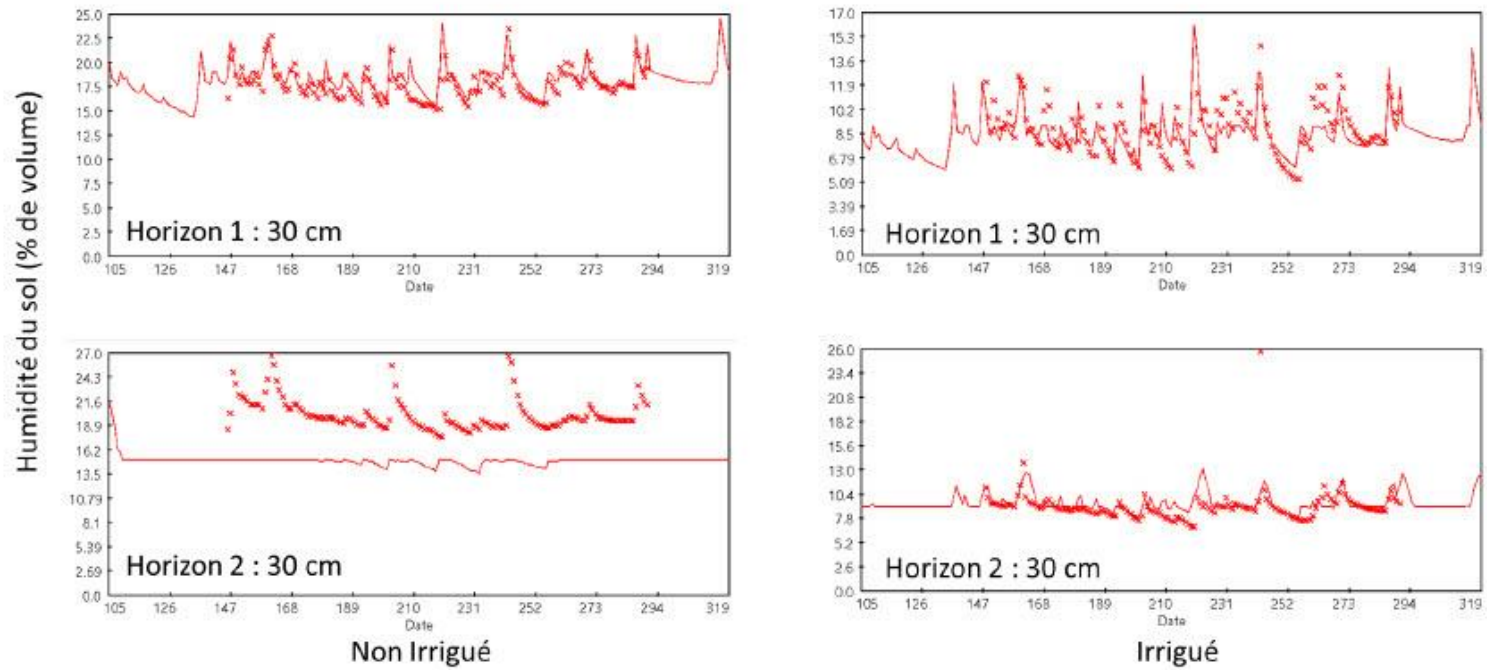


Figure 4 : comparaison de l'humidité du sol (exprimée en % du volume) observée au champ (mesure IRDA) et simulée pour le soya en 2022. La ligne rouge pleine correspond aux valeurs simulées, la ligne pointillée (x) correspond aux valeurs mesurées par l'IRDA.

Luzerne-Fléole en 2022 à Kamouraska, sol sable-loameux

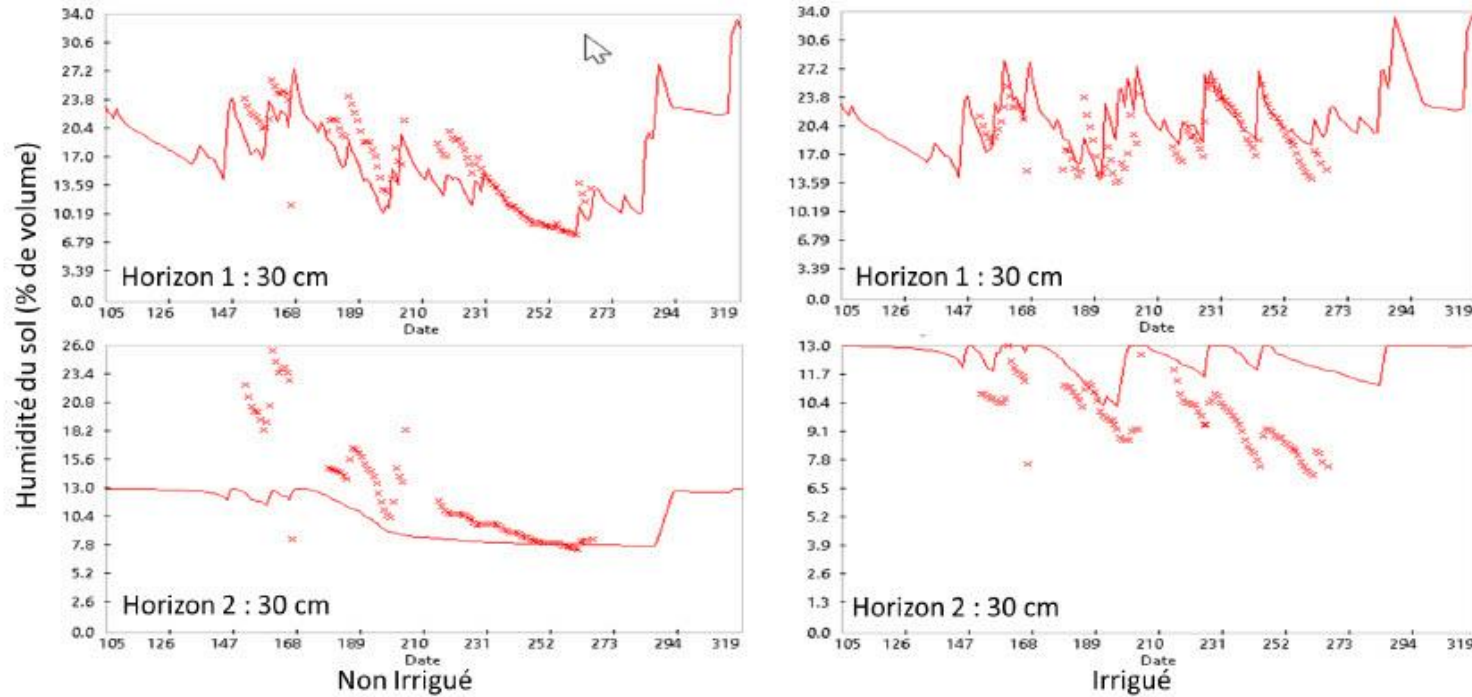


Figure 5 : comparaison de l'humidité du sol (exprimée en % du volume) observée au champ (mesure IRDA) et simulée pour le mélange luzerne-fléole en 2022. La ligne rouge pleine correspond aux valeurs simulées, la ligne pointillée (x) correspond aux valeurs mesurées par l'IRDA.

3. Simulations des besoins en eau actuels et futurs

a. Définition du protocole expérimental

Stations et scénarios climatiques

Afin de simuler et comparer les rendements et besoins en eau en climat de référence et futurs au Québec, nous avons utilisé les données climatiques historiques de 9 stations météorologiques d'Environnement Canada, ainsi que des projections climatiques établis par Ouranos, dans le cadre des projets RADEAU 1 et RADEAU 2 (Charron et al., 2019, 2020). Ces scénarios climatiques proviennent de 4 modèles climatiques et 2 RCP, choisis pour être statistiquement représentatifs de l'ensemble de simulation CMIP5 utilisé par Ouranos.

Les 9 stations météorologiques sont repérées par un code dans les graphiques et tableau de cette section, dont la signification est présentée dans le tableau 3.

Tableau 3 : signification des codes des stations météorologiques.

Code	Station météorologique et région administrative
B	Beauceville, Chaudière-Appalaches
LA	L'Assomption, Lanaudière
SH	Sherbrooke, Estrie
Ni	Nicolet, Centre-du-Québec
SU	Saint-Hubert, Montérégie
MI	Mirabel, Laurentides
MJ	Mont-Joli, Bas-Saint-Laurent
OT	Ottawa, Ontario (pour représenter le climat de l'Outaouais)
QC	Québec, Capitale-Nationale

Les cinq premières stations sont celles qui ont été utilisées dans le projet RADEAU1, les 4 dernières dans RADEAU 2. Puisque le projet a été réalisé en deux phases, la méthode pour post-traitée les scénarios climatiques utilisée par Ouranos a été différente (en fonction de l'évolution de leurs outils). La méthode utilisée pour post-traiter les scénarios dans RADEAU 2 a eu pour conséquence de ne pas permettre de produire de simulation des variables humidité relative et vent.

Or, ces deux variables sont nécessaires dans le modèle STICS pour utiliser le modèle d'évapotranspiration ci-après appelé modèle résistif qui permet de simuler les cultures associées et de prendre en compte l'effet de la hausse de la concentration en CO₂ sur la conductance stomatique. Quand ces variables climatiques ne sont pas disponibles, il est possible d'utiliser un autre modèle de simulation de l'évapotranspiration, le modèle de Priestley-Taylor, qui cependant ne permet pas de simuler les cultures associées et qui pourrait tendre à surestimer les besoins en eau puisqu'il n'intègre pas l'effet de la concentration en CO₂ atmosphérique sur la conductance stomatique qui diminue lorsque la concentration en CO₂ atmosphérique augmente. Ceci se traduit par une meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau par les plantes.

Du fait de cette contrainte, nous avons donc réalisé 2 ensembles de simulations que nous présentons ci-dessous à des fins de comparaisons :

- Un premier ensemble avec le modèle résistif, pour les 5 stations du projet RADEAU 1, et dans lequel nous avons pu simuler le maïs, le soya et le mélange luzerne-fléole.
- Un second ensemble avec le modèle de Priestley-Taylor, avec lequel nous avons pu simuler les 9 stations et 4 cultures : le maïs, le soya, la luzerne et la fléole en cultures pures.

La comparaison des deux ensembles permet également d'analyser une des sources d'incertitudes liées aux projections climatiques des besoins en eau, soit le choix du modèle d'évapotranspiration.

Régie des cultures

Plusieurs aspects de la régie des cultures sont des variables d'entrée du modèle. En particulier, la date de semis a un impact important sur la croissance des plantes. Étant donné le grand nombre de situations climatiques, nous avons utilisé un module de STICS qui permet d'estimer la date de semis en fonction de critères liés au climat. Ainsi, le semis a lieu entre les jours 110 et 150 lorsque les deux conditions suivantes de température et de précipitations sont réunies :

- au moins 20 jours consécutif sans température minimale inférieure à 0°C et avec une température moyenne supérieur à 6°C pour le maïs et 5°C pour le soya.
- au moins 10 mm de précipitation sur une période de 5 jours

Les dates estimées avec cette fonction sont très proches de celles estimées par la méthode publiée par Bootsma et De Jong (1988).

La date de récolte a été estimée par le modèle sur la base de l'atteinte de la maturité physiologique des plantes pour le maïs et le soya. Pour les plantes fourragères, nous avons considéré la réalisation de la première coupe après 450 degrés-jours, puis des coupes suivantes tous les 520 degrés jours. Le modèle adapte ainsi le nombre de coupe en fonction de la longueur de la saison de croissance.

Finalement, pour l'irrigation, nous avons défini trois régies différentes, dont une régie non irriguée. Pour les deux régies irriguées, nous avons fixés les volumes par apport à 20 mm, ce qui représente la pratique courante chez les producteurs. Les deux régies irriguées se distinguent par le niveau de stress hydrique de la plante toléré avant le déclenchement par le modèle d'une irrigation :

- Régie Irr1 : cette régie se compare à une régie qualifiée par l'IRDA de type « Assurance récolte ». Dans cette régie, quand l'indice de stress hydrique journalier du modèle atteint une valeur inférieure à 0,8 (une valeur de 1 indiquant l'absence de stress), une irrigation est déclenchée.
- Régie Irr2 : cette régie peut être qualifiée de « confort hydrique », c'est-à-dire que dès que la plante subit un léger déficit hydrique, un apport d'eau est réalisé. La valeur de l'indice de stress journalier retenue pour déclencher une irrigation est 0,99 dans cette régie.

Type de sols

Cinq sols potentiellement irrigables ont été définis par l'IRDA. Tout comme pour les sols qui ont été documentés dans la première section du rapport, sur la base des informations de texture et de matière organique, les différents horizons du sol ont été décrit en termes de caractéristiques hydriques, à l'aide du logiciel SPAW. Ces caractéristiques sont décrites dans le tableau 4.

Tableau 4 : caractéristiques des sols utilisés pour les simulations.

# de sol	Séries groupées EESSAQ	Profil	Horizon	Profondeur (cm)	Fragments grossier (% en volume)	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	Densité apparente (g/cm ³)	Horizon	Profondeur (cm)	pH eau	M. org. (%)	Humidité au point de flétrissement permanent (% volumal)	Humidité à la capacité au champ (% volume)
1	Saint-André/Saint- Nicolas/Orléans	Couche de Surface	Ap	0-22	20	61.9	26.4	11.7	1.43	Ap1	0--10	5.7	2.71	7.8	15.9
			Ap2	10--22						Ap2	10--22	5.8	2.5		
		Sous-sol (partie supérieure)	Bf, Bfj	22--45	45	79.5	8.3	12.2	1.47	Bfj	22--45	5.7	1.76	5.7	9.9
		Substratum	C	45+	55	90	4.9	5.1	1.54	C	45+			2.7	5.6
2	Beaurivage/Morin	Couche de Surface	Ap	0--29	20	76	12	12	1.28	Ap1	0--10	5.9	4.63	8.7	15.3
			Ap2	10--29						Ap2	10--29	6	4.2		
		Sous-sol (partie supérieure)	Bf	29--62	20	81	8	11	1.45	Bf	29--62	6.2	2.46	5.9	10.2
		Substratum	C	62+	10	96.5	0	2.5	1.47	C	62+			2.2	6.9
3	Charlevoix/Leeds/Ch apais	Couche de Surface	Ap	0--25	25	36.8	39.8	23.4	1.24	Ap1	0--10	5.9	7.79	14.8	28.4
			Ap2	10--25						Ap2	10--25	5.7	5.64		
		Sous-sol (partie supérieure)	Bf	25--38	25	49.9	33.8	16.3	1.46	Bf	25--38	5.8	4.05	8.6	17.8
		Substratum	Cx, C	38+	35	63	32.5	4.5	1.68	Cx, C	38+			4.0	10.9
4	Shefford	Couche de Surface	Ap	0--22	15	48.8	38.2	13	1.02	Ap1	0--10	6.1	4.99	11.6	25.9
			Ap2	10--22						Ap2	10--22	5.8	4.05		
		Sous-sol (partie supérieure)	Bf	22--45	40	43.4	48.2	8.4	1.32	Bf	22--45	6.2	1.88	5.0	16.2
		Substratum	C	45+	50	47.4	41.2	11.4	1.46	C	45+			5.7	14.9
5	Upland/Saint-Jude	Couche de Surface	Ap	0--28	0	53	35	12	1.44	Ap1	0--10	6	3.25	6.9	15.8
			Ap2	10--28						Ap2	10--28	6.2	2.83		
		Sous-sol (partie supérieure)	Bf	28--49	0	89	9	2	1.41	Bf	28--49	6.5	1.85	1.8	5.4
		Substratum	Cg		0	89	10	1	1.15	Cg				2.3	6.6

b. Rendement des cultures

Maïs

Les rendements simulés par le modèle sont présentés dans les tableaux 5 et 6 et dans les figures 6 et 7. Les détails des rendements par scénarios climatiques et par sol sont présentés dans les tableaux Excel déposés simultanément avec ce rapport. Dans ces tableaux et graphiques, les rendements sont exprimés en tonne de matière sèche par ha.

Les deux modèles d'évapotranspiration utilisés donnent lieu à des rendements très similaires en climat de référence, puisque les différences de rendement moyen pour chaque situation (station et régie d'irrigation) sont inférieures à une tonne par ha.

En climat de référence, les stations qui sont situées dans les régions les plus au Sud donnent lieu à des rendements moyens conformes aux ordres de grandeur observés. Ainsi, par exemple, pour la station de Saint-Hubert (SU), en régie non irriguée, le modèle prédit un rendement moyen de 8,4 t/ha (résistif) et de 8,9 t/ha (en mode Priestley-Taylor). Les rendements simulés sans irrigation (NIrr) sont plus faibles pour les stations situées dans des régions où le climat est plus frais. Ainsi, par exemple, pour la station de Mont-Joli, même en prenant un hybride de maïs de cycle court, le rendement moyen pour la période 1981-2010 se situe autour de 2 t/ha, même si certaines années il atteint plus de 8t/ha (figure 2). Ceci reproduit donc le fait qu'historiquement, à Mont-Joli, la saison de croissance n'était pas suffisamment longue pour que le maïs puisse se rendre à maturité, sauf quelques années plus chaudes. De même, le rendement moyen plus faibles à Sherbrooke et à Beauceville traduit ce phénomène, mais à un niveau intermédiaire.

Le rendement du maïs en conditions irriguées est systématiquement plus élevé qu'en conditions non irriguées. Le gain de rendement semble assez similaire entre les deux régies d'irrigations testées, soit celle « d'assurance récolte » (Irr1 : +27% avec le modèle résistif, +30% en moyenne avec le modèle Priestley-Taylor) et celle de « confort hydrique » (Irr2 : +29% avec le modèle résistif, +31% en moyenne avec le modèle Priestley-Taylor). L'écart type des rendements, indiquant la variation des rendements autour de la moyenne, tel qu'également illustré dans le graphique « boîte à moustache » (figures 6 et 7), suit quant à lui une tendance inverse aux moyennes : l'usage de l'irrigation entraîne une réduction de l'ordre de 15% de la variation des rendements. Ainsi, rapporté à la moyenne, l'indice de variation des rendements (écart type divisé par la moyenne) est de 45% avec le modèle résistif en conditions non irriguées (moyenne pour les 5 stations), alors qu'il est de d'environ 32% dans les deux régies irriguées. Ainsi, selon le modèle, l'irrigation permettrait de réduire les variations de rendement en plus d'augmenter la moyenne des rendements en climat de référence.

En climat futur, les mêmes tendances se répètent en ce qui concerne la comparaison des régies irriguées et non irriguée, à savoir une augmentation des rendements avec l'irrigation de l'ordre de 20% (un peu plus faible qu'en climat de référence, même ordre de grandeur pour les deux modèles d'évapotranspiration) et une réduction de la variation des rendements avec l'irrigation (30% environ de variation en régie non irriguée et 11% en régies irriguées avec le modèle résistif, 26% en régie non irriguée et 8-9% en régies irriguées avec le modèle de Priestley-Taylor). Néanmoins, plusieurs autres tendances se dégagent : entre le climat de référence et le climat futur, en lien aussi avec la possibilité d'utiliser des hybrides de cycle plus long, les rendements augmenteraient

de façon significative : en régions irriguées et non irriguées. L'augmentation moyenne des rendements serait de l'ordre de 4 t MS / ha, mais avec de fortes disparités entre les régions : celles qui présentent déjà actuellement des rendements élevés auraient des gains de rendement plus faibles (autour de 2 t MS / ha), les hybrides de maïs simulés par le modèle atteignant souvent leur plein potentiel et ont donc des rendements qui plafonnent à un peu plus de 13 t de MS par ha. Inversement, les régions dans lesquelles historiquement le rendement du maïs était plus limité par les températures pourraient connaître une hausse importante du potentiel de rendement (jusqu'à 7 t MS / ha pour les régions pour lesquelles le potentiel de rendement était très faible). La tendance est très similaire avec les deux modèles d'évapotranspiration (résistif et Priestley-Taylor).

En climat futur, dans certaines situations et notamment dans les régions les plus chaudes, avec les deux modèles, le rendement plafonne complètement en région irriguée à 13 t MS / ha, traduisant alors que les conditions de croissance sont idéales pour la plante chaque année en termes de température et du fait de l'absence de stress hydrique grâce à l'irrigation. Dans ces conditions, il n'y a alors plus de variation de rendement (écart type nul). La même tendance est simulée avec les deux modèles d'évapotranspiration. Cela semble donc indiquer que si des hybrides de saisons de croissance encore plus longue existaient dans le modèle, le potentiel de rendement pourrait être encore supérieur.

Tableau 5 : rendement du maïs avec le modèle d'évapotranspiration résistif

REFERENCE	Moyenne du rendement (T MS / ha)			Écart type du rendement (T MS / ha)		
	Irr1	Irr2	Nlrr	Irr1	Irr2	Nlrr
B	5.2	5.3	4.1	3.1	3.1	2.9
LA	10.9	11.0	8.3	1.5	1.5	2.8
Ni	9.5	9.6	6.7	2.5	2.5	2.9
SH*	5.0	5.1	4.3	2.1	2.1	2.1
SU	10.4	10.4	8.4	2.0	1.9	2.6

FUTUR	Moyenne du rendement (T MS / ha)			Écart type du rendement (T MS / ha)		
	Irr1	Irr2	Nlrr	Irr1	Irr2	Nlrr
B	12.1	12.2	10.8	2.0	1.9	2.8
LA	13.0	13.0	10.9	0.1	0.1	2.5
Ni	13.0	13.0	10.6	0.3	0.3	2.6
SH	9.8	9.9	7.2	3.7	3.6	3.8
SU	13.1	13.1	11.3	0.0	0.0	2.3

Tableau 6 : rendement du maïs avec le modèle d'évapotranspiration de Priestley-Taylor

REFERENCE	Moyenne du rendement (T MS / ha)			Écart type du rendement (T MS / ha)		
	Irr1	Irr2	Nlrr	Irr1	Irr2	Nlrr
B*	5.1	5.2	4.2	2.1	2.2	2.0
LA	10.9	11.0	8.4	1.4	1.3	2.6
MI	9.4	9.6	6.7	2.5	2.5	2.6
MJ*	2.2	2.2	1.5	1.9	1.9	1.5
Ni	10.4	10.5	8.4	1.9	1.8	2.4
OT	11.3	11.3	8.3	0.8	0.8	2.4
QC	7.4	7.5	6.1	2.9	2.9	2.7
SH	5.3	5.4	4.2	3.1	3.1	2.8
SU	11.2	11.2	8.9	1.0	0.9	2.4

FUTUR	Moyenne du rendement (T MS / ha)			Écart type du rendement (T MS / ha)		
	Irr1	Irr2	Nlrr	Irr1	Irr2	Nlrr
B	12.1	12.2	10.8	2.0	1.9	2.8
LA	13.0	13.0	10.9	0.1	0.1	2.5
MI	13.0	13.0	10.6	0.3	0.3	2.6
MJ	9.8	9.9	7.2	3.7	3.6	3.8
Ni	13.1	13.1	11.3	0.0	0.0	2.3
OT	13.0	13.1	10.4	0.0	0.0	2.6
QC	12.8	12.8	11.7	0.9	0.8	2.1
SH	12.2	12.3	11.1	1.9	1.8	2.7
SU	13.0	13.0	11.1	0.0	0.0	2.4

Maïs, modèle résistif

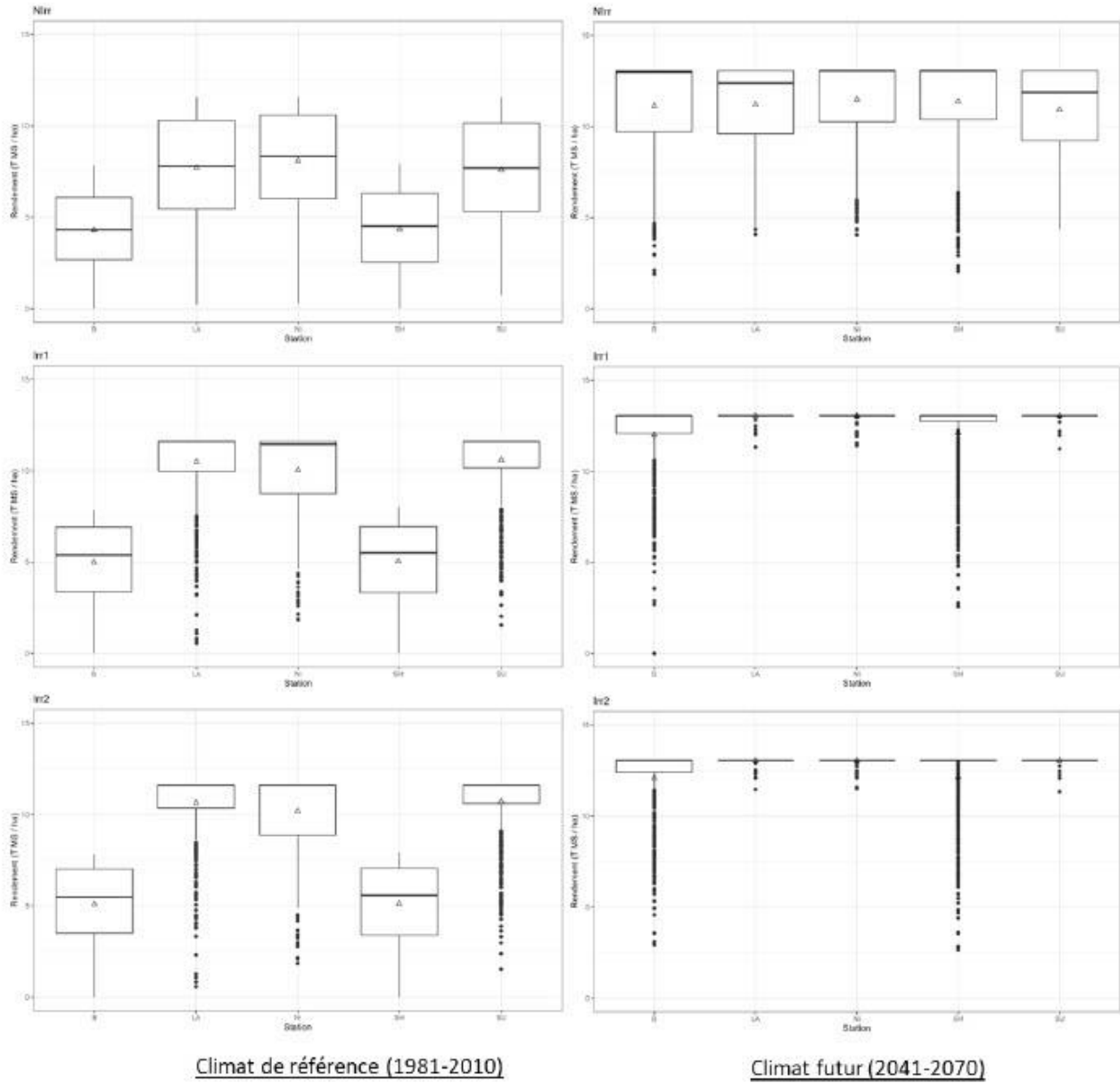
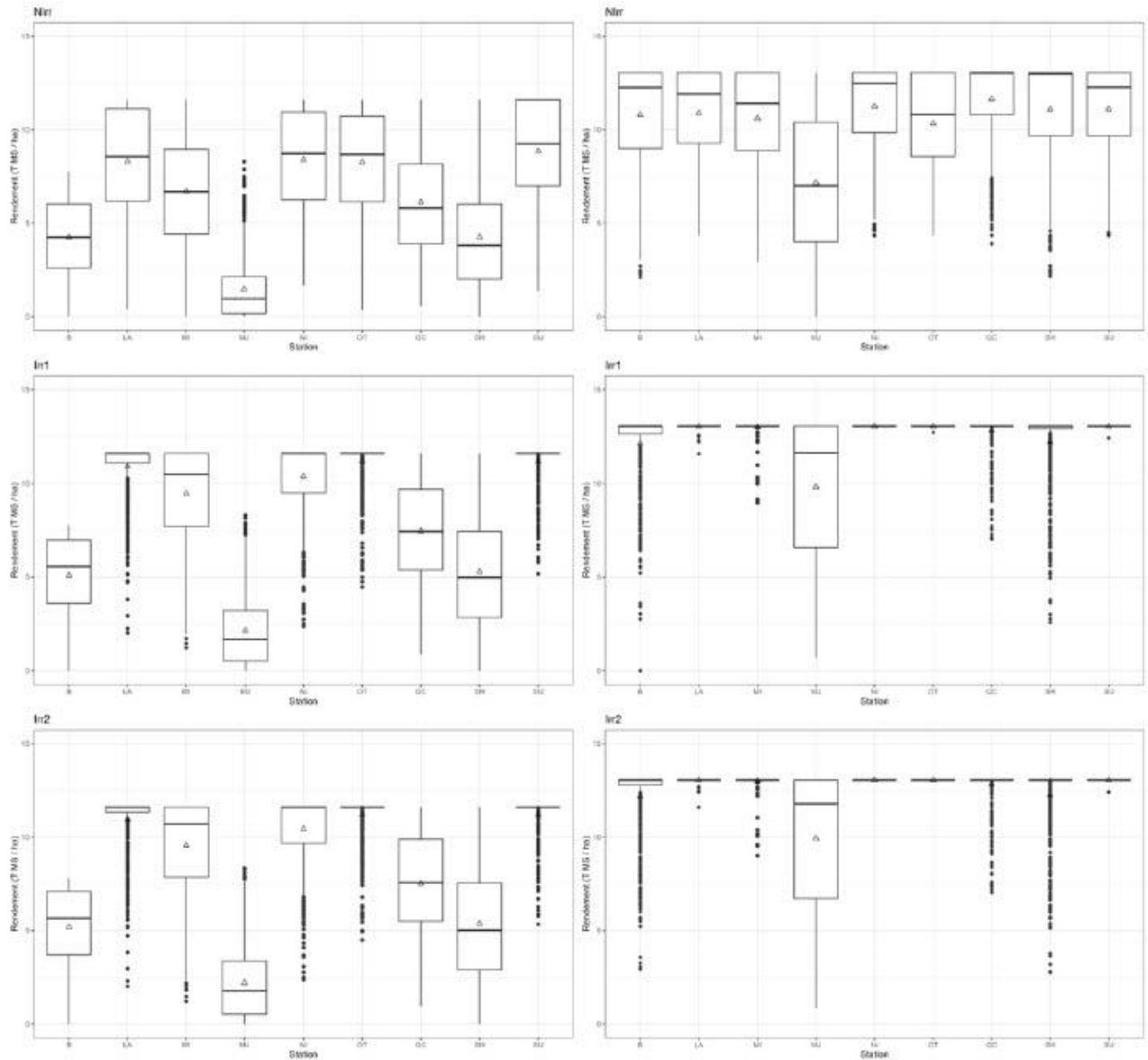


Figure 6 : Comparaison des rendements du maïs simulés pour le climat de référence et le climat futur, en utilisant le modèle d'évapotranspiration résistif.

Maïs, modèle de Priestley-Taylor



Climat de référence (1981-2010)

Climat futur (2041-2070)

Figure 7 : Comparaison des rendements du maïs simulés pour le climat de référence et le climat futur, en utilisant le modèle d'évapotranspiration de Priestley-Taylor.

Soya

Le soya a été simulé tout comme le maïs avec les deux modèles d'évapotranspiration. Les rendements obtenus dans le climat de référence varient beaucoup moins que ceux du maïs entre les différentes stations (voir tableau 7 et 8 et figures 8 et 9). Ainsi, en climat de référence, le rendement moyen obtenu en régie non irriguée est d'environ 2,5 t MS / ha (variant entre 2,2 et 2,7 t MS / ha). L'écart type du rendement en condition non irriguée, ramené à la moyenne, indique une variation moyenne des rendements de 25% en conditions non irriguées, similaire avec les deux modèles d'évapotranspiration, et légèrement plus faible que pour le maïs. En condition irriguées, les deux régies entraînent des rendements très similaires, supérieurs d'environ 25% aux rendements non irrigués avec le modèle de Priestley-Taylor et 20% avec le modèle résistif. L'irrigation réduit également considérablement la variabilité des rendements, puisque les écarts types en régies irriguées représentent seulement environ 10% de la moyenne des rendements.

En climat futur, les rendements en régie non irriguées seraient augmentés d'environ 0,5 t MS / ha, avec une variation du rendement qui resterait dans un ordre de grandeur très similaire à celle simulée en climat de référence (26% contre 25% avec le modèle résistif, 25% contre 31% avec le modèle Priestley-Taylor). Avec le modèle Priestley-Taylor, les rendements simulés seraient plus variables en climat futur (probablement du fait que l'effet du CO₂ sur la conductance stomatique n'est pas pris en compte), en particulier pour la station de Mont-Joli, où la variation serait plus importante. Dans ce cas particulier, cela pourrait aussi être lié à un régime de précipitation plus variable d'une année à l'autre que dans les autres stations. Les régies simulées avec irrigation entraineraient une augmentation du rendement de l'ordre de 0,8 t MS / ha en moyenne (environ 30% de plus de rendement qu'en régie non irriguée), tout en réduisant la variabilité des rendements. L'indice de variation (écart type rapporté à la moyenne) serait ainsi, tout comme en climat de référence, d'environ 10% pour les deux modèles d'évapotranspiration.

Tableau 7 : rendement du soya avec le modèle d'évapotranspiration résistif

REFERENCE	Moyenne du rendement (T MS / ha)			Écart type du rendement (T MS / ha)		
	Irr1	Irr2	Nlrr	Irr1	Irr2	Nlrr
B	3.0	3.1	2.8	0.3	0.3	0.5
LA	3.4	3.5	2.6	0.3	0.3	0.9
Ni	3.4	3.5	2.9	0.4	0.4	0.7
SH	3.0	3.0	2.8	0.3	0.3	0.4
SU	3.2	3.3	2.4	0.5	0.5	0.8

FUTUR	Moyenne du rendement (T MS / ha)			Écart type du rendement (T MS / ha)		
	Irr1	Irr2	Nlrr	Irr1	Irr2	Nlrr
B	4.0	4.1	3.6	0.3	0.3	0.7
LA	4.1	4.2	3.2	0.5	0.5	1.0
Ni	4.1	4.3	3.3	0.3	0.3	1.0
SH	3.9	4.0	3.6	0.4	0.4	0.6
SU	3.8	3.9	2.9	0.7	0.7	0.9

Tableau 8 : rendement du soya avec le modèle d'évapotranspiration de Priestley-Taylor

REFERENCE	Moyenne du rendement (T MS / ha)			Écart type du rendement (T MS / ha)		
	lrr1	lrr2	Nlrr	lrr1	lrr2	Nlrr
B	3.0	3.1	2.7	0.3	0.3	0.5
LA	3.4	3.5	2.6	0.2	0.2	0.8
MI	3.1	3.2	2.4	0.2	0.3	0.7
MJ	2.8	2.8	2.2	0.4	0.4	0.7
Ni	3.4	3.5	2.7	0.2	0.2	0.7
OT	3.2	3.3	2.3	0.3	0.3	0.7
QC	3.1	3.2	2.7	0.2	0.3	0.6
SH	3.0	3.0	2.7	0.3	0.3	0.5
SU	3.3	3.3	2.5	0.2	0.2	0.7

FUTUR	Moyenne du rendement (T MS / ha)			Écart type du rendement (T MS / ha)		
	lrr1	lrr2	Nlrr	lrr1	lrr2	Nlrr
B	3.9	4.0	3.3	0.3	0.3	0.8
LA	4.0	4.2	3.0	0.3	0.3	0.9
MI	3.8	3.9	2.8	0.3	0.4	0.9
MJ	3.8	3.9	2.4	0.3	0.3	1.1
Ni	4.0	4.2	3.0	0.3	0.3	1.0
OT	3.6	3.7	2.7	0.5	0.5	0.8
QC	3.9	4.0	3.2	0.3	0.3	0.9
SH	3.8	3.9	3.3	0.3	0.3	0.8
SU	3.8	3.9	2.9	0.4	0.4	0.9

Soya, modèle résistif

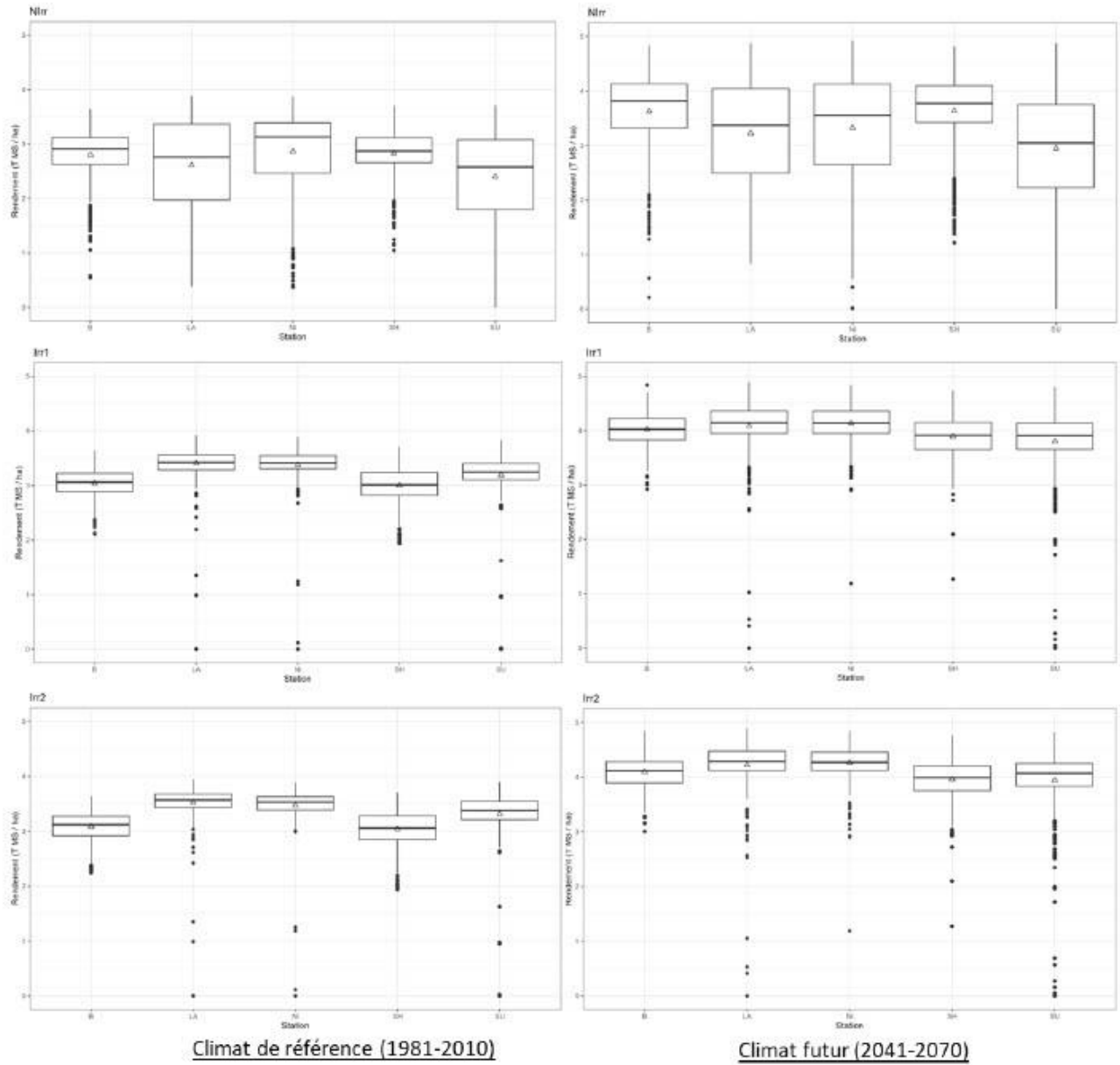


Figure 8 : Comparaison des rendements du soya simulés pour le climat de référence et les climats futurs, en utilisant le modèle d'évapotranspiration résistif.

Soya, modèle de Priestley-Taylor

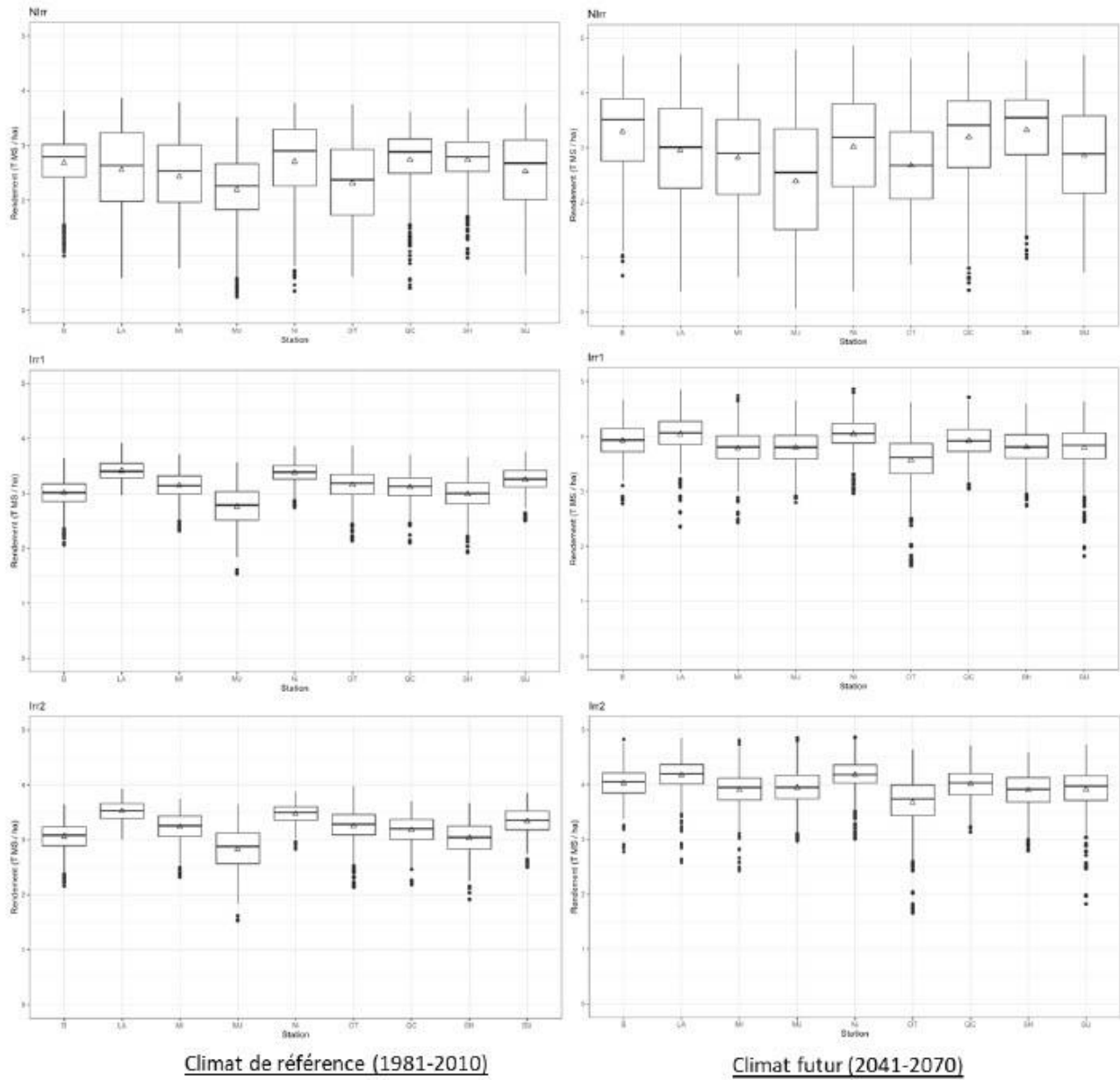


Figure 9 : Comparaison des rendements du soya simulés pour le climat de référence et le climat futur, en utilisant le modèle d'évapotranspiration de Priestley-Taylor.

Luzerne et fléole

La luzerne et la fléole ont été simulées en cultures associées (les deux espèces poussent simultanément dans le même champ) avec le modèle résistif, et en culture pure avec le modèle de Priestley-Taylor. Le tableau 9 présente les rendements annuels (de l'ensemble des coupes) de la luzerne et de la fléole et le cumul de ces rendements, en climat de référence et futur. En culture associée, le rendement cumulé des deux espèces est en moyenne, en conditions non irriguées, d'environ 9 t MS / ha, avec des différences entre les régions d'environ 1,5 t MS / ha. À la différence du maïs et du soya, c'est dans les régions les plus fraîches (Stations de Sherbrooke et de Beauceville) que les rendements sont les plus élevés, du aux meilleurs rendements de la fléole dans des conditions plus fraîches. Ces résultats sont cohérents avec les résultats obtenus par exemple dans l'étude de Thivierge et al., 2017. Dans le mélange luzerne-fléole, environ 2/3 du rendement provient de la luzerne en climat actuel. La luzerne présente également un indice de variation du rendement plus faible que la fléole en condition non irriguée : 32% contre 43%.

En climat de référence, les deux régies d'irrigation se traduisent par un gain de rendement, légèrement différent entre les régies « assurance récolte » (Irr1) et « confort hydrique » (Irr2) : + 1,9 t MS / ha (+ 22% du rendement non irrigué) et + 2,3 t MS / ha (+ 25% du rendement non irrigué) respectivement. C'est surtout le rendement de la luzerne qui augmente avec l'irrigation, celui de la fléole augmentant également mais dans une moindre proportion. Tout comme dans le cas du maïs et du soya, l'irrigation permet de réduire la variabilité des rendements d'environ de moitié pour la luzerne : l'indice de variation en climat de référence est d'environ 15% pour les deux régies irriguées alors qu'il est de 32% pour la régie non irriguée. Par contre, cette réduction ne semble pas se vérifier dans le cas de la fléole, puisque l'indice reste de 41% pour les régies irriguées (contre 43% pour la régie non irriguée). Cette faible différence pourrait indiquer que la variabilité des rendements simulée pour la fléole provient davantage de la température plutôt que du stress hydrique.

En climat futur, le rendement du mélange augmenterait de façon conséquente en régie non irriguée : + 1,4 t MS / ha en moyenne, soit 16% d'augmentation. Cette hausse proviendrait de la luzerne dont le rendement augmenterait de 1,6 t MS /ha, compensant ainsi la baisse de rendement simulée de la fléole. La tendance est la même pour les régies irriguées, avec des hausses plus conséquentes de rendement, de l'ordre de 2 t MS / ha pour le mélange, et similaires pour les deux régies d'irrigation (+18% d'augmentation). Là encore, c'est la luzerne dont le rendement progresserait de façon conséquente qui explique cette hausse attendue du rendement du mélange, puisque le rendement de la fléole diminuerait. Ainsi, en régie non irriguée, le rendement de la fléole diminuerait de 0,2 t MS / ha alors qu'en régie irriguée, il diminuerait d'environ 0,5 t MS / ha. La variabilité des rendements resterait identique à celle simulée en climat actuel, à la fois pour la luzerne et pour la fléole.

Tableau 9 : rendement annuel de la luzerne et de la fléole avec le modèle d'évapotranspiration résistif

LUZERNE REFERENCE	Moyenne du rendement (T MS / ha)			Écart type du rendement (T MS / ha)		
	lrr1	lrr2	Nlrr	lrr1	lrr2	Nlrr
B	6.7	6.9	5.9	1.1	1.1	1.5
LA	7.8	8.2	5.7	1.0	1.2	2.2
Ni	7.5	7.9	5.9	0.9	1.1	1.9
SH	6.7	6.9	5.9	1.1	1.1	1.4
SU	7.7	8.2	5.5	1.0	1.2	2.1

LUZERNE FUTUR	Moyenne du rendement (T MS / ha)			Écart type du rendement (T MS / ha)		
	lrr1	lrr2	Nlrr	lrr1	lrr2	Nlrr
B	9.3	9.6	8.0	1.6	1.6	2.1
LA	10.1	10.7	7.0	1.7	1.6	2.5
Ni	10.0	10.6	7.3	1.7	1.6	2.5
SH	9.2	9.5	8.0	1.6	1.6	2.0
SU	10.2	10.8	6.9	1.6	1.5	2.4

FLÉOLE REFERENCE	Moyenne du rendement (T MS / ha)			Écart type du rendement (T MS / ha)		
	lrr1	lrr2	Nlrr	lrr1	lrr2	Nlrr
B	3.8	3.8	3.6	1.6	1.6	1.5
LA	3.5	3.4	2.9	1.4	1.4	1.2
Ni	3.5	3.6	2.9	1.3	1.4	1.2
SH	3.9	3.9	3.6	1.7	1.6	1.6
SU	3.2	3.1	2.7	1.3	1.3	1.2

FLÉOLE FUTUR	Moyenne du rendement (T MS / ha)			Écart type du rendement (T MS / ha)		
	lrr1	lrr2	Nlrr	lrr1	lrr2	Nlrr
B	3.5	3.5	3.3	1.4	1.4	1.3
LA	2.8	2.9	2.6	1.3	1.3	1.2
Ni	2.8	2.8	2.7	1.3	1.2	1.3
SH	3.6	3.6	3.4	1.5	1.4	1.4
SU	2.7	2.8	2.5	1.2	1.1	1.0

DEUX CULTURES REFERENCE	Moyenne du rendement (T MS / ha)			FUTUR	Moyenne du rendement (T MS / ha)		
	lrr1	lrr2	Nlrr		lrr1	lrr2	Nlrr
B	10.4	10.7	9.5	B	12.7	13.1	11.3
LA	11.3	11.6	8.6	LA	12.9	13.6	9.6
Ni	11.1	11.5	8.8	Ni	12.8	13.4	10.0
SH	10.5	10.8	9.5	SH	12.8	13.1	11.4
SU	10.9	11.3	8.2	SU	12.9	13.6	9.4

Mélange Luzerne-Fléole, modèle résistif

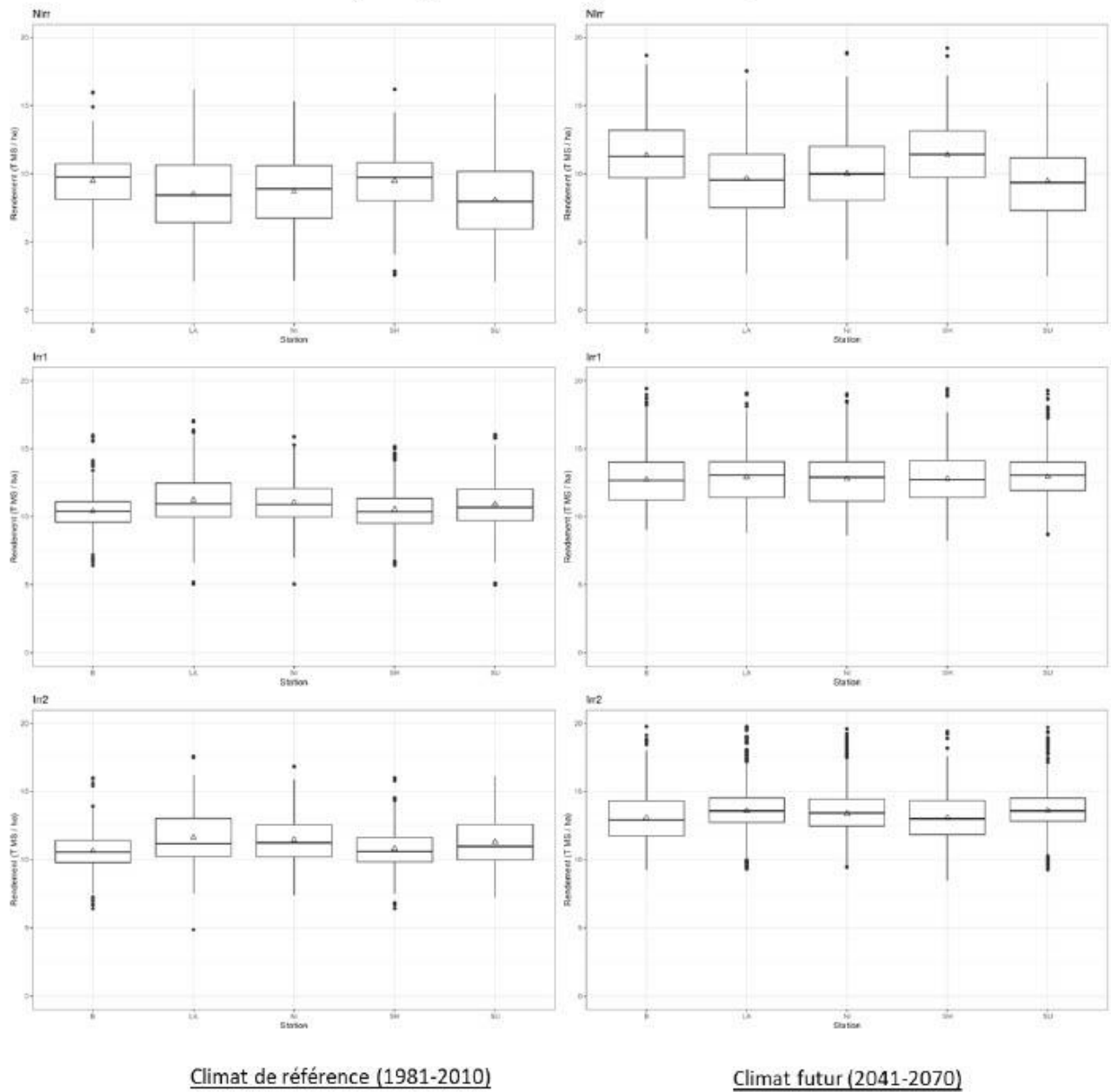


Figure 10 : Comparaison des rendements annuels du mélange Luzerne-fléole simulés pour le climat de référence et le climat futur, en utilisant le modèle d'évapotranspiration résistif.

En culture pure et avec le modèle de Priestley-Taylor, les rendements de la luzerne sont présentés dans le tableau 10 et ceux de la fléole dans le tableau 11, ainsi que dans les figures 11 et 12 respectivement.

En climat de référence et en conditions non irriguées, les rendements de la luzerne et de la fléole cultivées en cultures pures sont relativement similaires, autour de 6,5 t MS / ha en moyenne. Entre les stations, les rendements varient légèrement, le rendement de la luzerne tendant à être plus faible pour les stations dont le climat étaient historiquement plus frais (Mont-Joli par exemple), alors que celui de la fléole y est à l'inverse plus élevé. Ce résultat est logique compte tenu des températures optimums de croissance de ces deux espèces (autour de 15°C – 20°C pour la fléole et 20°C – 25°C pour la luzerne). Tout comme dans le cas du modèle résistif, les rendements simulés avec irrigation dans la luzerne pure sont significativement plus élevés que sans irrigation, de l'ordre de 2 t MS / ha (+ 30% de rendement par rapport au rendement non irrigué). Pour la fléole, le gain de rendement en climat de référence est plus limité, de l'ordre de 0,8 t MS / ha (+ 12% par rapport au rendement non irrigué). En culture pure, l'indice de variation du rendement de la luzerne est également plus faible en régions irriguées, de l'ordre de 12% (vs 31% en région non irriguée) et similaire pour la fléole.

En climat futur, la même tendance qu'avec le modèle résistif s'observe : en conditions non irriguées, le rendement de la luzerne augmente d'environ 1,4 t MS / ha en moyenne, alors que le rendement de la fléole reste stable. Le gain de rendement associé à l'irrigation est légèrement plus élevé qu'en climat de référence, puisqu'il s'établit à + 2,4 t MS / ha pour la région « assurance récolte » (Irr1 : + 31% par rapport au rendement non irrigué) et à + 2,8 t MS / ha pour la région « confort hydrique » (Irr2 : + 35% par rapport au rendement non irrigué) pour la luzerne. Le rendement de la fléole tend lui à diminuer en climat futur, y compris en région irriguées. La variation des rendements de la luzerne en climat futur suivrait la tendance observée avec le modèle résistif : elle resterait supérieure en région non irriguée (vs irriguée), et similaire en région irriguée à celle observée en climat de référence (indice de variation d'environ 15% de la moyenne). Pour la fléole, elle resterait inchangée en climat futur en comparaison au climat de référence, et très similaire pour les régions irriguées et non irriguées.

Tableau 10 : rendement annuel de la luzerne et de la fléole en culture pure avec le modèle d'évapotranspiration de Priestley-Taylor

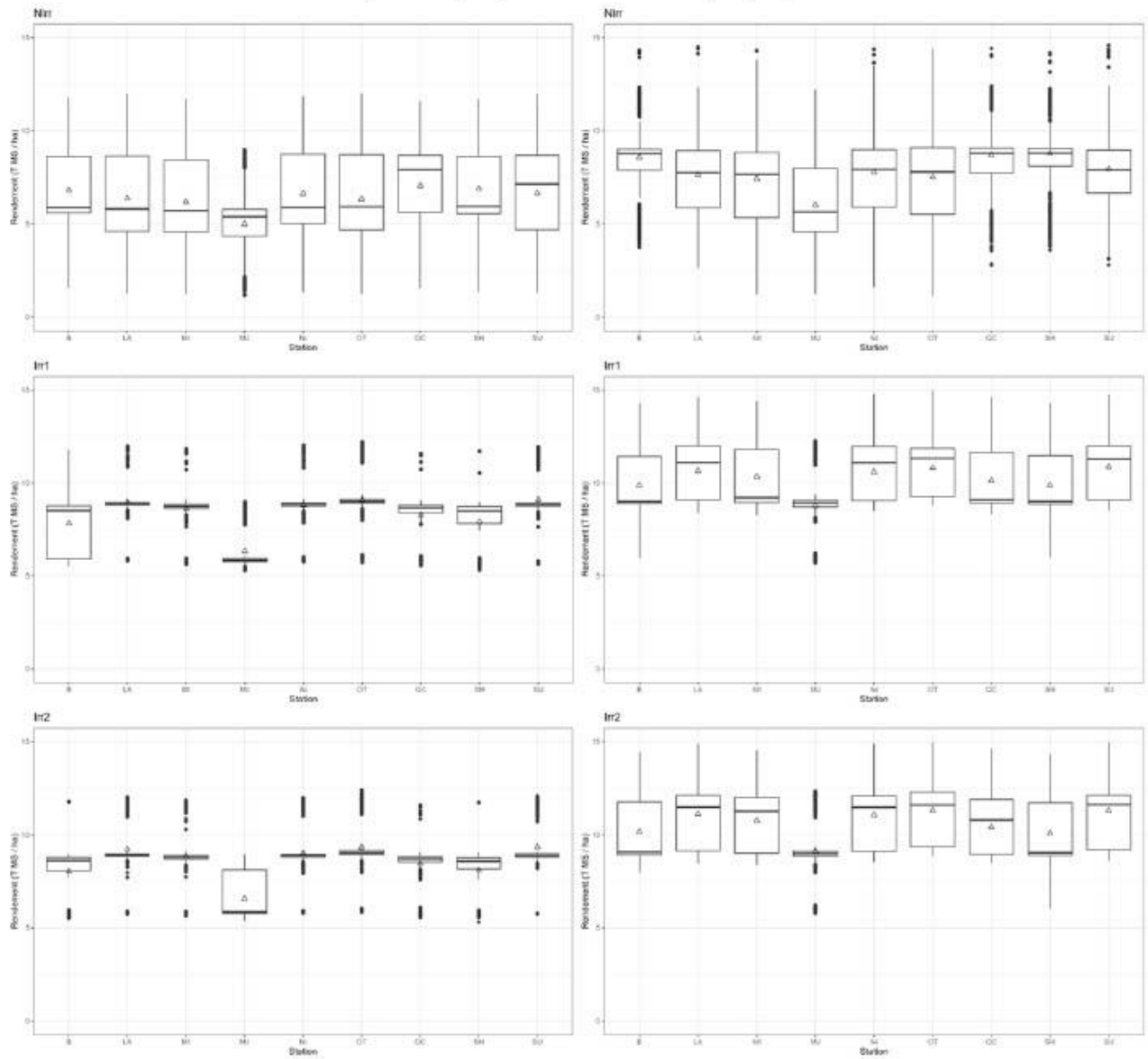
LUZERNE	Moyenne du rendement (T MS / ha)			Écart type du rendement (T MS / ha)		
	Irr1	Irr2	Nirr	Irr1	Irr2	Nirr
REFERENCE						
B	7.8	8.0	6.8	1.3	1.2	1.7
LA	9.0	9.2	6.4	0.8	1.0	2.2
MI	8.6	8.9	6.2	0.8	0.8	2.1
MJ	6.3	6.5	5.0	1.1	1.2	1.6
Ni	8.8	9.0	6.6	0.9	0.9	2.1
OT	9.1	9.3	6.3	0.7	1.0	2.3
QC	8.3	8.4	7.1	1.1	0.9	1.8
SH	7.9	8.1	6.9	1.2	1.1	1.7
SU	9.1	9.3	6.6	0.9	1.1	2.2

LUZERNE	Moyenne du rendement (T MS / ha)			Écart type du rendement (T MS / ha)		
	Irr1	Irr2	Nlrr	Irr1	Irr2	Nlrr
FUTUR						
B	9.9	10.2	8.6	1.4	1.5	2.0
LA	10.6	11.1	7.6	1.6	1.6	2.3
MI	10.3	10.7	7.4	1.5	1.6	2.3
MJ	8.8	9.1	6.0	1.3	1.3	2.1
Ni	10.6	11.1	7.8	1.6	1.6	2.4
OT	10.8	11.3	7.5	1.5	1.7	2.4
QC	10.1	10.4	8.7	1.5	1.5	2.1
SH	9.9	10.1	8.8	1.4	1.5	2.0
SU	10.9	11.3	7.9	1.6	1.6	2.3

FLÉOLE	Moyenne du rendement (T MS / ha)			Écart type du rendement (T MS / ha)		
	Irr1	Irr2	Nlrr	Irr1	Irr2	Nlrr
REFERENCE						
B	8.1	8.2	7.6	2.2	2.2	2.3
LA	7.6	7.7	6.7	2.2	2.2	2.4
MI	6.9	7.0	6.1	2.0	2.0	2.1
MJ	9.6	9.7	8.4	2.5	2.5	2.5
Ni	7.7	7.8	6.8	2.3	2.3	2.4
OT	6.4	6.5	5.7	1.8	1.9	1.9
QC	6.5	6.6	6.0	1.5	1.6	1.7
SH	8.0	8.1	7.6	2.2	2.2	2.3
SU	7.2	7.3	6.3	2.0	2.0	2.2

FLÉOLE	Moyenne du rendement (T MS / ha)			Écart type du rendement (T MS / ha)		
	Irr1	Irr2	Nlrr	Irr1	Irr2	Nlrr
FUTUR						
B	8.2	8.3	7.8	2.4	2.5	2.5
LA	7.6	7.7	7.1	2.4	2.4	2.5
MI	7.2	7.3	6.7	2.2	2.2	2.3
MJ	7.6	7.7	6.9	2.5	2.6	2.6
Ni	7.2	7.2	6.7	2.5	2.5	2.5
OT	6.4	6.5	5.9	1.9	1.9	2.0
QC	7.2	7.2	6.8	2.1	2.2	2.2
SH	8.3	8.4	7.8	2.5	2.5	2.5
SU	7.1	7.1	6.6	2.2	2.2	2.3

Luzerne pure, modèle de Priestley-Taylor



Climat de référence (1981-2010)

Climat futur (2041-2070)

Figure 11 : Comparaison des rendements annuels de la luzerne simulés pour le climat de référence et le climat futur, en utilisant le modèle d'évapotranspiration de Priestley-Taylor.

Fléole pure, modèle de Priestley-Taylor

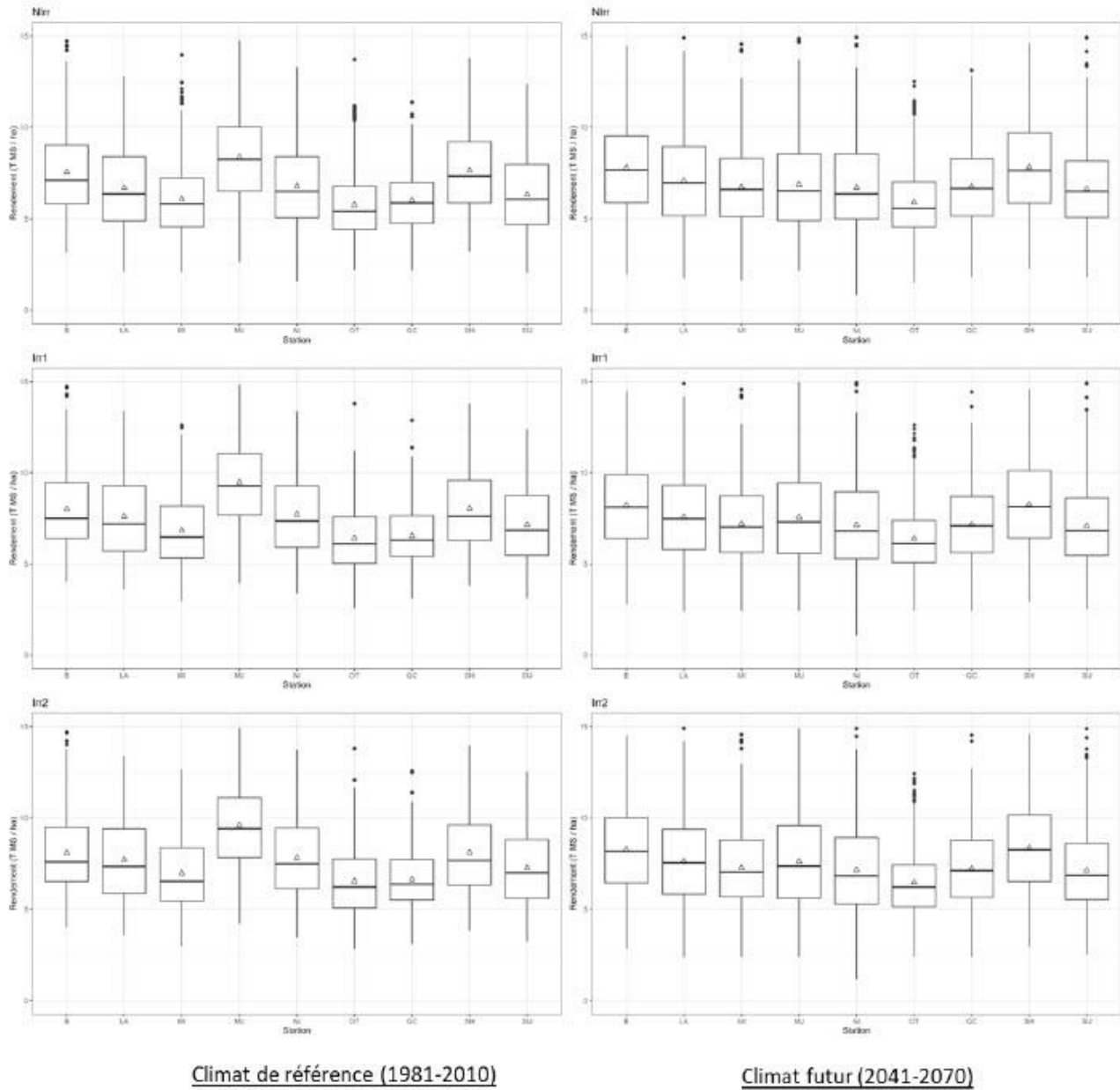


Figure 12 : Comparaison des rendements annuels de la luzerne simulés pour le climat de référence et le climat futur, en utilisant le modèle d'évapotranspiration de Priestley-Taylor.

c. Apports d'irrigation

Maïs

En climat de référence, le nombre moyen d'apport d'irrigation de 20 mm varie de manière importante en fonction des régions (voir tableaux 11 et 12 et figure 13 et 14). Les stations où le climat est plus frais, présentent des nombres d'apports d'irrigation plus faibles : par exemple, à Beauceville et à Sherbrooke (modèle résistif et de Priestley-Taylor), le nombre moyen d'irrigations se situe entre 2 et 3 apports environ en fonction de la régie d'irrigation. Inversement, le nombre moyen d'irrigations est particulièrement élevé dans les régions les plus chaudes : ainsi à Saint-Hubert, Ottawa, Mirabel et l'Assomption, le nombre moyen d'apport de 20 mm (modèle résistif quand disponible, et de Priestley-Taylor) est situé entre 5 et 7 apports par année.

La comparaison des deux modèles pour les 5 stations communes permet de constater que les besoins en eau simulés sont en moyenne très similaires, même si pour certaines stations ils sont supérieurs avec un des deux modèles et inférieurs pour d'autres stations, sans qu'une tendance se dégage. En termes de variation du nombre d'apports d'irrigation, en climat actuel, les deux modèles présentent des indices de variations similaires et quand même relativement important (indice de variation d'environ 36% de la moyenne pour le modèle Priestley-Taylor et de 42% pour le modèle résistif), traduisant ainsi que les besoins en eau d'irrigation varieraient beaucoup d'une année à l'autre. Les figures 13 et 14 permettent également d'apprécier les valeurs maximales d'apports d'irrigation simulées par le modèle, qui dans plusieurs stations, dépassent 10 apports, soit 200 mm d'eau.

En climat futur, les besoins en eau simulés avec les deux modèles d'évapotranspiration augmenteraient : dans le cas du modèle résistif, le nombre d'apport augmenterait en moyenne de 0,8 pour la régie « assurance récolte » et de 0,9 pour la régie « confort hydrique ». Suivant les stations, cette augmentation est plus ou moins importante, elle est plus grande dans les régions où dans le climat de référence les besoins sont plus faibles. Avec le modèle de Priestley-Taylor, les besoins augmentent davantage, de l'ordre de 2 apports de plus en moyenne pour les deux régies d'irrigation. Cette différence peut s'expliquer par le fait que le modèle de Priestley-Taylor ne prend pas en compte l'effet facilitant de la hausse de la concentration du CO₂ atmosphérique sur la photosynthèse, qui a tendance à réduire les besoins en eau des plantes. Les besoins simulés avec le modèle de Priestley-Taylor en climat futur sont donc probablement légèrement surestimés.

En climat futur, la variabilité du nombre d'apports d'irrigation semble également légèrement augmenter. L'indice de variation augmenterait à 52% pour le modèle résistif et à 42% pour le modèle de Priestley-Taylor, traduisant la grande variabilité interannuelle des besoins en eau, ceux-ci pouvant être quasiment nuls certaines années et très élevés d'autres années.

Tableau 11 : nombre d'apports d'irrigation de 20 mm dans le maïs avec le modèle résistif

REFERENCE	Moyenne du nombre d'irrigation			Écart type du nombre d'irrigation		
	Irr1	Irr2	Nirr	Irr1	Irr2	Nirr
B	2.2	2.8	0.0	1.1	1.3	0.0
LA	6.2	7.4	0.0	2.3	2.5	0.0
Ni	4.8	5.9	0.0	2.1	2.3	0.0
SH*	2.1	2.6	0.0	1.0	1.2	0.0
SU	6.8	8.1	0.0	2.5	2.7	0.0

FUTUR	Moyenne du nombre d'irrigation			Écart type du nombre d'irrigation		
	Irr1	Irr2	Nirr	Irr1	Irr2	Nirr
B	3.4	4.2	0.0	2.2	2.6	0.0
LA	6.6	7.9	0.0	2.8	3.2	0.0
Ni	6.0	7.2	0.0	2.9	3.2	0.0
SH*	3.0	3.8	0.0	2.0	2.4	0.0
SU	7.1	8.4	0.0	3.0	3.3	0.0

Tableau 12 : nombre d'apports d'irrigation de 20 mm dans le maïs avec le modèle de Priestley-Taylor

REFERENCE	Moyenne du nombre d'irrigation			Écart type du nombre d'irrigation		
	Irr1	Irr2	Nirr	Irr1	Irr2	Nirr
B	2.8	3.3	0.0	1.2	1.3	0.0
LA	5.8	6.6	0.0	1.8	2.0	0.0
MI	5.4	6.2	0.0	1.8	2.0	0.0
MJ*	3.4	4.0	0.0	1.4	1.5	0.0
Ni	5.0	5.8	0.0	1.8	1.9	0.0
OT	6.4	7.2	0.0	2.1	2.3	0.0
QC	3.5	4.0	0.0	1.4	1.5	0.0
SH	2.9	3.4	0.0	1.2	1.4	0.0
SU	5.8	6.6	0.0	1.9	2.1	0.0

FUTUR	Moyenne du nombre d'irrigation			Écart type du nombre d'irrigation		
	Irr1	Irr2	Nirr	Irr1	Irr2	Nirr
B	4.4	5.1	0.0	2.3	2.5	0.0
LA	7.4	8.2	0.0	2.6	2.7	0.0
MI	7.0	7.8	0.0	2.6	2.7	0.0
MJ*	5.9	6.7	0.0	2.5	2.6	0.0
Ni	6.9	7.6	0.0	2.5	2.5	0.0
OT	7.7	8.5	0.0	2.7	2.7	0.0
QC	5.0	5.7	0.0	2.4	2.5	0.0
SH	4.1	4.8	0.0	2.3	2.5	0.0
SU	7.3	8.0	0.0	2.7	2.7	0.0

Maïs, modèle résistif

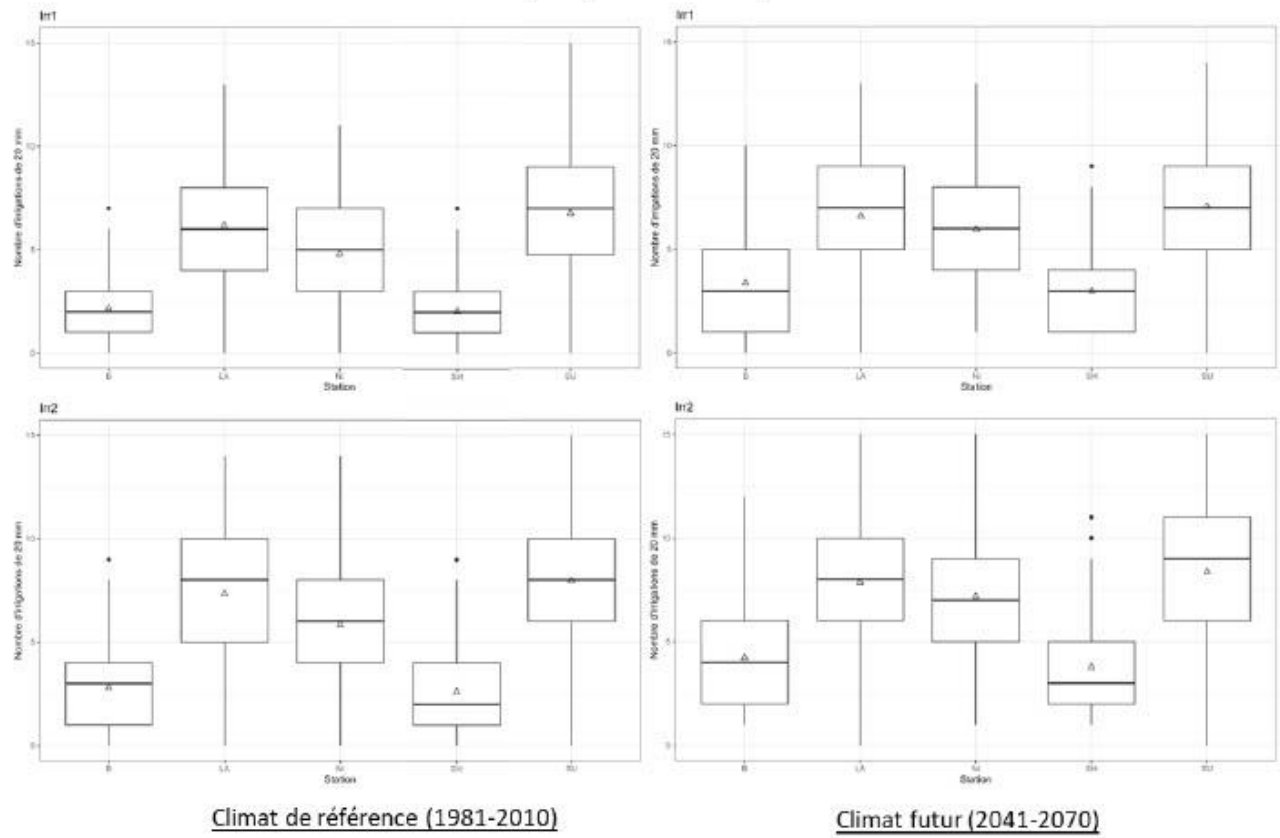


Figure 13 : Comparaison du nombre d'apports d'irrigation (20 mm par rapport) dans le maïs, simulé pour le climat de référence et le climat futur, en utilisant le modèle d'évapotranspiration résistif.

Maïs, modèle de Priestley-Taylor

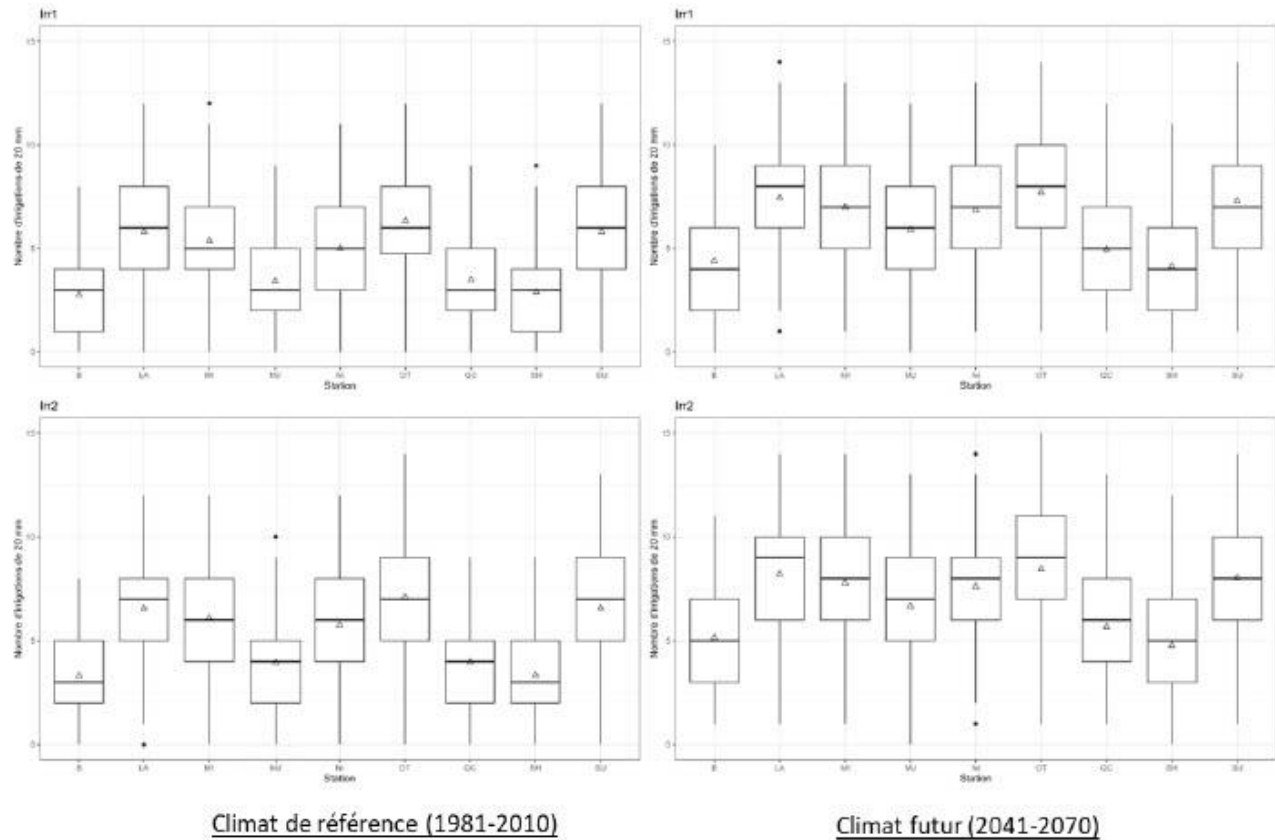


Figure 14 : Comparaison du nombre d'apports d'irrigation (20 mm par rapport) dans le maïs, simulé pour le climat de référence et le climat futur, en utilisant le modèle d'évapotranspiration de Priestley-Taylor.

Soya

Les tableaux 13 et 14 et les figures 15 et 16 présentent les apports en d'irrigation pour le soya simulés avec les deux modèles d'évapotranspiration. En comparaison du maïs, les apports en eau simulés sont plus faibles pour les deux régions d'irrigation, mais suivent des tendances similaires en ce qui a trait aux différences entre les stations. Ainsi, le modèle résistif en climat de référence simule en moyenne 3 apports en région « assurance récolte » (Irr1) et 3,7 apports en région « confort hydrique » (Irr2). Le nombre d'apport varie beaucoup d'une station à l'autre, de 2 apports en moyenne environ pour les stations situées dans les régions les plus froides, à 4 à 5 apports par an en moyenne pour les régions les plus chaudes. Avec le modèle de Priestley-Taylor, l'ordre de grandeur et la différence entre les régions sont similaires au modèle résistif. En termes de variabilité du nombre d'apport en climat actuel, les indices de variations sont élevés comme dans le cas du maïs : 45% de la moyenne du nombre d'apport pour le climat de référence avec le modèle résistif et 41% de variation avec le modèle de Priestley-Taylor.

En climat futur, le modèle résistif entraîne une légère augmentation du nombre d'irrigations, d'en moyenne + 0,3 en comparaison à la même région irriguée en climat de référence. Les stations dont le climat est historiquement plus chaud (Saint-Hubert – SU et l'Assomption – LA) connaîtraient une diminution des besoins en eau d'irrigation (environ 0,2 apports de moins par an en moyenne) alors que les régions les plus froides historiquement connaîtraient une croissance d'environ 0,5 à 0,7 apports par an. Le modèle de Priestley-Taylor ne simule pas cette tendance, puisque dans toutes les stations les besoins en irrigation seraient en augmentation, d'en moyenne 0,9 apports (variant de 0,5 jusqu'à 2 apports de plus suivant les stations). Cette différence est probablement due à la différence de représentation du processus d'évapotranspiration dans les modèles. La variabilité des apports augmenterait également, comme dans le cas du maïs, avec les changements climatiques : l'indice de variation avec le modèle résistif serait en moyenne de 56% (vs 45% en climat de référence) et de 45% (vs 41%) avec le modèle de Priestley-Taylor.

Tableau 13 : nombre d'apports d'irrigation de 20 mm dans le soya avec le modèle résistif

REFERENCE	Moyenne du nombre d'irrigation			Écart type du nombre d'irrigation		
	Irr1	Irr2	Nirr	Irr1	Irr2	Nirr
B	1.8	2.2	0.0	0.9	1.1	0.0
LA	4.1	5.0	0.0	1.8	2.0	0.0
Ni	3.2	3.9	0.0	1.6	1.8	0.0
SH	1.7	2.1	0.0	0.8	1.0	0.0
SU	4.2	5.2	0.0	2.0	2.2	0.0

FUTUR	Moyenne du nombre d'irrigation			Écart type du nombre d'irrigation		
	Irr1	Irr2	Nirr	Irr1	Irr2	Nirr
B	2.4	2.9	0.0	1.5	1.8	0.0
LA	4.0	4.9	0.0	2.0	2.4	0.0
Ni	3.8	4.7	0.0	2.0	2.4	0.0
SH	2.1	2.6	0.0	1.4	1.7	0.0
SU	4.0	5.0	0.0	2.1	2.4	0.0

Tableau 14 : nombre d'apports d'irrigation de 20 mm dans le soya avec le modèle de Priestley-Taylor

REFERENCE	Moyenne du nombre d'irrigation			Écart type du nombre d'irrigation		
	Irr1	Irr2	Nirr	Irr1	Irr2	Nirr
B	2.3	2.9	0.0	1.1	1.3	0.0
LA	4.4	5.3	0.0	1.7	1.8	0.0
MI	4.1	4.8	0.0	1.6	1.7	0.0
MJ	3.3	4.0	0.0	1.4	1.5	0.0
Ni	3.9	4.8	0.0	1.6	1.7	0.0
OT	4.3	5.1	0.0	1.9	2.0	0.0
QC	2.8	3.5	0.0	1.3	1.5	0.0
SH	2.1	2.6	0.0	0.9	1.2	0.0
SU	4.1	4.9	0.0	1.7	1.8	0.0

FUTUR	Moyenne du nombre d'irrigation			Écart type du nombre d'irrigation		
	Irr1	Irr2	Nirr	Irr1	Irr2	Nirr
B	3.3	4.1	0.0	1.8	2.1	0.0
LA	4.9	5.9	0.0	2.0	2.3	0.0
MI	4.7	5.5	0.0	2.0	2.2	0.0
MJ	5.5	6.6	0.0	2.4	2.6	0.0
Ni	4.8	5.6	0.0	2.0	2.2	0.0
OT	4.6	5.5	0.0	2.0	2.2	0.0
QC	3.8	4.6	0.0	1.9	2.3	0.0
SH	2.9	3.6	0.0	1.7	2.0	0.0
SU	4.5	5.4	0.0	2.0	2.2	0.0

Soya, modèle résistif

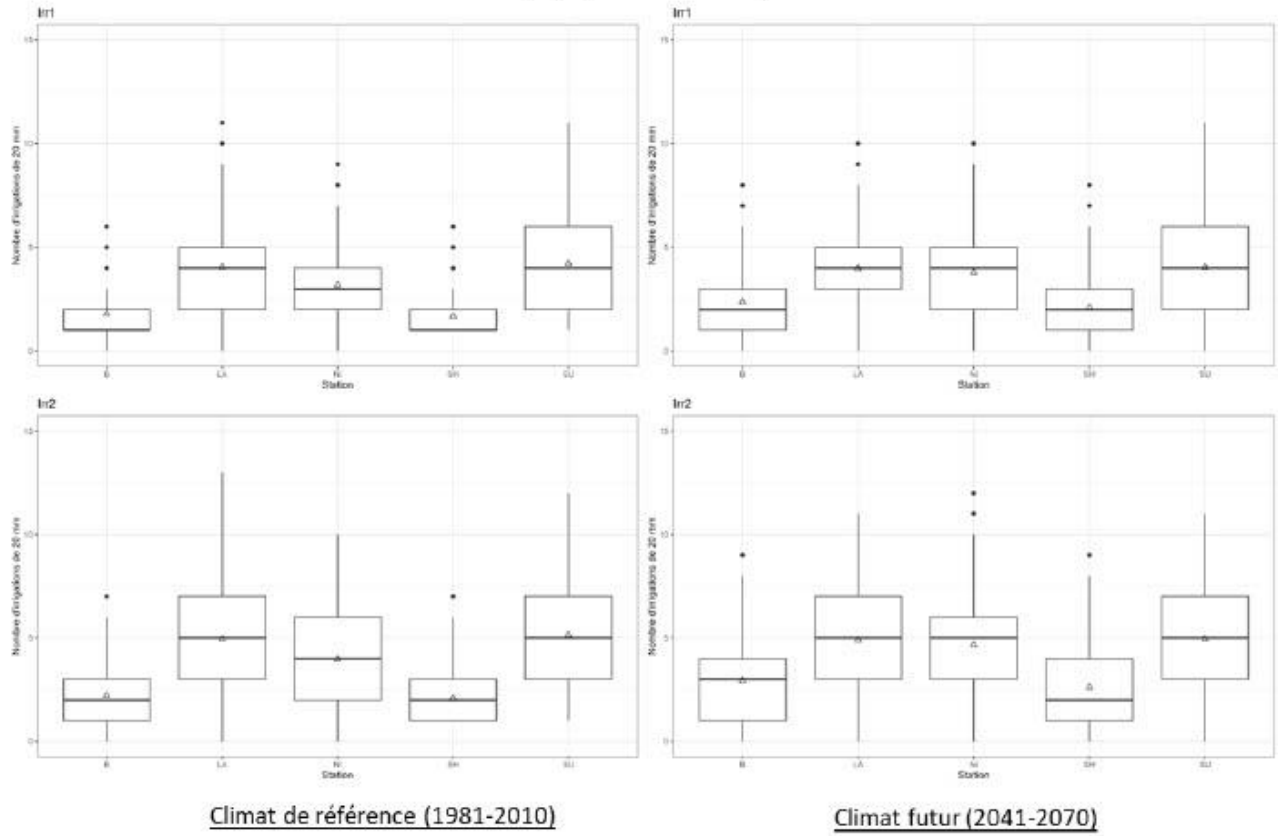


Figure 15 : Comparaison du nombre d'apports d'irrigation (20 mm par rapport) dans le soya, simulé pour le climat de référence et le climat futur, en utilisant le modèle d'évapotranspiration résistif.

Soya, modèle de Priestley-Taylor

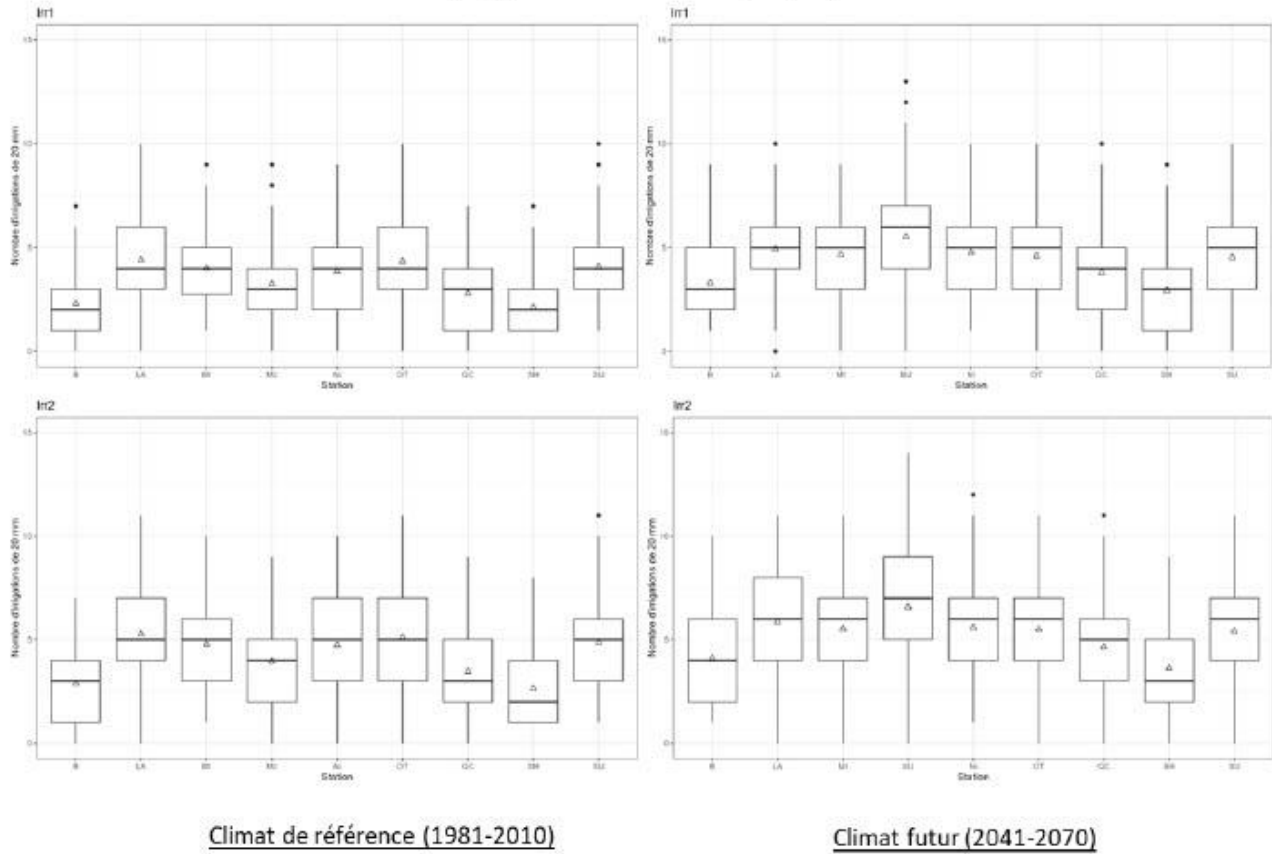


Figure 16 : Comparaison du nombre d'apports d'irrigation (20 mm par rapport) dans le soya, simulé pour le climat de référence et le climat futur, en utilisant le modèle d'évapotranspiration de Priestley-Taylor.

Luzerne-Fléole

Le nombre d'irrigation simulée avec le modèle résistif pour le mélange luzerne fléole est présenté dans le tableau 15 et la figure 17. En climat de référence, le nombre moyen d'irrigation simulé est très similaire pour les deux régies d'irrigation, à 4,2 et 4,3 irrigations par an en moyenne pour les régies « assurance récolte » (Irr1) et « confort hydrique » (Irr2) respectivement. Tout comme pour le maïs et le soya, le nombre d'irrigations serait supérieur pour les régions plus chaudes dans le climat de référence (environ 5 apports en moyenne) que pour les régions plus froides (environ 3 apports en moyenne). Ce nombre d'irrigation serait néanmoins très variables, encore davantage que dans le cas du maïs et du soya, puisque l'indice de variation (écart type rapporté à la moyenne) serait d'environ 62%.

Les tableau 16 et figure 18 présentent le nombre d'irrigation simulé par STICS avec le modèle d'évapotranspiration de Priestley-Taylor pour la luzerne et la fléole respectivement. En climat de référence, le nombre moyen d'irrigation simulé pour la luzerne serait légèrement supérieur à celui simulé pour le mélange, à 5,5 irrigations par an en moyenne pour la régie « assurance récolte » (Irr1) et à 6,2 pour la régie « confort hydrique » (Irr2). La variation entre station est importante, avec des stations où le nombre moyen d'apports serait autour de 4 (Beauceville – B et Sherbrooke – SH par exemple) ou irait jusqu'à près de 7 ou 8 (L'Assomption – LA ou Ottawa – OT). L'indice de variation du nombre d'apport est plus faible avec le modèle de Priestley-Taylor qu'avec le modèle résistif mais reste néanmoins plus élevé que pour le maïs et le soya, il se situe à 41% pour la régie Irr1 et à 37% pour la régie Irr2.

Pour la fléole en culture pure, le nombre d'irrigation est beaucoup plus faible que pour le mélange ou la luzerne en culture pure (voir tableau 17 et figure 19). En moyenne, ce serait ainsi entre 3 et 3,5 irrigations par an qui seraient réalisées en climat de référence, avec un nombre moyen plus faible dans les régions plus froides et légèrement plus élevé dans les régions plus chaudes. L'indice de variation interannuel du nombre d'irrigation serait également assez élevé, autour de 45% pour les deux régies d'irrigation.

En climat futur, le nombre d'irrigation dans le mélange luzerne-fléole (modèle résistif) augmenterait assez peu, d'environ 1,3 apports de plus en moyenne pour les deux régies d'irrigation, et de manière assez similaire pour toutes les stations. Ce serait ainsi environ 5,5 apports d'irrigation par an (soit environ 110 mm d'eau) qui serait apportés chaque année. Néanmoins, la variation interannuelle des apports resterait très importante (indice de variation autour de 60%), puisque certaines années, ce serait plus de 10, voir près de 15 apports qui seraient requis (voir figure 17).

En luzerne pure (modèle de Priestley-Taylor), la tendance est identique, avec une augmentation du nombre d'irrigations d'environ 1,1 apports en moyenne pour les deux régies d'irrigation. À certaines stations, le nombre d'irrigation pourrait atteindre une moyenne de autour de 8 ou 9 apports par an, soit des volumes apportés d'environ 160 à 180 mm. L'indice de variation interannuelle du nombre d'apport resterait inchangé par rapport à celui du climat de référence.

Enfin, en fléole pure, le nombre d'apport diminuerait d'environ 0,5 irrigations par an en moyenne pour les deux régies d'irrigation. Cette diminution est probablement due au fait que la fléole ne serait plus adaptée aux conditions de température futures (trop chaud par rapport à sa

température optimale de croissance, qui est inférieure à 20 °C) et aurait donc une croissance moindre et conséquemment des besoins en eau réduit. Cette réduction est cohérente avec la réduction des rendements simulés. Néanmoins, la variabilité interannuelle resterait très élevée, puisque l'indice de variation serait de 54% en moyenne en climat futur (contre 45% en climat de référence).

Tableau 15 : nombre d'apports d'irrigation de 20 mm dans le mélange luzerne-fléole simulé avec le modèle résistif

REFERENCE	Moyenne du nombre d'irrigation			Écart type du nombre d'irrigation		
	Irr1	Irr2	Nirr	Irr1	Irr2	Nirr
B	3.0	3.1	0.0	1.7	1.9	0.0
LA	4.9	5.0	0.0	2.9	2.9	0.0
Ni	4.6	4.5	0.0	3.1	2.7	0.0
SH	3.3	3.6	0.0	2.2	2.8	0.0
SU	5.1	5.2	0.0	3.1	3.1	0.0

FUTUR	Moyenne du nombre d'irrigation			Écart type du nombre d'irrigation		
	Irr1	Irr2	Nirr	Irr1	Irr2	Nirr
B	4.4	4.6	0.0	2.6	3.0	0.0
LA	6.4	6.5	0.0	3.3	3.4	0.0
Ni	5.7	5.4	0.0	2.9	2.8	0.0
SH	4.6	4.8	0.0	2.9	3.3	0.0
SU	6.5	6.6	0.0	3.3	3.3	0.0

Tableau 16 : nombre d'apports d'irrigation de 20 mm dans la luzerne (pure) avec le modèle de Priestley-Taylor

LUZERNE REFERENCE	Moyenne du nombre d'irrigation			Écart type du nombre d'irrigation		
	Irr1	Irr2	Nirr	Irr1	Irr2	Nirr
B	3.6	4.3	0.0	1.7	1.8	0.0
LA	6.8	7.5	0.0	2.5	2.5	0.0
MI	6.4	7.1	0.0	2.5	2.5	0.0
MJ	4.9	5.7	0.0	1.8	1.9	0.0
Ni	5.9	6.6	0.0	2.3	2.2	0.0
OT	7.3	8.0	0.0	2.7	2.8	0.0
QC	4.1	4.8	0.0	1.9	1.9	0.0
SH	3.5	4.2	0.0	1.7	1.8	0.0
SU	6.7	7.4	0.0	2.6	2.6	0.0

LUZERNE	Moyenne du nombre d'irrigation			Écart type du nombre d'irrigation		
	FUTUR	Irr1	Irr2	Nirr	Irr1	Irr2
B	4.7	5.4	0.0	2.4	2.5	0.0
LA	7.8	8.7	0.0	2.6	2.6	0.0
MI	7.4	8.3	0.0	2.7	2.8	0.0
MJ	6.8	7.6	0.0	2.7	2.8	0.0
Ni	7.2	8.0	0.0	2.5	2.6	0.0
OT	8.4	9.2	0.0	3.0	3.0	0.0
QC	5.0	5.7	0.0	2.4	2.5	0.0
SH	4.4	5.1	0.0	2.4	2.6	0.0
SU	7.8	8.7	0.0	2.7	2.7	0.0

Tableau 17 : nombre d'apports d'irrigation de 20 mm dans la fléole (pure) avec le modèle de Priestley-Taylor

FLÉOLE	Moyenne du nombre d'irrigation			Écart type du nombre d'irrigation		
	REFERENCE	Irr1	Irr2	Nirr	Irr1	Irr2
B	2.5	2.9	0.0	1.1	1.2	0.0
LA	3.2	3.7	0.0	1.5	1.7	0.0
MI	3.4	3.9	0.0	1.6	1.7	0.0
MJ	3.7	4.2	0.0	1.5	1.7	0.0
Ni	3.1	3.5	0.0	1.5	1.6	0.0
OT	3.2	3.6	0.0	1.6	1.6	0.0
QC	2.6	3.0	0.0	1.3	1.5	0.0
SH	2.4	2.8	0.0	1.1	1.2	0.0
SU	3.3	3.7	0.0	1.6	1.7	0.0

FLÉOLE	Moyenne du nombre d'irrigation			Écart type du nombre d'irrigation		
	FUTUR	Irr1	Irr2	Nirr	Irr1	Irr2
B	2.2	2.5	0.0	1.3	1.4	0.0
LA	2.8	3.1	0.0	1.4	1.5	0.0
MI	3.0	3.3	0.0	1.5	1.6	0.0
MJ	3.3	3.7	0.0	1.9	2.0	0.0
Ni	2.6	3.0	0.0	1.4	1.5	0.0
OT	2.8	3.1	0.0	1.5	1.6	0.0
QC	2.3	2.5	0.0	1.3	1.5	0.0
SH	2.3	2.5	0.0	1.3	1.4	0.0
SU	2.8	3.1	0.0	1.4	1.5	0.0

Luzerne-Fléole, modèle résistif

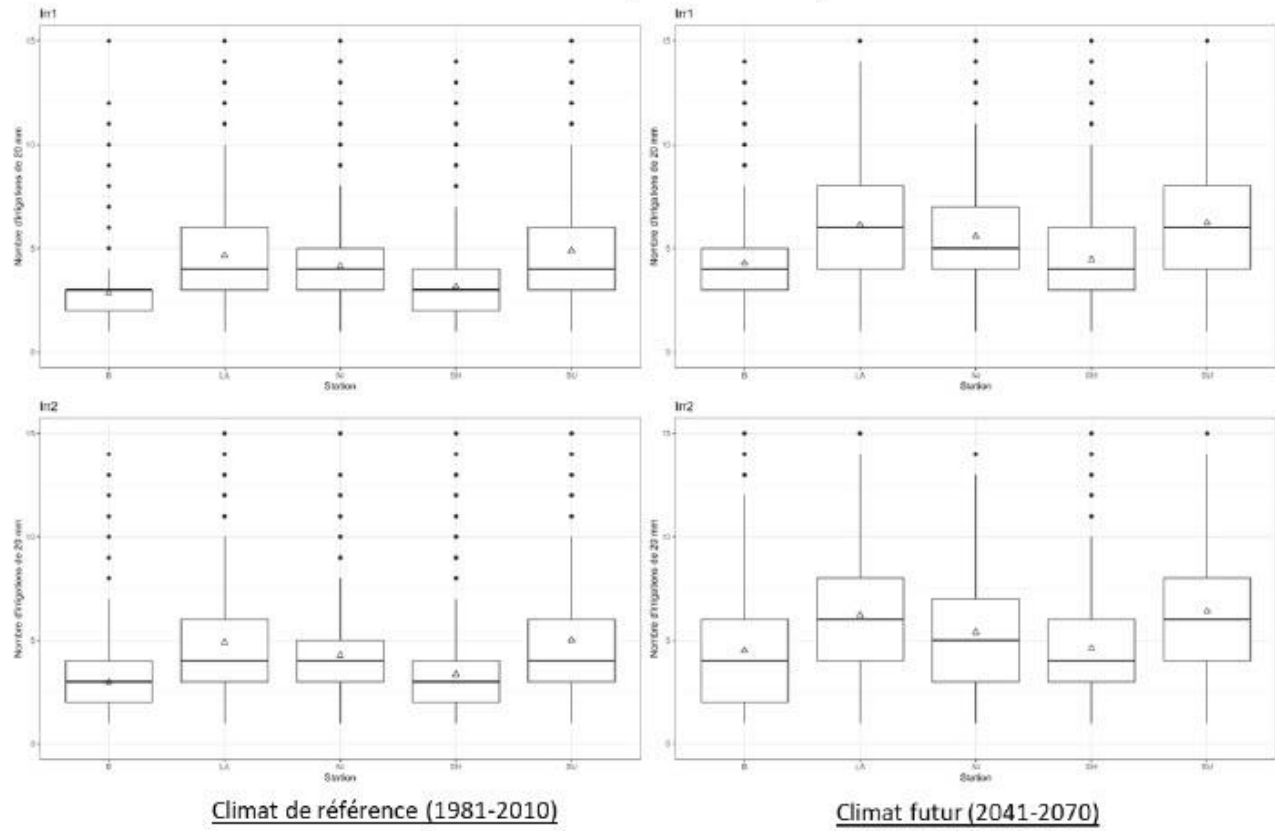


Figure 17 : Comparaison du nombre d'apports d'irrigation (20 mm par rapport Luzerne-Fléole, simulé pour le climat de référence et le climat futur, en utilisant le modèle d'évapotranspiration résistif.

Luzerne pure, modèle de Priestley-Taylor

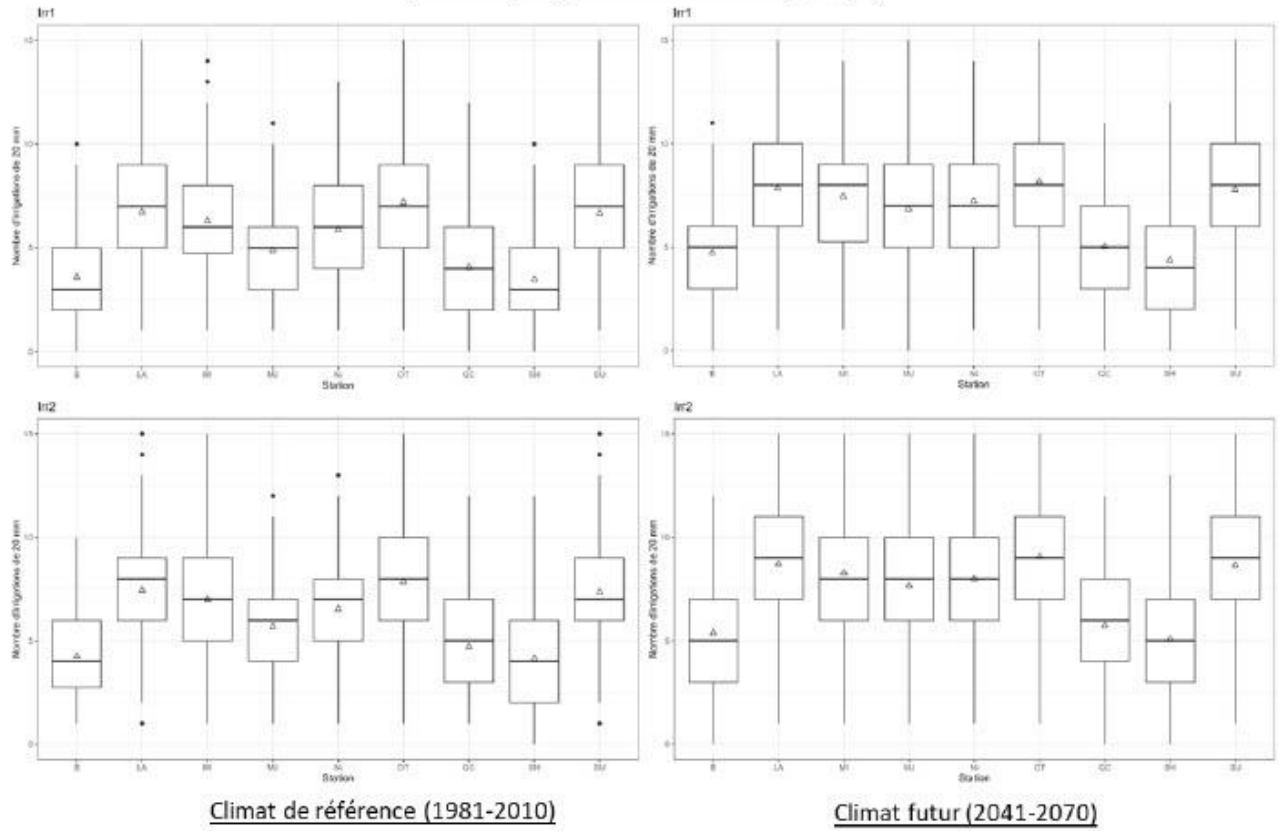


Figure 18 : Comparaison du nombre d'apports d'irrigation (20 mm par rapport) dans la luzerne, simulée pour le climat de référence et le climat futur, en utilisant le modèle d'évapotranspiration de Priestley-Taylor.

Fléole pure, modèle de Priestley-Taylor

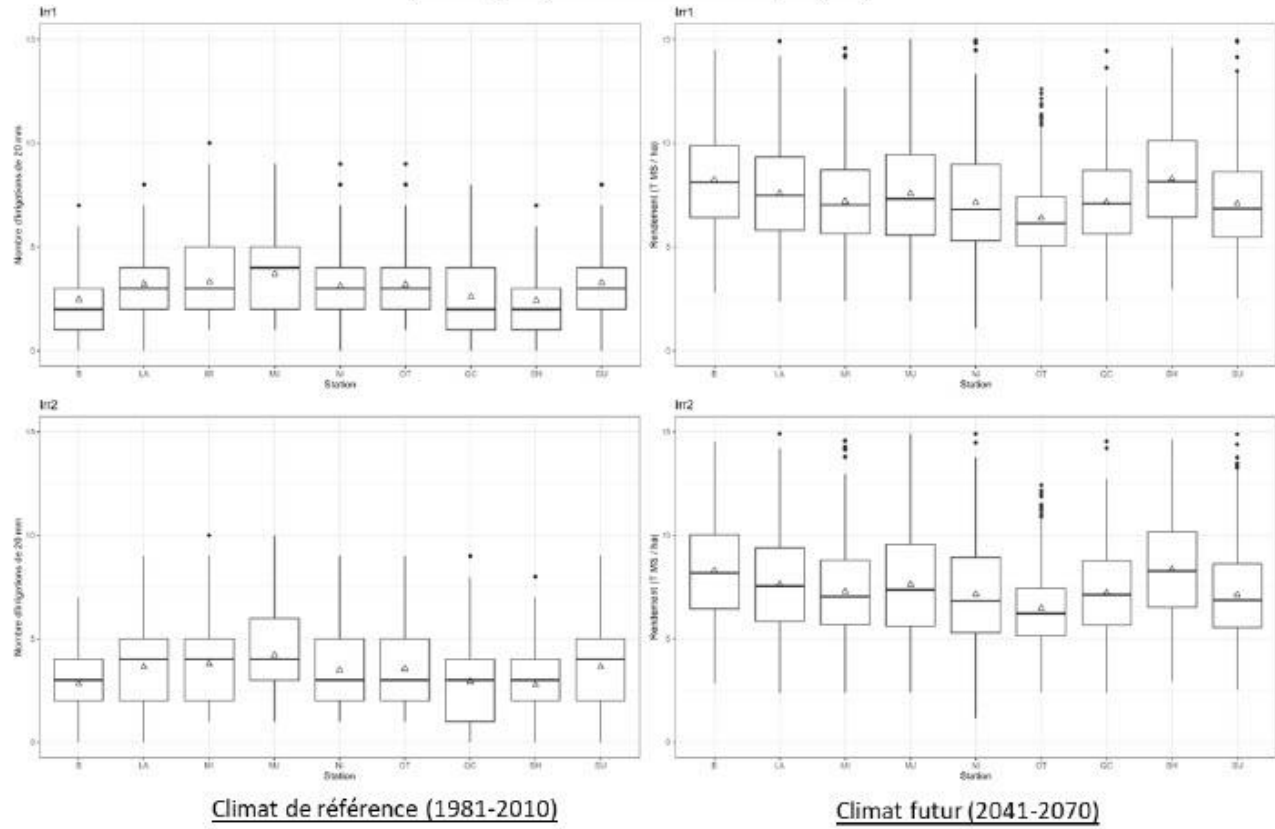


Figure 19 : Comparaison du nombre d'apports d'irrigation (20 mm par rapport) dans la fléole, simulée pour le climat de référence et le climat futur, en utilisant le modèle d'évapotranspiration de Priestley-Taylor.

4. Conclusions

Dans ce rapport, nous présentons les résultats de simulations des besoins en eau des grandes cultures et plantes fourragères qui représentent la majorité des superficies cultivées au Québec : le maïs, le soya et la luzerne et la fléole, cultivée en mélange.

Dans les essais réalisés dans le cadre du projet, l'IRDA a pu suivre et comparer des champs de maïs et soya, et des prairies où luzerne et fléole étaient cultivées en mélange, avec et sans irrigations. Sur la base des données collectées dans ces essais, nous avons paramétré le modèle de culture STICS pour tenter de reproduire par simulation les conditions de croissance de ces différentes plantes dans les conditions de sols et de climat propres aux essais. Les comparaisons entre simulations et observations présentées dans ce rapport montrent des résultats très satisfaisants en ce qui concerne la simulation de la production de biomasse (variable observée) et de la dynamique de l'eau dans le sol, montrant ainsi la capacité du modèle à reproduire adéquatement la croissance des plantes en fonction de la capacité des plantes à prélever l'eau du sol pour combler les besoins liés à la transpiration. Les régies de l'irrigation mise en œuvre dans les essais ont servi à déterminer une régie d'irrigation dite « d'assurance récolte » qui consiste à irriguer la culture quand l'indice de stress hydrique estimé par le modèle atteint le seuil de 0,8. Une seconde régie de l'irrigation a été testée, dite de « confort hydrique », où l'irrigation est réalisée dès que la plante voit ses prélèvements réduits par le manque d'eau.

Les simulations réalisées en climats de référence (pour la période 1981-2010) et pour la période futur (2041-2070) pour 9 stations météorologiques du Québec ont permis d'obtenir des résultats quant aux impacts potentiels de l'irrigation sur le rendement du maïs, du soya et des plantes fourragères dans le climat de référence, mais également en climat futur. Ces simulations ont été réalisées pour des sols dit « potentiellement irrigables », c'est-à-dire des sols dont le potentiel de rétention de l'eau est limité. De plus, les simulations ont été réalisées en conditions non limitantes en azote. Ainsi, ces résultats ne peuvent en aucun cas être généralisés à l'ensemble des sols cultivés du Québec. Les grandes tendances qui se dégagent de ces simulations sont les suivantes :

- Pour le maïs, les simulations réalisées en climat de référence indiquent que les rendements seraient potentiellement augmentés de l'ordre de 30% avec l'irrigation. Pour obtenir de telles augmentations, environ 5 apports d'irrigations de 20 mm par an seraient nécessaires. En climat futur, le rendement, y compris en conditions non irriguées, augmenterait de façon conséquente en lien avec la hausse des températures. Environ un apport d'irrigation supplémentaires serait nécessaire pour obtenir des gains de rendements en lien avec l'irrigation relativement importants, de l'ordre de 2,5 t MS par ha. En climat de référence et en climat futur, la variabilité des rendements serait fortement réduite par les apports d'irrigations, dont le nombre serait néanmoins fortement très variable d'une année à l'autre et pourrait potentiellement atteindre des quantités élevées (plus de 10 apports par an).
- Pour le soya, les résultats indiquent des tendances très similaires à celles obtenues pour le maïs mais avec des besoins en eau plus faibles, à la fois en climat de référence et en climat futur. Les rendements augmenteraient en climat futur de l'ordre de 20% par rapport au climat des références, et les rendements en régie irrigués seraient environ 20% supérieurs à ceux obtenus en régie non irriguée, en climat de référence comme en climat

futur. Les apports d'eau d'irrigation pour obtenir de tels gains de rendement seraient de l'ordre de 3 à 4 apports d'eau par an en climat de référence, et éventuellement légèrement supérieurs en climat futur (0,5 à 1 apport de plus en moyenne). Dans le soya également, l'irrigation permettrait de réduire la variabilité des rendements, et les apports d'eau requis pour atteindre un tel objectif seraient très variables d'une année à l'autre.

- Finalement, pour les plantes fourragères, la luzerne et la fléole semblent présenter des réponses très différentes aux changements climatiques et à l'irrigation. La luzerne, en mélange ou en culture pure, semble répondre positivement à l'irrigation, avec en climat de référence comme en climat futur des gains de rendements appréciables (jusqu'à 2,5 t MS / ha), pour des besoins en irrigation compris entre 4 et 6 apports par an en moyenne en climat de référence et entre 5,5 et 7,5 apports par an en climat futur. Les rendements augmenteraient également sous l'effet des changements climatiques, en conditions irriguées et non irriguées, avec néanmoins des variabilités interannuelles de rendement et de besoins en eau d'irrigation élevées. Par contre, la fléole, en mélange et en culture pure, réagirait différemment aux changements climatiques : sa productivité serait réduite, avec ou sans irrigation, probablement en lien avec le fait que les conditions de température deviendraient trop élevées en comparaison aux températures optimales de croissance de la plante. En climat de référence comme en climat futur, la croissance de la plante serait probablement améliorée par l'irrigation, mais celle-ci aurait néanmoins un impact beaucoup plus limité que sur la luzerne par exemple, et très variable d'une année à l'autre.

Références

Bootsma, A., & De Jong, R. (1988). Estimates of seeding dates of spring wheat on the Canadian Prairies from climate data. *Can. J. Plant Sci.* 68:513–517. doi:10.4141/cjps88-062

Crépeau M., Jégo G., Morissette R., Pattey E., Morrison M.J. (2021) Predictions of soybean harvest index evolution and evapotranspiration using STICS crop model. *Agron J* 113:3281-3298. DOI: 10.1002/agj2.20765.

Jégo, G., Pattey, E., Bourgeois, G., Morrison, M.J., Drury, C.F., Tremblay, N., et Tremblay, G. (2010). « Calibration and performance evaluation of soybean and spring wheat cultivars using the STICS crop model in Eastern Canada. », *Field Crops Research*, 117(2-3), p. 183-196. doi : 10.1016/j.fcr.2010.03.008

Jégo, G., Pattey, E., Bourgeois, G., Tremblay, N., et Drury, C.F. (2011). « Evaluation of the STICS crop growth model with maize cultivar parameters calibrated for Eastern Canada. », *Agronomy for Sustainable Development*, 31(3), p. 557-570. doi : 10.1007/s13593-011-0014-4

Jégo, G., Bélanger, G., Tremblay, G.F., Jing, Q., et Baron, V.S. (2013). « Calibration and performance evaluation of the STICS crop model for simulating timothy growth and nutritive value. », *Field Crops Research*, 151, p. 65-77. doi : 10.1016/j.fcr.2013.07.003

Strullu, L., N. Beaudoin, P. Thiébeau, B. Julier, B. Mary, F. Ruget, D. Ripoche, L. Rakotovololona, G. Louarn, 2020. Simulation using the STICS model of C&N dynamics in alfalfa from sowing to crop destruction, *European Journal of Agronomy*, Volume 112.

Saadi S., Pattey E., Jégo G., Champagne C. (2022) Prediction of rainfed corn evapotranspiration and soil moisture using the STICS crop model in eastern Canada. *Field Crops Res* 287. DOI: 10.1016/j.fcr.2022.108664.

Thivierge, Marie-Noëlle, Guillaume Jégo, Gilles Bélanger, Martin H. Chantigny, C. Alan Rotz, Édith Charbonneau, Vern S. Baron, Budong Qian, 2017. Projected impact of future climate conditions on the agronomic and environmental performance of Canadian dairy farms, *Agricultural Systems*, Volume 157, pages 241-257,

11.3 (Objectif 2). Analyse économique



Établir des balises techniques, économiques,
sociales et environnementales concernant
le recours à l'irrigation du maïs, du soya et
des plantes fourragères

Analyse économique

Projet no. 400238

mars 2024

TABLE DES MATIÈRES

MISE EN CONTEXTE	3
Mandat	3
Réserves et limites	3
Assurance qualité	3
APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	3
BESOIN ET COÛT D'IRRIGATION	4
Besoin en irrigation	4
Coût du système d'irrigation	4
IRRIGATION DES FOURRAGES	5
IRRIGATION DU MAÏS-GRAIN	7
IRRIGATION DU SOYA	9
DISCUSSION	11
RÉFÉRENCES	13

Liste des tableaux

Tableau 1: Information technique sur le besoin et le système d'irrigation	4
Tableau 2: Coût du système d'irrigation pour 30 ha	5
Tableau 3: Marges sur l'irrigation de 30 ha de fourrage	6
Tableau 4: Table de sensibilité pour de faibles pertes (10%) pour les fourrages sur 30 ha	6
Tableau 5: Table de sensibilité pour de pertes moyennes (25%) pour les fourrages sur 30 ha	7
Tableau 6: Table de sensibilité pour des pertes élevées (50%) pour les fourrages sur 30 ha	7
Tableau 7: Marges sur l'irrigation de 30 ha de maïs-grain	8
Tableau 8: Table de sensibilité du système d'irrigation selon le prix du maïs-grain sur 30 ha	8
Tableau 9: Table de sensibilité pour des pertes moyennes (25%) pour le maïs-grain sur 30 ha	9
Tableau 10: Table de sensibilité pour des pertes élevées (50%) pour le maïs-grain sur 30 ha	9
Tableau 11: Marges sur l'irrigation de 30 ha de soya	10
Tableau 12: Table de sensibilité pour de faibles pertes (10%) pour le soya sur 30 ha	10
Tableau 13: Table de sensibilité pour des pertes moyennes (25%) pour le soya sur 30 ha	11
Tableau 14: Table de sensibilité pour des pertes élevées (50%) pour le soya sur 30 ha	11
Tableau 15: Comparaison des marges d'irrigation entre les cultures sur 30 ha	12

MISE EN CONTEXTE

Mandat

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) réalise le projet « Établir des balises techniques, économiques, sociales et environnementales concernant le recours à l'irrigation du maïs, du soya et des plantes fourragères ». L'Institut a sollicité l'appui du Centre d'étude sur les coûts de production en agriculture (CECPA) pour la réalisation de l'analyse économique de scénarios basés sur les données collectées. Notre mandat consiste à faire une évaluation économique de scénarios d'irrigation conçus avec les données collectées par l'IRDA.

Notre démarche consiste à :

- organiser l'information agronomique pour en faire une analyse économique ;
- participer à l'élaboration des scénarios étudiés ;
- déterminer les revenus et les pertes liés aux scénarios ;
- appuyer l'analyse des résultats et des constats.

Réserves et limites

Ce rapport présente des analyses basées sur plusieurs scénarios à propos de situations complexes et multifactorielles. Le CECPA utilise les données ayant la meilleure représentativité possible afin de présenter des scénarios réalistes et crédibles. Toutefois, les réalités de plusieurs entreprises peuvent différer des scénarios proposés.

Ce rapport est préparé à la demande de l'IRDA dans le cadre du projet mentionné ci-haut. Toute diffusion nécessite une permission écrite de l'IRDA ou du CECPA. Nous n'assumons aucune responsabilité pour des pertes qui pourraient être occasionnées aux parties en cause, à leurs partenaires, à leurs administrateurs, à leurs employés ou à toute autre partie, à la suite de la circulation de la référence ou de l'utilisation de ce rapport. Pour finir, le CECPA se réserve le droit de réviser ses constats et ses conclusions si des informations pertinentes, antérieurement non disponibles ou non fournies, lui étaient communiquées subséquemment.

Assurance qualité

Un protocole de vérification interne a été établi afin de valider les processus d'analyse. Celui-ci a démontré l'absence d'anomalies significatives.

APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

L'approche utilisée dans ce projet repose sur l'analyse de scénarios d'irrigation pour diverses cultures. Les données utilisées dans les scénarios d'irrigation proviennent majoritairement de l'IRDA. Celles-ci contenaient les taux de pertes liées au stress hydrique, les données techniques d'irrigation et une soumission pour un canon enrouleur. Les données de rendements et de prix sont détaillées dans leurs sections respectives.

Dans une première partie, les coûts liés à la possession et l'opération de canon enrouleur sur 30 hectares sont présentés. Ces coûts sont les mêmes pour toutes les cultures. Ensuite, l'effet économique de l'irrigation est présenté par culture. Afin de tenir compte des variations futures des prix et des rendements, des tables de sensibilité par scénario de stress hydrique sont présentées pour chaque culture.

Certaines analyses pour les fourrages recourent celles effectuées dans un précédent mandat avec l'IRDA. Elles peuvent être similaires ou identiques.

Le budget partiel

L'analyse économique est effectuée selon la méthode de budget partiel. Cette méthode consiste à évaluer les conséquences financières spécifiques d'un scénario. Pour ce faire, les améliorations (produits en plus et frais en moins) et les détériorations (produits en moins et frais en plus) de chacun des scénarios sont estimées. Les postes considérés sont détaillés dans l'analyse.

Les coûts indirects ne sont pas considérés. Par exemple, la baisse de rendement causée par le stress hydrique pourrait causer une baisse de liquidité entraînant une augmentation des prêts à court terme et conséquemment une hausse des intérêts. Cette hausse des charges d'intérêt n'est pas considérée.

Tables de sensibilité

Afin de contextualiser les résultats, des tables de sensibilités sont présentées permettant de faire varier le prix des cultures et du rendement de référence. Quatre (4) rendements sont présentés. Le rendement de référence est le même que celui utilisé pour le budget partiel. Le rendement très élevé est le rendement maximal estimé par l'IRDA en tenant compte des changements climatiques dans un horizon de 2070. Le rendement élevé représente la moyenne entre le rendement de référence et le rendement très élevé. Finalement, le rendement faible représente un rendement réaliste, mais plus faible que celui de référence.

Les prix présentés sont dérivés des prix utilisés dans les différents scénarios de stress hydrique ainsi que d'autres prix permettant de couvrir une vaste gamme de prix. Trois (3) tableaux sont présentés, chacun tenant compte d'un scénario de stress hydrique.

BESOIN ET COÛT D'IRRIGATION

Le stress hydrique cause une baisse de rendement. Cette dernière dépend de plusieurs facteurs. Pour simplifier l'analyse, les scénarios sont standardisés sur trois (3) scénarios de stress hydrique, faible (10 % de pertes), moyen (25 % de pertes) et élevé (50 % de pertes).

Besoin en irrigation

Le besoin en eau est le même pour toutes les cultures. Le Tableau 1 présente les trois (3) scénarios de stress hydrique et leur pourcentage de pertes annuelles, le volume d'irrigation nécessaire, le nombre d'épisodes d'irrigation ainsi que le temps nécessaire à l'irrigation. L'hypothèse retenue est que l'accès à l'eau n'est pas un enjeu. Aucuns frais ne sont considérés pour cela.

Un scénario sans pertes de rendement est présenté puisque les coûts de possessions du canon doivent être assumés même lors de saison où l'irrigation n'est pas nécessaire.

Tableau 1: Information technique sur le besoin et le système d'irrigation.

Scénarios de stress hydrique	Pertes faibles	Pertes moyennes	Pertes élevées	Référence (sans pertes)
Pourcentage de pertes annuelles	10%	25%	50%	0%
Volume d'irrigation par saison (mm/ha)	100	150	200	
Nombre d'irrigations par saison (nbre)	4	6	8	0
Temps d'irrigation - tracteur 80 HP (h)	450	675	900	
Temps d'installation et de déplacement - tracteur 100 HP (h)	12	18	24	

Coût du système d'irrigation

Le système d'irrigation retenu est un canon enrouleur d'une capacité de 30 hectares. Il est manipulé et déplacé à l'aide d'un tracteur de 100 HP et opère avec un tracteur de 80 HP. Le coût initial du canon est évalué à 126 500 \$ incluant le transport. Le canon a une durée de vie utile de 15 ans. Des frais d'intérêts et d'amortissement sont calculés sur cette durée. Le système d'irrigation utilisé pour l'évaluation économique est le même pour tous les scénarios et pour toutes les cultures. Ce dernier est un canon enrouleur d'une capacité de 30 hectares. Le détail des coûts pour les scénarios est présenté au Tableau 2.

Les coûts d'opération augmentent considérablement lorsque le stress hydrique est important puisque le tracteur demeure en opération très longtemps. Ce dernier opère la majorité du temps sans supervision, ce qui entraîne de faibles frais de main-d'œuvre.

Les coûts fixes sont généralement les mêmes pour tous les scénarios. Puisqu'un tracteur est mobilisé durant toute la saison à l'irrigation, les frais fixes sont uniformisés. Le tracteur de 100 HP étant utilisé ponctuellement, ces frais sont ajustés aux scénarios.

Tableau 2: Coût du système d'irrigation pour 30 ha.

Scénarios de stress hydrique	Pertes faibles	Pertes moyennes	Pertes élevées	Référence (sans pertes)
Coûts d'opération (A)				
<u>Tracteur 80 HP (Pompe sur PTO)</u>				
Entretien et réparation machinerie (\$)	3 893	5 839	7 785	-
Carburants et lubrifiants (\$)	10 122	15 183	20 245	-
<u>Tracteur 100 HP (Installation et déplacement)</u>				
Entretien et réparation machinerie (\$)	142	212	283	-
Carburants et lubrifiants (\$)	337	506	675	-
<u>Main-d'œuvre</u>				
Frais en main-d'œuvre (\$)	312	468	624	-
Total des coûts d'opération	14 806	22 209	29 612	-
Coûts fixes annualisés (B)				
Canon enrouleur mobile		17 611		
Tracteur 80 HP		10 545		
Tracteur 100 HP	333	500	667	-
Total de coûts fixes	28 489	28 656	28 822	28 156
Coût total annuel (A + B)	43 295	50 865	58 434	28 156
	1 443	1 695	1 948	939

IRRIGATION DES FOURRAGES

Les fourrages sont au cœur de la gestion alimentaire de plusieurs productions animales. Pour faire face aux aléas climatiques affectant les rendements de fourrages, la majorité des entreprises laitières et bovines entreposent une partie de leur surplus. Cette gestion des surplus varie grandement entre les entreprises et entre les années. Ce surplus est utilisé lors des années de pertes afin de réduire l'achat de fourrage nécessaire. D'un point de vue économique, ces surplus ont toutefois une valeur ; celle de leur production, de leur manutention et de leur entreposage. Ainsi, remplacer l'achat de fourrage par l'utilisation de ses propres surplus est équivalent dans cette analyse. Même pour les années de grande rareté, le coût d'opportunité de vendre ce foin entreposé (qui augmente de prix) le rend équivalent à son achat. De plus, il ne faut pas négliger qu'advenant des pertes sur plusieurs années consécutives, il n'y a plus d'inventaire et il faut alors acheter l'ensemble des pertes à l'externe.

L'irrigation des fourrages permet de réduire la perte qui aurait été causée par le stress hydrique. Ce fourrage, sauvé par l'irrigation, aurait dû soit être acheté à l'extérieur de l'entreprise, soit puisé dans les réserves. Cette valeur du fourrage sauvé est utilisée comme gain à l'irrigation.

Le rendement retenu est le rendement réel estimé par le CECPA en 2023 dans la région du Kamouraska. Ce dernier est de 7,6 tonnes par hectare à 85 % d'humidité. Le prix retenu est le prix de référence de la FADQ pour l'année 2023, il est de 245 \$/t.

Le Tableau 3 montre les valeurs de gain à l'irrigation et les coûts liés à l'irrigation. Cela permet de dégager une marge annuelle quant à l'utilisation du canon enrouleur. Ainsi, il appert que dans le scénario de faibles pertes, il en coûte 43 295 \$ en irrigation pour sauver 5 586 \$ de fourrage. Conséquemment, une telle opération coûte plus cher que ce qu'elle rapporte, la marge annuelle est donc négative. De plus, il est important de noter que même lors d'années sans pertes, il faut assumer les frais fixes.

Tableau 3: Marges sur l'irrigation de 30 ha de fourrage.

Scénarios	Pertes faibles	Pertes moyennes	Pertes élevées	Référence (sans pertes)
Pourcentage de pertes annuelles de fourrage	10%	25%	50%	0%
Pertes (t/30ha)	22,8	57,0	114,0	-
Valeur du fourrage sauvé (\$) (A)	5 586	16 758	41 895	-
Coût d'opération (\$) (B)	14 806	22 209	29 612	-
Coût fixe annualisé (\$) (C)	28 489	28 656	28 822	28 156
Coût total annuel (\$) (D = B + C)	43 295	50 865	58 434	28 156
Marge annuelle pour irrigation des fourrages (\$) (A - D)	(37 709)	(34 107)	(16 539)	(28 156)

Par conséquent, il appert que l'utilisation du canon n'est pas rentable, peu importe le scénario de stress hydrique présenté. Afin de contextualiser ces données, des tables de sensibilités sont présentées.

Le Tableau 4 présente la table de sensibilité pour le scénario de faibles pertes hydriques. Même avec des rendements très élevés et un prix très élevé (100 % du prix de référence), l'irrigation demeure non rentable. En effet, il faudrait alors un prix de près de 1 050\$/t pour justifier l'utilisation du canon enrouleur.

Tableau 4: Table de sensibilité pour de faibles pertes (10%) pour les fourrages sur 30 ha.

Scénario: Pertes faibles	Rendement faible	Rendement de référence	Rendement élevé	Rendement très élevé
Rendement (t/ha)	6,00	7,60	10,70	13,80
Prix du fourrage				
221 \$/t (-10 %)	(39 317)	(38 256)	(36 201)	(34 146)
Prix de référence: 245 \$/t (0 %)	(38 885)	(37 709)	(35 430)	(33 152)
Prix de sécheresse moyenne: 294 \$/t (20 %)	(38 003)	(36 592)	(33 858)	(31 123)
Prix de sécheresse élevée ou biologique: 368 \$/t (50 %)	(36 671)	(34 905)	(31 482)	(28 060)
429 \$/t (75 %)	(35 573)	(33 514)	(29 524)	(25 534)
490 \$/t (100 %)	(34 475)	(32 123)	(27 566)	(23 009)
Prix du fourrage pour une marge nulle (\$/t)	2 405	1 899	1 349	1 046

Dans le cas du scénario de pertes moyennes (tableau 5), le scénario de rendement très élevé ainsi qu'un prix très élevé permettent d'arriver à un coût presque nul.

Tableau 5: Table de sensibilité pour de pertes moyennes (25%) pour les fourrages sur 30 ha.

Scénario: Pertes moyennes	Rendement			
	Rendement faible	Rendement de référence	Rendement élevé	Rendement très élevé
Rendement (t/ha)	6,00	7,60	10,70	13,80
Prix du fourrage				
221 \$/t (-10 %)	(40 920)	(38 268)	(33 129)	(27 991)
Prix de référence: 245 \$/t (0 %)	(39 840)	(36 900)	(31 203)	(25 507)
Prix de sécheresse moyenne: 294 \$/t (20 %)	(37 635)	(34 107)	(27 271)	(20 436)
Prix de sécheresse élevée ou biologique: 368 \$/t (50 %)	(34 305)	(29 889)	(21 333)	(12 777)
429 \$/t (75 %)	(31 560)	(26 412)	(16 437)	(6 463)
490 \$/t (100 %)	(28 815)	(22 935)	(11 542)	(150)
Prix du fourrage pour une marge nulle (\$/t)	1 130	892	634	491

Finalement, lors de pertes élevées l'utilisation du canon peut être économiquement viable selon le rendement et le prix retenu.

Tableau 6: Table de sensibilité pour des pertes élevées (50%) pour les fourrages sur 30 ha.

Scénario: Pertes élevées	Rendement			
	Rendement faible	Rendement de référence	Rendement élevé	Rendement très élevé
Rendement (t/ha)	6,00	7,60	10,70	13,80
Prix du fourrage				
221 \$/t (90 %)	(38 544)	(33 240)	(22 964)	(12 687)
Prix de référence: 245 \$/t (100 %)	(36 384)	(30 504)	(19 112)	(7 719)
Prix de sécheresse moyenne: 294 \$/t (120 %)	(31 974)	(24 918)	(11 247)	2 424
Prix de sécheresse élevée ou biologique: 368 \$/t (150 %)	(25 314)	(16 482)	630	17 742
429 \$/t (175 %)	(19 824)	(9 528)	10 420	30 369
490 \$/t (200 %)	(14 334)	(2 574)	20 211	42 996
Prix du fourrage pour une marge nulle (\$/t)	649	513	364	282

Ainsi, le canon enrouleur n'est pas réalistement viable économiquement pour protéger les fourrages. Même si lors de forts stress hydriques et de forts prix, il est possible d'obtenir une rentabilité annuelle. Selon les conditions actuelles, il semble peu réaliste d'estimer que de fortes pertes se répètent assez souvent pour justifier l'achat et l'installation d'un canon enrouleur.

IRRIGATION DU MAÏS-GRAIN

Le maïs-grain demeure la culture avec les superficies les plus importantes au Québec (MAPAQ, 2020). L'irrigation du maïs-grain à différents stades de croissance permet de réduire les pertes causées par le stress hydrique. Les mêmes scénarios de pertes que ceux du fourrage sont appliqués au maïs-grain. Celle-ci a été une culture payante dans les dernières années puisque les rendements ont été élevés, tout comme les prix. La réflexion sur le bien-fondé de son irrigation est donc pertinente.

Le rendement retenu est le rendement de référence 2023 pour les zones collectives de la Capitale-Nationale et de Beauce de la FADQ. Ce dernier est de 7,4 tonnes par hectare à 14 % d'humidité. Le prix retenu est le prix de référence de la FADQ pour l'année 2023, il est de 241 \$/t.

Le Tableau 7 montre les valeurs de gain à l'irrigation et les coûts liés à l'irrigation. Puisque les valeurs principales (rendement et prix du maïs-grain) sont similaires aux fourrages, les résultats le sont aussi. Ainsi, il appert que dans le scénario de faibles pertes, il en coûte 43 295 \$ en irrigation pour sauver 5 372 \$ de maïs-grain. Conséquemment, une telle opération coûte plus cher que ce qu'elle rapporte, la marge annuelle est donc négative.

Tableau 7: Marges sur l'irrigation de 30 ha de maïs-grain.

Scénarios	Pertes faibles	Pertes moyennes	Pertes élevées	Référence (sans pertes)
Pourcentage de pertes annuelles de fourrage	10%	25%	50%	0%
Pertes (t/30ha)	22,3	55,7	111,5	-
Valeur du grain sauvé (\$) (A)	5 372	13 430	26 859	-
Coût d'opération (\$) (B)	14 806	22 209	29 612	-
Coût fixe annualisé (\$) (C)	28 489	28 656	28 822	28 156
Coût total annuel (\$) (D = B + C)	43 295	50 865	58 434	28 156
Marge annuelle pour irrigation du maïs-grain (\$) (A - D)	(37 923)	(37 435)	(31 575)	(28 156)

Par conséquent, il appert que tout comme pour les fourrages, l'utilisation du canon n'est pas rentable, peu importe le scénario de stress hydrique présenté.

Le Tableau 8 présente la table de sensibilité pour le scénario de faibles pertes hydriques. Même avec des rendements très élevés et un prix très élevé (100 % du prix de référence), l'irrigation demeure non rentable. En effet, il faudrait alors un prix de plus de 950 \$/t pour justifier l'utilisation du canon enrouleur.

Tableau 8: Table de sensibilité du système d'irrigation selon le prix du maïs-grain sur 30 ha.

Scénario: Pertes faibles	Rendement faible	Rendement de référence	Rendement élevé	Rendement très élevé
Rendements (t/ha)	6,00	7,43	11,19	14,95
Prix du maïs-grain				
217 \$/t (-10 %)	(39 389)	(38 458)	(36 010)	(33 562)
Prix conventionnel: 241 \$/t (0 %)	(38 957)	(37 923)	(35 205)	(32 486)
Prix de marché: 325 \$/t (35 %)	(37 445)	(36 051)	(32 385)	(28 719)
Prix bio: 362 \$/t (50 %)	(36 779)	(35 226)	(31 143)	(27 059)
422 \$/t (75 %)	(35 699)	(33 889)	(29 128)	(24 368)
482 \$/t (100 %)	(34 619)	(32 551)	(27 114)	(21 677)
Prix du maïs-grain pour une marge nulle (\$/t)	2 405	1 942	1 290	965

Dans le cas d'une perte moyenne (tableau 9), seul le scénario de rendement très élevé et de prix très élevé permet de justifier l'utilisation du canon enrouleur, qui se fait pratiquement à coût nul.

Tableau 9: Table de sensibilité pour des pertes moyennes (25%) pour le maïs-grain sur 30 ha.

Scénario: Pertes faibles	Rendement faible	Rendement de référence	Rendement élevé	Rendement très élevé
Rendements (t/ha)	6,00	7,43	11,19	14,95
Prix du maïs-grain				
217 \$/t (-10 %)	(41 100)	(38 772)	(32 653)	(26 533)
Prix conventionnel: 241 \$/t (0 %)	(40 020)	(37 435)	(30 639)	(23 842)
Prix de marché: 325 \$/t (35 %)	(36 240)	(32 754)	(23 589)	(14 424)
Prix bio: 362 \$/t (50 %)	(34 575)	(30 692)	(20 484)	(10 275)
422 \$/t (75 %)	(31 875)	(27 349)	(15 448)	(3 548)
482 \$/t (100 %)	(29 175)	(24 005)	(10 413)	3 180
Prix du maïs-grain pour une marge nulle (\$/t)	1 130	913	606	454

Dans le cas d'une perte élevée (tableau 10), il faut des rendements élevés ou très élevés et des prix élevés pour justifier l'utilisation du canon enrouleur.

Tableau 10: Table de sensibilité pour des pertes élevées (50%) pour le maïs-grain sur 30 ha.

Scénario: Pertes faibles	Rendement faible	Rendement de référence	Rendement élevé	Rendement très élevé
Rendements (t/ha)	6,00	7,43	11,19	14,95
Prix du maïs-grain				
217 \$/t (-10 %)	(38 904)	(34 249)	(22 011)	(9 772)
Prix conventionnel: 241 \$/t (0 %)	(36 744)	(31 575)	(17 982)	(4 390)
Prix de marché: 325 \$/t (35 %)	(29 184)	(22 213)	(3 883)	14 447
Prix bio: 362 \$/t (50 %)	(25 854)	(18 089)	2 328	22 744
422 \$/t (75 %)	(20 454)	(11 402)	12 399	36 199
482 \$/t (100 %)	(15 054)	(4 715)	22 470	49 654
Prix du maïs-grain pour une marge nulle (\$/t)	649	524	348	261

Ainsi, tout comme pour l'irrigation des fourrages, il semble peu intéressant d'irriguer le maïs-grain, puisque des scénarios de pertes, de rendement et de prix élevé sont peu probables de se reproduire de manière assez fréquente pour être économiquement intéressants.

IRRIGATION DU SOYA

Les mêmes scénarios de pertes que ceux du fourrage et du maïs-grain sont appliqués au soya. Le rendement retenu est le rendement de référence 2023 pour la Capitale-Nationale et la Beauce de la FADQ. Ce dernier est de 2,6 tonnes par hectare à 14 % d'humidité. Le prix retenu est le prix de référence de la FADQ pour l'année 2023, il est de 530 \$/t.

Le Tableau 11 montre les valeurs de gain à l'irrigation et les coûts liés à l'irrigation. Pour cette culture, les valeurs principales (rendement et prix du soya) sont peu similaires aux autres cultures. Les résultats le sont donc aussi. Ainsi, il appert que dans le scénario de faibles pertes, il en coûte 43 295 \$ en irrigation pour sauver 4 166 \$ de soya. Conséquemment, une telle opération coûte plus cher que ce qu'elle rapporte, la marge annuelle est donc négative.

Tableau 11: Marges sur l'irrigation de 30 ha de soya

Scénarios	Pertes faibles	Pertes moyennes	Pertes élevées	Référence (sans pertes)
Pourcentage de pertes annuelles de fourrage	10%	25%	50%	0%
Pertes (t/30ha)	7,9	19,7	39,3	-
Valeur du soya sauvé (\$) (A)	4 166	10 415	20 829	-
Coût d'opération (\$) (B)	14 806	22 209	29 612	-
Coût fixe annualisé (\$) (C)	28 489	28 656	28 822	28 156
Coût total annuel (\$) (D = B + C)	43 295	50 865	58 434	28 156
Marge annuelle pour irrigation du soya (\$) (A - D)	(39 129)	(40 450)	(37 605)	(28 156)

Ce constat est similaire aux autres cultures, quoique les marges sont plus faibles. C'est dans la table de sensibilité pour le scénario de perte élevée que cette différence est la plus notable (tableau 14).

Le Tableau 12 présente la table de sensibilité pour le scénario de faibles pertes hydriques. Même avec des rendements très élevés et un prix très élevé (85 % du prix de référence), l'irrigation demeure non rentable. En effet, il faudrait alors un prix de plus de 9 620 \$/t pour justifier l'utilisation du canon enrouleur.

Tableau 12: Table de sensibilité pour de faibles pertes (10%) pour le soya sur 30 ha.

Scénario: Pertes faibles	Rendement faible	Rendement de référence	Rendement élevé	Rendement très élevé
Rendements (t/ha)	1,50	2,62	3,59	4,56
Prix du soya				
477 \$/t (-10 %)	(41 148)	(39 546)	(38 158)	(36 770)
Prix conventionnel: 530 \$/t (0 %)	(40 910)	(39 129)	(37 587)	(36 045)
Prix IP: 636 \$/t (20 %)	(40 433)	(38 296)	(36 445)	(34 594)
Prix de marché: 670 \$/t (26 %)	(40 280)	(38 029)	(36 079)	(34 129)
Prix bio: 795 \$/t (50 %)	(39 717)	(37 046)	(34 733)	(32 419)
Prix de marché bio: 980 \$/t (85 %)	(38 885)	(35 592)	(32 740)	(29 889)
Prix du soya pour une marge nulle (\$/t)	9 621	5 508	4 020	3 165

Dans le cas d'une perte moyenne (tableau 13), l'utilisation du canon demeure non rentable et ce peu importe le rendement et le prix.

Tableau 13: Table de sensibilité pour des pertes moyennes (25%) pour le soya sur 30 ha.

Scénario : Pertes faibles	Rendement faible	Rendement de référence	Rendement élevé	Rendement très élevé
Rendements (t/ha)	1,50	2,62	3,59	4,56
Prix du soya				
477 \$/t (-10 %)	(45 498)	(41 491)	(38 021)	(34 551)
Prix conventionnel: 530 \$/t (0 %)	(44 902)	(40 450)	(36 594)	(32 739)
Prix IP: 636 \$/t (20 %)	(43 710)	(38 367)	(33 740)	(29 113)
Prix de marché: 670 \$/t (26 %)	(43 327)	(37 699)	(32 825)	(27 951)
Prix bio: 795 \$/t (50 %)	(41 921)	(35 243)	(29 459)	(23 676)
Prix de marché bio: 980 \$/t (85 %)	(39 840)	(31 608)	(24 478)	(17 349)
Prix du soya pour une marge nulle (\$/t)	4 521	2 589	1 889	1 487

Finalement, avec une perte élevée, seul le scénario de rendement très élevé et de prix très élevé (marché bio) permet de justifier l'utilisation du canon enrouleur.

Tableau 14: Table de sensibilité pour des pertes élevées (50%) pour le soya sur 30 ha.

Scénario: Pertes faibles	Rendement faible	Rendement de référence	Rendement élevé	Rendement très élevé
Rendements (t/ha)	1,50	2,62	3,59	4,56
Prix du soya				
477 \$/t (-10 %)	(47 702)	(39 688)	(32 748)	(25 807)
Prix conventionnel: 530 \$/t (0 %)	(46 509)	(37 605)	(29 894)	(22 182)
Prix IP: 636 \$/t (20 %)	(44 124)	(33 439)	(24 185)	(14 932)
Prix de marché: 670 \$/t (26 %)	(43 359)	(32 103)	(22 355)	(12 606)
Prix bio: 795 \$/t (50 %)	(40 547)	(27 191)	(15 623)	(4 056)
Prix de marché bio: 980 \$/t (85 %)	(36 384)	(19 920)	(5 661)	8 598
Prix du soya pour une marge nulle (\$/t)	2 597	1 487	1 085	854

Ainsi, tout comme pour les autres cultures, les conditions nécessaires à la rentabilité de l'utilisation du canon ont peu de chance de se reproduire de manière assez fréquentes pour être économiquement viables.

DISCUSSION

Les conditions étudiées dans les scénarios ne permettent généralement pas d'obtenir un gain économique à irriguer ces cultures avec un canon enrouleur. Lorsqu'il est intéressant, ce sont lorsque les rendements, les prix et les pertes sont élevés, soit des situations qui ont peu de chance de se produire assez souvent pour rentabiliser l'équipement.

Le Tableau 15 permet de comparer les marges des budgets partiels entre les cultures. La marge la plus élevée par scénario de perte est en gras. C'est la culture des fourrages qui présente les marges les plus faibles puisqu'une considération de l'effet de rareté sur les prix est intégrée, ce qui n'est pas le cas du maïs-grain et du soya. En effet, le prix des grains et oléagineux sont moins affectés par les effets locaux puisqu'ils fluctuent principalement selon les conditions de marchés mondiaux.

Tableau 15: Comparaison des marges d'irrigation entre les cultures sur 30 ha.

Scénarios de pertes hydriques Pourcentage de pertes annuelles	Pertes faibles 10%	Pertes moyennes 25%	Pertes élevées 50%	Référence (sans pertes) 0%
Irrigation des fourrages (\$)	(37 709)	(34 107)	(16 539)	
Irrigation du maïs-grain (\$)	(37 923)	(37 435)	(31 575)	(28 156)
Irrigation du soya (\$)	(39 129)	(40 450)	(37 605)	

Le CECPA tient à souligner que l'analyse est basée sur plusieurs hypothèses, tant sur les besoins en irrigation, d'accès à l'eau, de rendement et de prix. Les impacts indirects ne sont pas intégrés dans l'analyse afin de faciliter la compréhension et l'analyse. Toutefois, ceux-ci ne doivent pas être sous-estimés. Au niveau agronomique, une mortalité importante dans une prairie peut affecter le rendement des années subséquentes et la sécheresse du sol peut affecter sa fertilité. Au niveau économique, les pertes de rendement peuvent être suffisamment importantes pour justifier l'abandon de la culture, causant des pertes plus importantes que celles modélisées.

RÉFÉRENCES

- Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec. (2022). *Machinerie - Coûts d'utilisation et taux à forfait suggéré*. AGDEX 740/825a.
- Financière agricole du Québec. (2023). *Assurance récolte - Statistiques annuelles 2023*. (<https://www.fada.qc.ca/statistiques/assurance-recolte/statistiques-annuelles>)
- Financière agricole du Québec. (2023). *Assurance récolte prix unitaires 2023*. (<https://www.fada.qc.ca/statistiques/assurance-recolte/prix-unitaires>)
- Financière agricole du Québec. (2023). *Rendements de référence 2023*. (<https://www.fada.qc.ca/statistiques/assurance-recolte/rendements-de-reference>)
- Ministère de l'Agriculture de l'alimentation et des pêcheries du Québec, 2020. *Portrait-diagnostic sectoriel de l'industrie des grains au Québec*. (<https://www.mapaa.gouv.qc.ca/fr/Publications/Monographiegrain.pdf>)



CECPA

CENTRE D'ÉTUDES SUR LES COÛTS
DE PRODUCTION EN AGRICULTURE

225, rue Monfort, bureau 300 | Lévis (Québec) | G6W 3L8

T : 418 833-2515 | F : 418 933-9125 | www.cecpa.qc.ca

11.4 Résultats analyses qualité sites plantes fourragères (2021)

Année	Site	Date de récolte ¹	Paramètre ²	Traitement	
				Irrigué	Non irrigué
2021	Saint-Germain1	5 juillet	CH - Matière sèche (%)	17,4	24,3
			CH - Humidité (%)	82,6	75,7
			INF - ENL (Mcal/kg)	1,6	1,47
			INF - ENE (Mcal/kg)	1,64	1,48
			INF - ENG (Mcal/kg)	1,03	0,89
			INF - UNT 1x (NRC 2001) (%)	65	60
			CH - Protéine brute (%)	18,9	14,3
			CH - Fibre détergent acide ADF (%)	25	29,7
			INF - Fibre détergent neutre NDF (estimé) (%)	41,5	47
			CH - Calcium total (%)	0,67	0,28
			CH - Phosphore total (%)	0,45	0,39
			CH - Magnésium total (%)	0,24	0,16
			CH - Potassium total (%)	2,64	1,99
			INF - VRF	156	130
			Saint-Pascal	26 juillet	CH - Matière sèche (%)
	CH - Humidité (%)	80,3			
	INF - ENL (Mcal/kg)	1,3			
	INF - ENE (Mcal/kg)	1,25			
	INF - ENG (Mcal/kg)	0,68			
	INF - UNT 1x (NRC 2001) (%)	53			
	CH - Protéine brute (%)	20,1			
	CH - Fibre détergent acide ADF (%)	35,8			
	INF - Fibre détergent neutre NDF (estimé) (%)	54,1			
	CH - Calcium total (%)	1,4			
	CH - Phosphore total (%)	0,36			
	CH - Magnésium total (%)	0,3			
CH - Potassium total (%)	2,24				
INF - VRF	105				

11.5 Résultats analyses qualité sites plantes fourragères (2022)

Année	Site	Date de récolte ¹	Paramètre ²	Traitement	
				Irrigué	Non irrigué
2022	Saint-Germain1	17 juin	CH - Matière sèche (%)	21	15,6
			CH - Humidité (%)	79	84,4
			INF - ENL (Mcal/kg)	-	-
			INF - ENE (Mcal/kg)	-	-
			INF - ENG (Mcal/kg)	-	-
			INF - UNT 1x (NRC 2001) (%)	-	-
			CH - Protéine brute (%)	13,6	20,5
			CH - Fibre détergent acide ADF (%)	35,6	31
			INF - Fibre détergent neutre NDF (estimé) (%)	-	-
			CH - Calcium total (%)	0,49	0,81
			CH - Phosphore total (%)	0,31	0,4
			CH - Magnésium total (%)	0,14	0,26
		CH - Potassium total (%)	2,91	3,39	
		INF - VRF	-	-	
		CH - Matière sèche (%)	16	19,9	
		CH - Humidité (%)	84	80,1	
		INF - ENL (Mcal/kg)	-	-	
		INF - ENE (Mcal/kg)	-	-	
		INF - ENG (Mcal/kg)	-	-	
		INF - UNT 1x (NRC 2001) (%)	-	-	
		CH - Protéine brute (%)	21,7	19,5	
		CH - Fibre détergent acide ADF (%)	28,9	30,6	
		INF - Fibre détergent neutre NDF (estimé) (%)	-	-	
		CH - Calcium total (%)	1,45	1,36	
		CH - Phosphore total (%)	0,53	0,4	
		CH - Magnésium total (%)	0,35	0,29	
		CH - Potassium total (%)	3,33	3,16	
		INF - VRF	-	-	
		CH - Matière sèche (%)	18,8	41,1	
		CH - Humidité (%)	81,2	58,9	
		INF - ENL (Mcal/kg)	1,42	1,37	
		INF - ENE (Mcal/kg)	1,41	1,35	
		INF - ENG (Mcal/kg)	0,83	0,77	
		INF - UNT 1x (NRC 2001) (%)	58	56	
		CH - Protéine brute (%)	19,6	16,1	
		CH - Fibre détergent acide ADF (%)	31,6	33,3	
INF - Fibre détergent neutre NDF (estimé) (%)	49,1	51,1			
CH - Calcium total (%)	1,25	1,18			
CH - Phosphore total (%)	0,5	0,33			
CH - Magnésium total (%)	0,3	0,26			

		CH - Potassium total (%)	3,03	2,7
		INF - VRF	122	115
		CH - Matière sèche (%)	16,8	16,5
		CH - Humidité (%)	83,2	83,5
		INF - ENL (Mcal/kg)	-	-
		INF - ENE (Mcal/kg)	-	-
		INF - ENG (Mcal/kg)	-	-
		INF - UNT 1x (NRC 2001) (%)	-	-
	17 juin	CH - Protéine brute (%)	21,4	23
		CH - Fibre détergent acide ADF (%)	25	24,3
		INF - Fibre détergent neutre NDF (estimé) (%)	-	-
		CH - Calcium total (%)	0,87	1,08
		CH - Phosphore total (%)	0,32	0,34
		CH - Magnésium total (%)	0,27	0,28
		CH - Potassium total (%)	2,82	2,9
		INF - VRF	-	-
Saint-Germain2		CH - Matière sèche (%)	15	18
		CH - Humidité (%)	85	82
		INF - ENL (Mcal/kg)	-	-
		INF - ENE (Mcal/kg)	-	-
		INF - ENG (Mcal/kg)	-	-
		INF - UNT 1x (NRC 2001) (%)	-	-
	4 août	CH - Protéine brute (%)	22,5	17,7
		CH - Fibre détergent acide ADF (%)	22,4	29,4
		INF - Fibre détergent neutre NDF (estimé) (%)	-	-
		CH - Calcium total (%)	1,23	1,1
		CH - Phosphore total (%)	0,31	0,28
		CH - Magnésium total (%)	0,37	0,27
		CH - Potassium total (%)	2,84	2,76
		INF - VRF	-	-

11.6 Résultats analyses qualité sites plantes fourragères (2023)

Année	Site	Date de récolte ¹	Paramètre ²	Traitement	
				Irrigué	Non irrigué
2023	Saint-Germain1	14 juin	CH - Matière sèche (%)	19,6	18,4
			CH - Humidité (%)	80,4	81,6
			INF - ENL (Mcal/kg)	1,48	1,43
			INF - ENE (Mcal/kg)	1,19	1,43
			INF - ENG (Mcal/kg)	0,9	0,84
			INF - UNT 1x (NRC 2001) (%)	60	58
			CH - Protéine brute (%)	15,5	14,1
			CH - Fibre détergent acide ADF (%)	29,3	31,1
			INF - Fibre détergent neutre NDF (estimé) (%)	46,5	48,6
			CH - Calcium total (%)	0,44	0,71
			CH - Phosphore total (%)	0,31	0,3
			CH - Magnésium total (%)	0,14	0,2
			CH - Potassium total (%)	2,35	2,42
			INF - VRF	132	124
		CH - Matière sèche (%)	21	24,2	
		CH - Humidité (%)	79	75,8	
		INF - ENL (Mcal/kg)	1,45	1,33	
		INF - ENE (Mcal/kg)	1,45	1,3	
		INF - ENG (Mcal/kg)	0,86	0,72	
		INF - UNT 1x (NRC 2001) (%)	59	54	
		CH - Protéine brute (%)	17,5	16,3	
	CH - Fibre détergent acide ADF (%)	30,6	34,6		
	INF - Fibre détergent neutre NDF (estimé) (%)	48	52,6		
	CH - Calcium total (%)	1,1	1,13		
	CH - Phosphore total (%)	0,4	0,43		
	CH - Magnésium total (%)	0,28	0,24		
	CH - Potassium total (%)	3,13	2,69		
	INF - VRF	126	110		
	CH - Matière sèche (%)	22,3	19,2		
	CH - Humidité (%)	77,7	80,8		
	INF - ENL (Mcal/kg)	1,54	1,47		
	INF - ENE (Mcal/kg)	1,57	1,48		
	INF - ENG (Mcal/kg)	0,97	0,89		
	INF - UNT 1x (NRC 2001) (%)	63	60		
	CH - Protéine brute (%)	21,9	21,3		
	CH - Fibre détergent acide ADF (%)	27,2	29,7		
	INF - Fibre détergent neutre NDF (estimé) (%)	44	47		
	CH - Calcium total (%)	1,52	1,07		
	CH - Phosphore total (%)	0,39	0,37		
	CH - Magnésium total (%)	0,33	0,27		
	CH - Potassium total (%)	2,81	3,67		
	INF - VRF	143	130		
Saint-Germain2	14 juin	CH - Matière sèche (%)	20,1	20,6	
		CH - Humidité (%)	79,9	79,4	

	INF - ENL (Mcal/kg)	1,43	1,6	
	INF - ENE (Mcal/kg)	1,43	1,64	
	INF - ENG (Mcal/kg)	0,84	1,03	
	INF - UNT 1x (NRC 2001) (%)	58	66	
	CH - Protéine brute (%)	13,5	15,5	
	CH - Fibre détergent acide ADF (%)	31,1	24,3	
	INF - Fibre détergent neutre NDF (estimé) (%)	48,6	40,6	
	CH - Calcium total (%)	0,65	1,22	
	CH - Phosphore total (%)	0,21	0,18	
	CH - Magnésium total (%)	0,21	0,28	
	CH - Potassium total (%)	2,52	2,49	
	INF - VRF	124	161	
	CH - Matière sèche (%)	17,3	21,2	
	CH - Humidité (%)	82,7	78,8	
25 juillet	INF - ENL (Mcal/kg)	1,5	1,6	
	INF - ENE (Mcal/kg)	1,52	1,64	
	INF - ENG (Mcal/kg)	0,93	1,03	
	INF - UNT 1x (NRC 2001) (%)	61	66	
	CH - Protéine brute (%)	18,2	19,5	
	CH - Fibre détergent acide ADF (%)	28,6	24,8	
	INF - Fibre détergent neutre NDF (estimé) (%)	45,6	41,2	
	CH - Calcium total (%)	1,25	1,86	
	CH - Phosphore total (%)	0,26	0,24	
	CH - Magnésium total (%)	0,4	0,38	
	CH - Potassium total (%)	2,89	2,43	
	INF - VRF	136	157	
		CH - Matière sèche (%)	20,4	20
		CH - Humidité (%)	79,6	80
12 septembre	INF - ENL (Mcal/kg)	1,51	1,43	
	INF - ENE (Mcal/kg)	1,53	1,43	
	INF - ENG (Mcal/kg)	0,93	0,85	
	INF - UNT 1x (NRC 2001) (%)	62	58	
	CH - Protéine brute (%)	20,1	17,6	
	CH - Fibre détergent acide ADF (%)	28,3	31	
	INF - Fibre détergent neutre NDF (estimé) (%)	45,3	48,4	
	CH - Calcium total (%)	1,04	0,85	
	CH - Phosphore total (%)	0,25	0,23	
	CH - Magnésium total (%)	0,28	0,25	
	CH - Potassium total (%)	2,77	3,02	
INF - VRF	137	124		

¹ Données absentes pour le site Saint-Pascal le 14 juin et le site Saint-Germain1 le 16 août

² INF : analyse par infrarouge, CH : analyse chimique.

11.7 Cartes relatives à l'estimation de la disponibilité de l'eau de surface, des eaux souterraines et de la disponibilité totale.

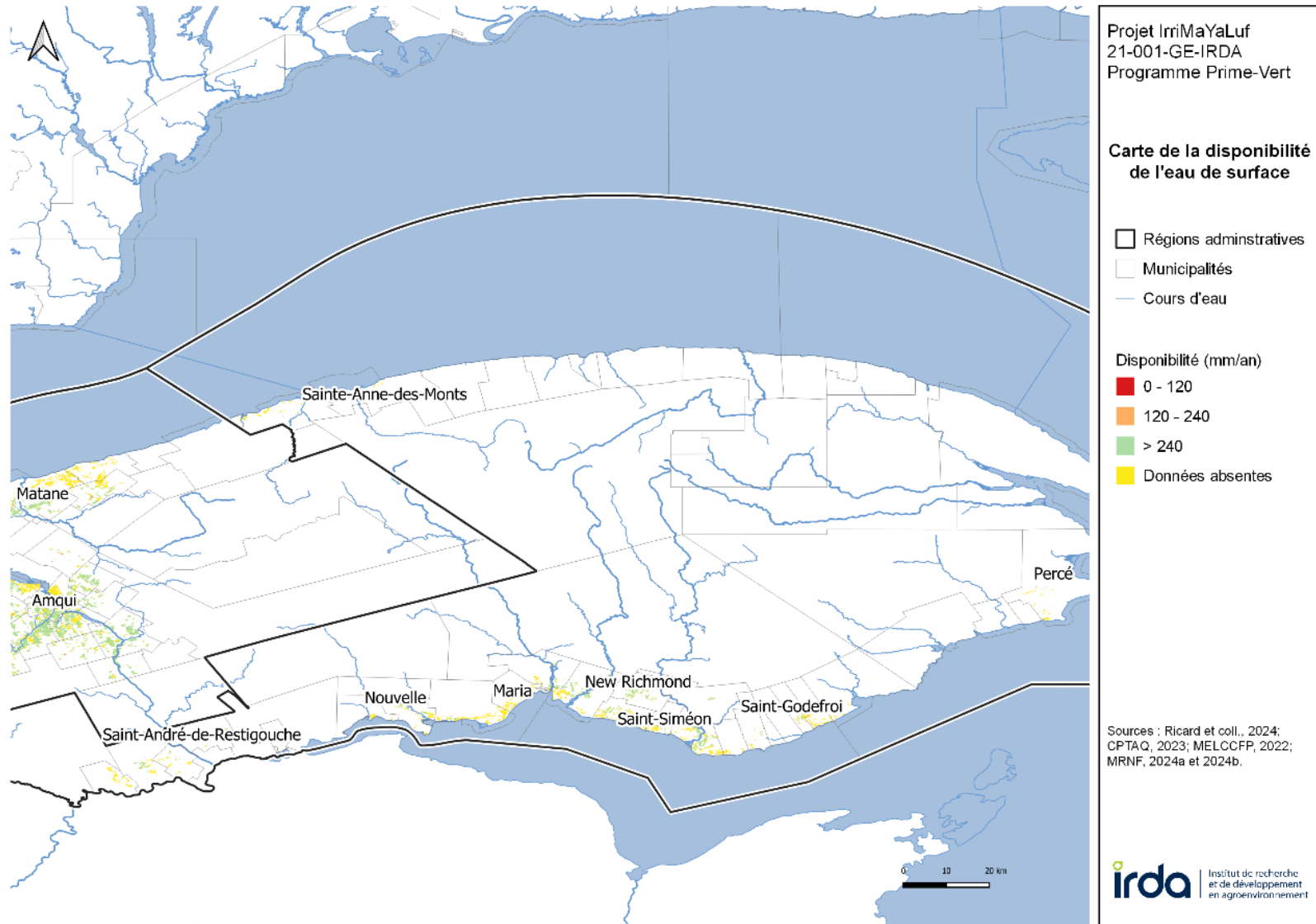


Figure 86. Disponibilité de l'eau de surface – Gaspésie.

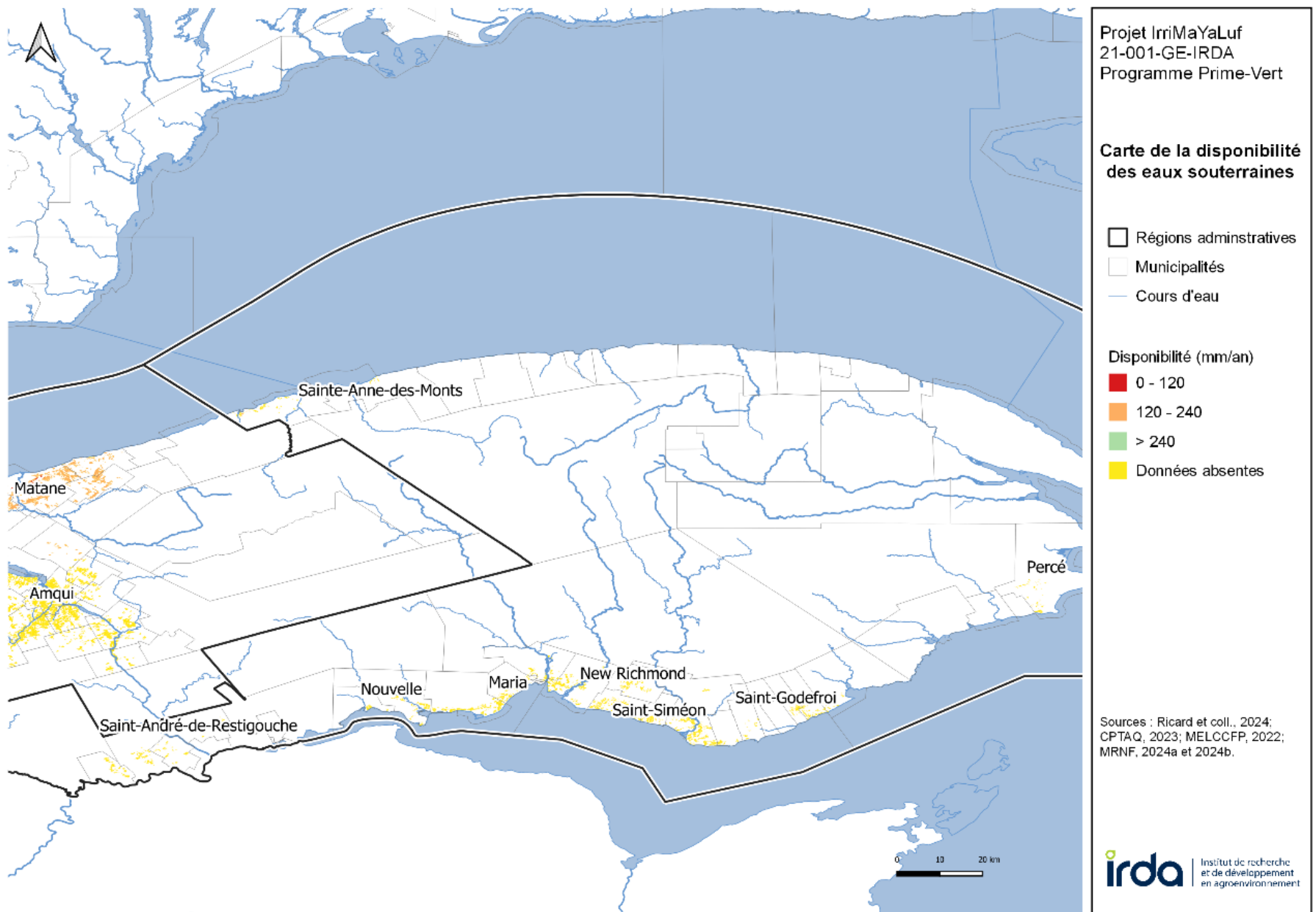


Figure 87. Disponibilité des eaux souterraines – Gaspésie.

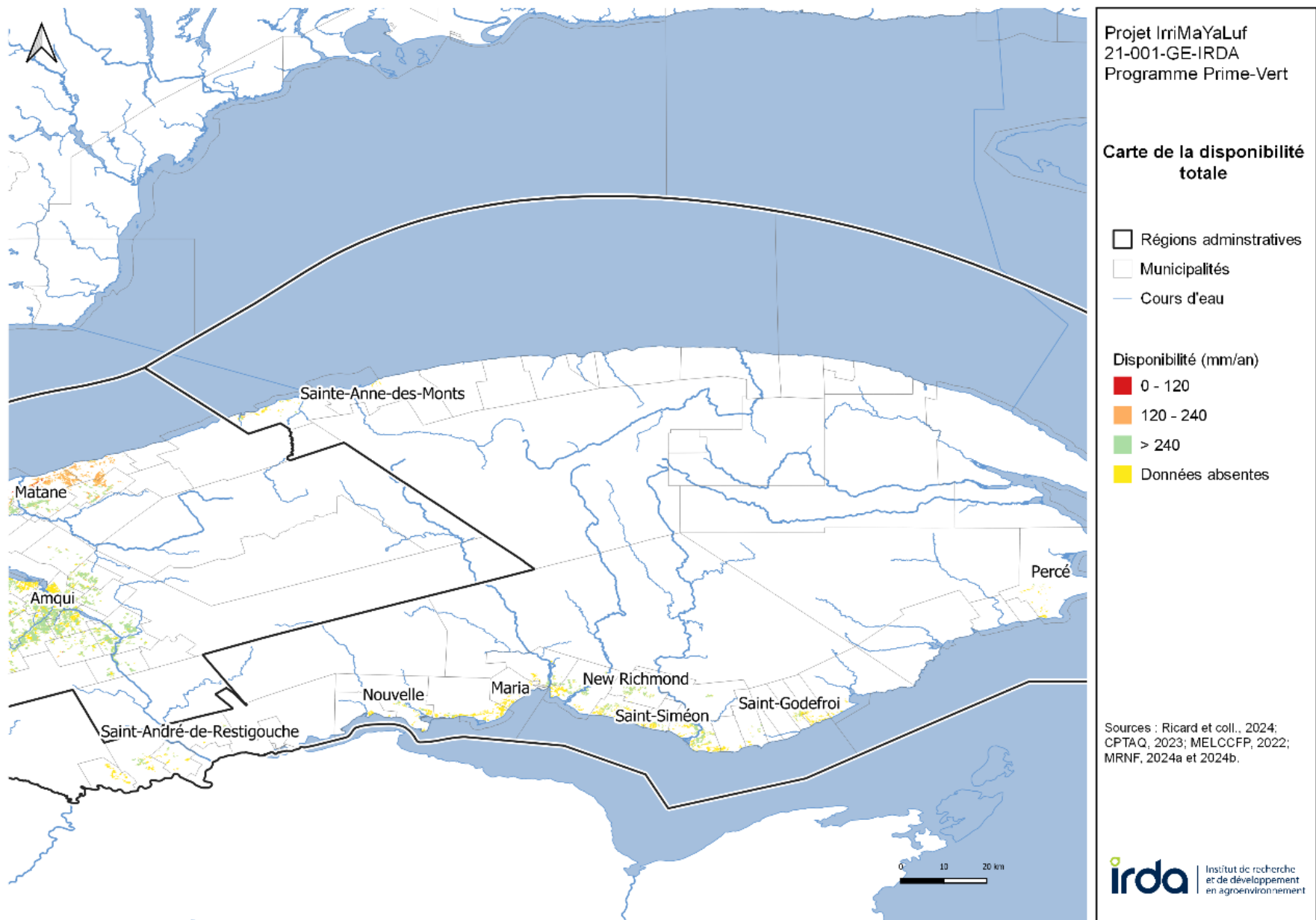


Figure 88. Disponibilité totale – Gaspésie.

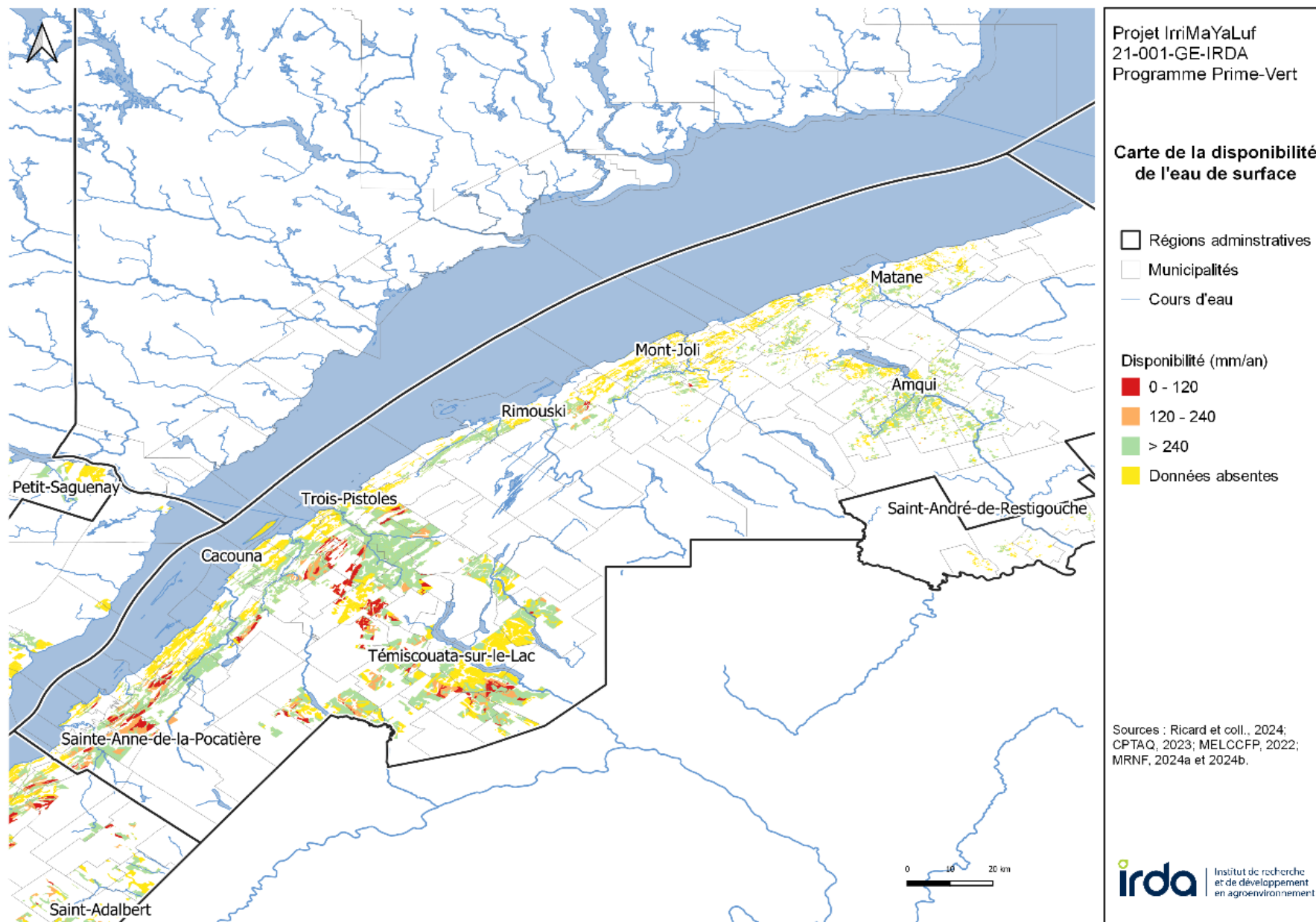


Figure 89. Disponibilité de l'eau de surface – Bas-Saint-Laurent.

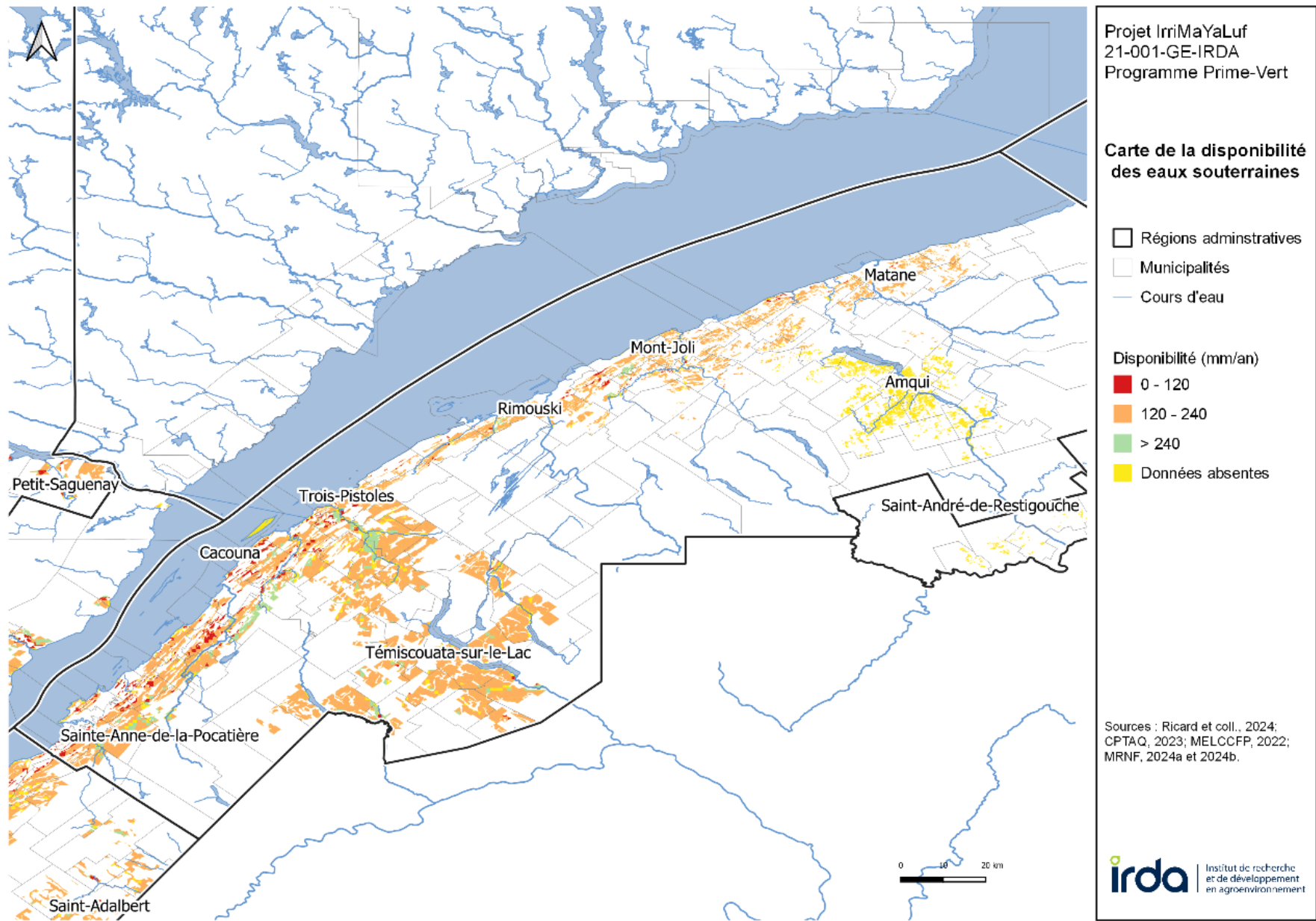


Figure 90. Disponibilité des eaux souterraines – Bas-Saint-Laurent.

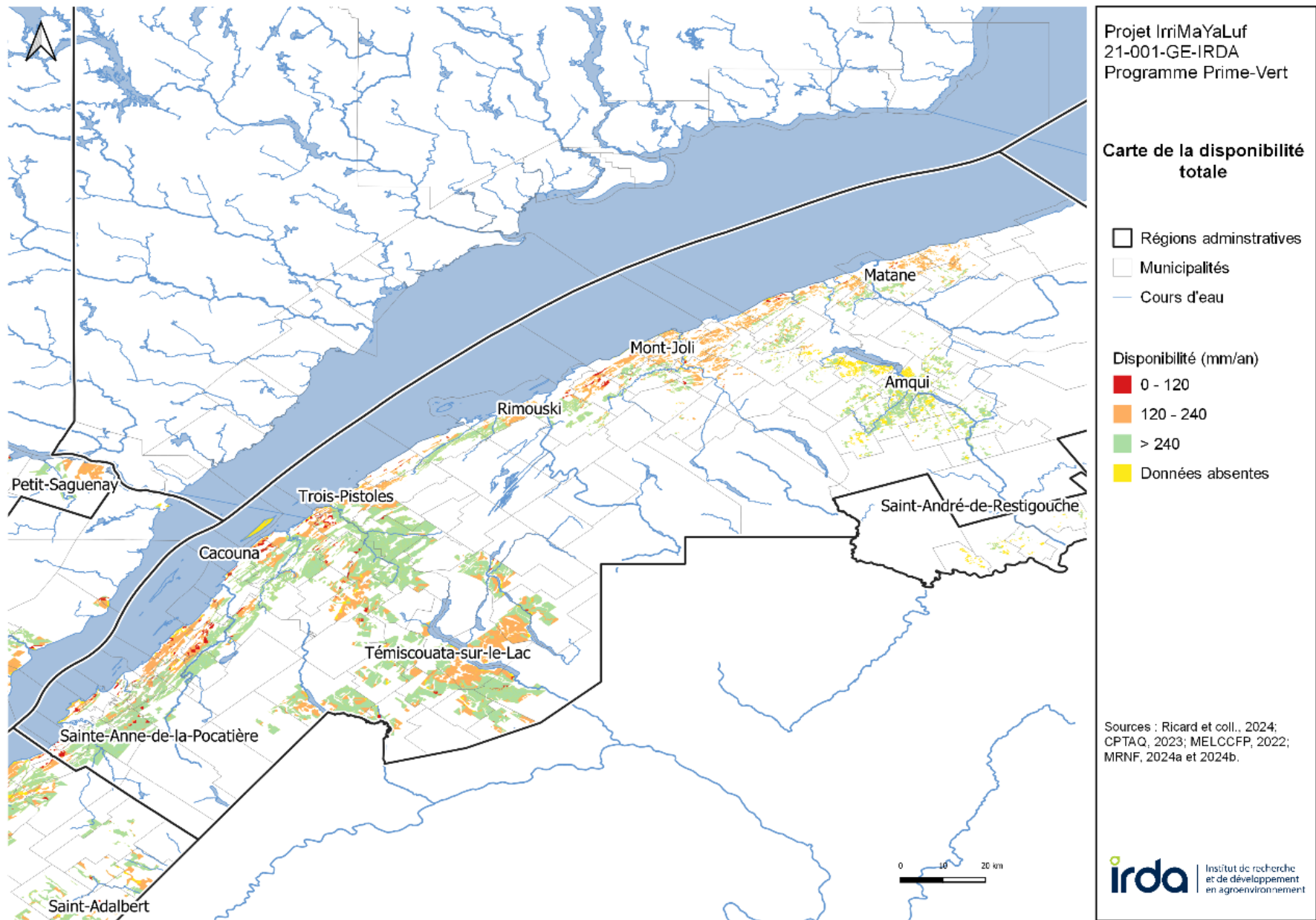


Figure 91. Disponibilité totale – Bas-Saint-Laurent.

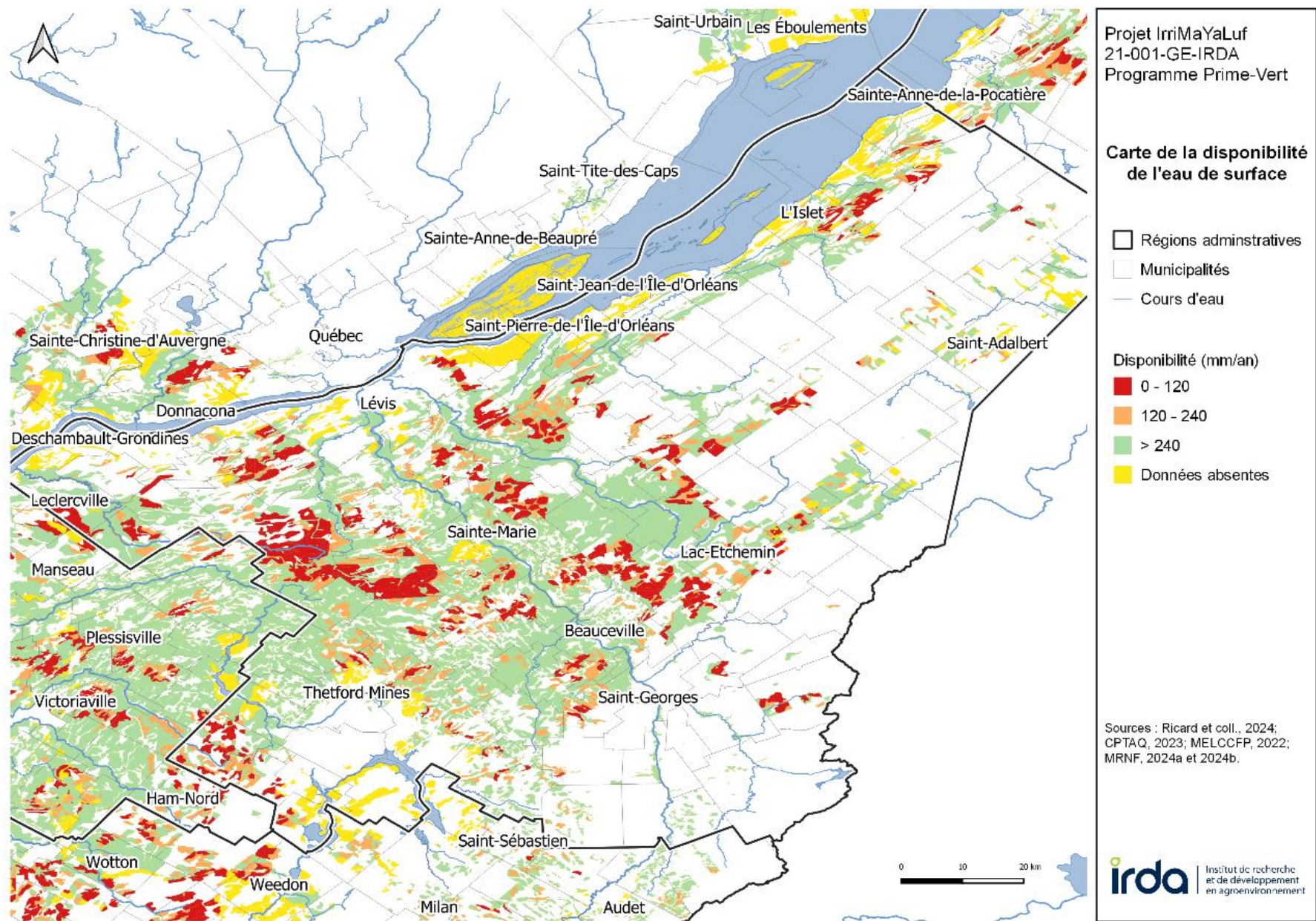


Figure 92. Disponibilité de l'eau de surface – Chaudière-Appalaches.

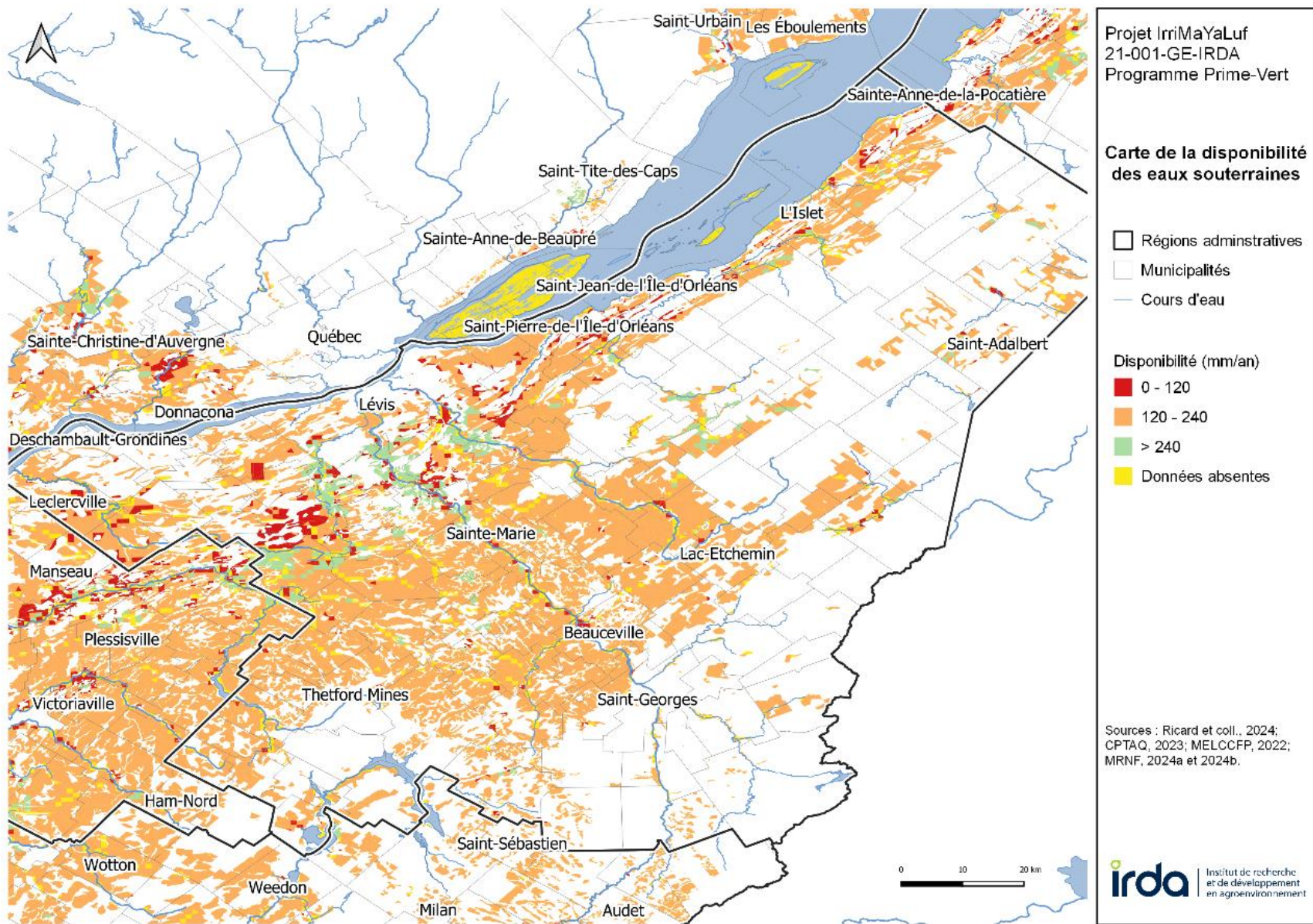


Figure 93. Disponibilité des eaux souterraines – Chaudière-Appalaches.

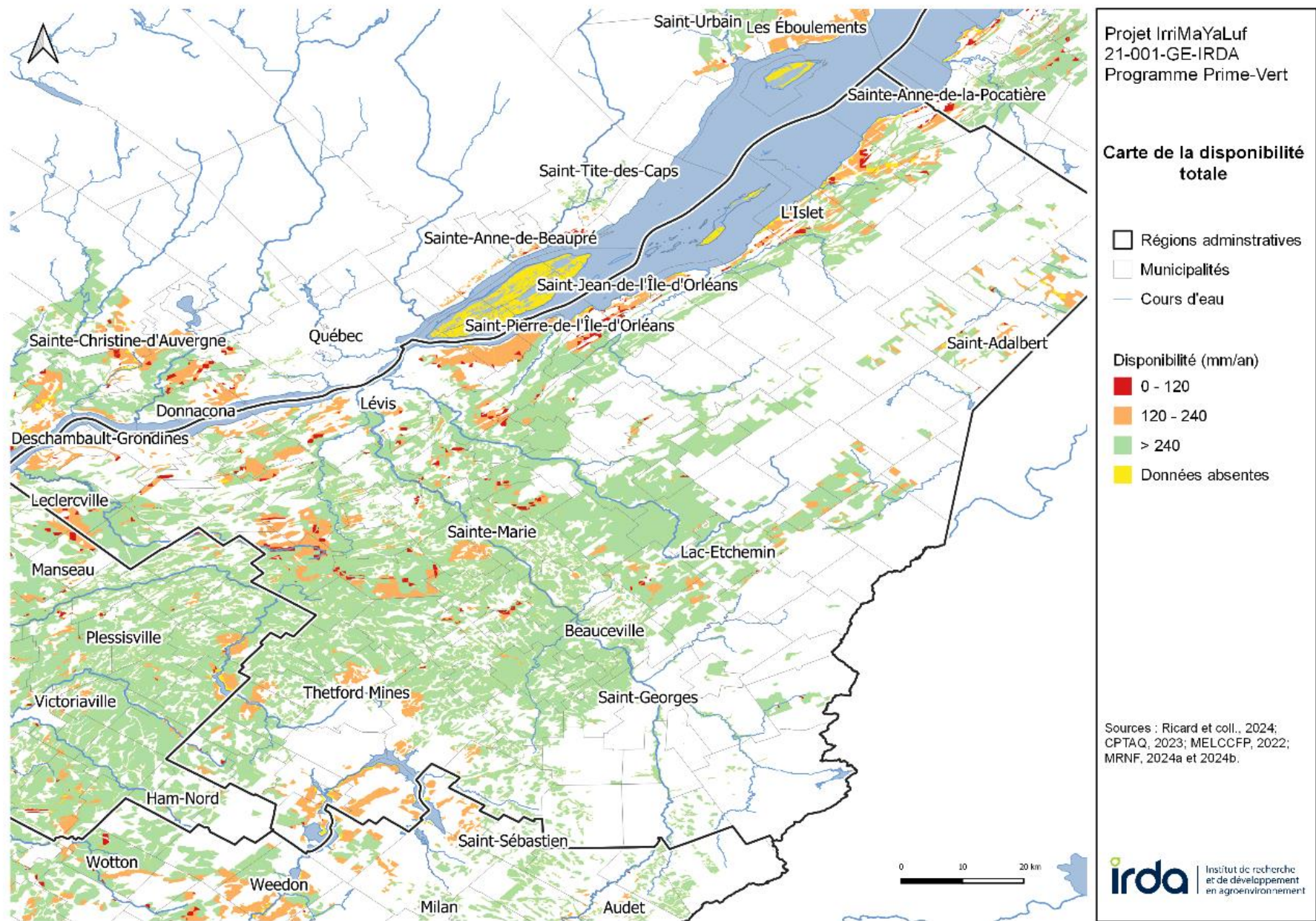


Figure 94. Disponibilité totale – Chaudière-Appalaches.

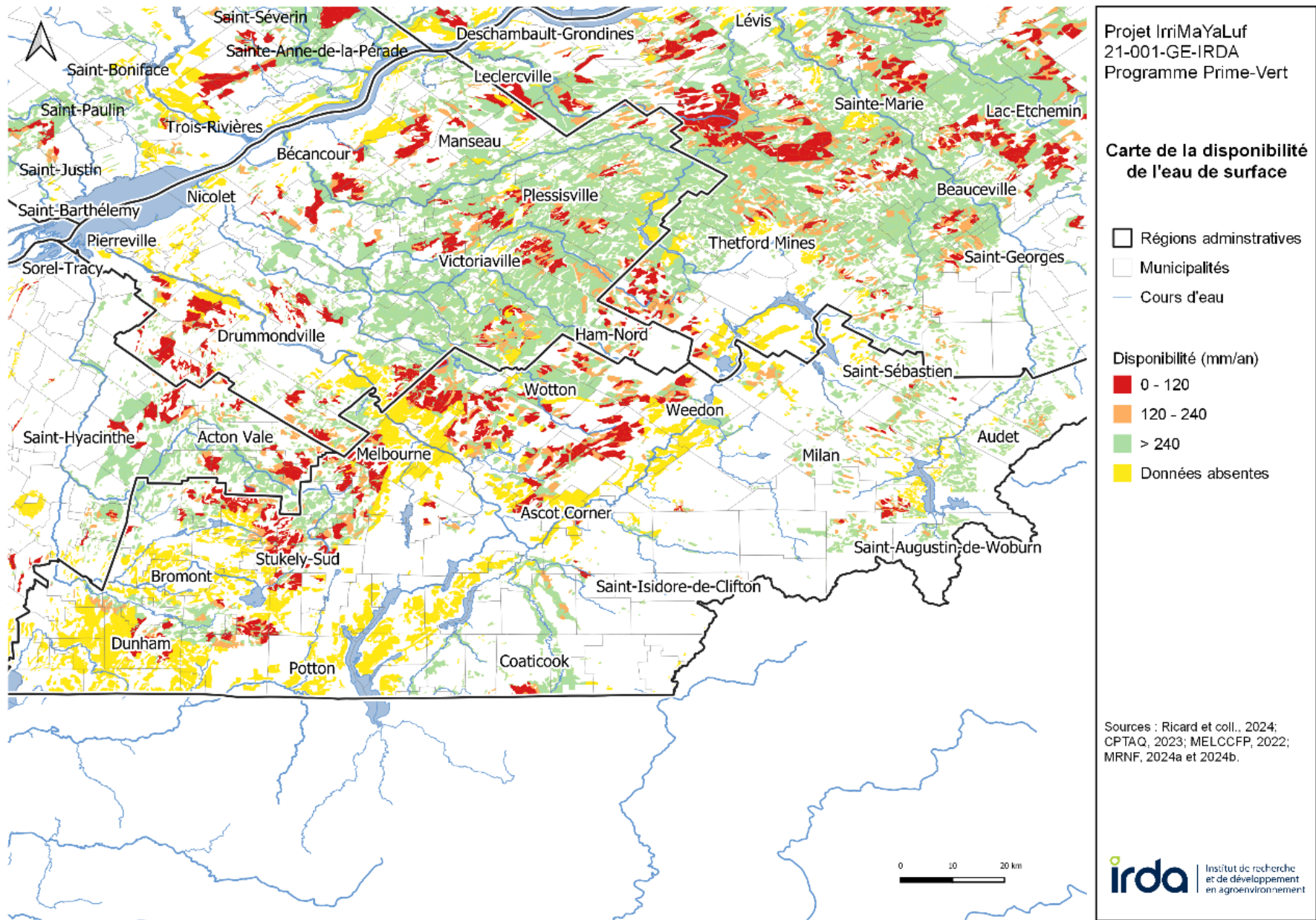


Figure 95. Disponibilité de l'eau de surface – Estrie.

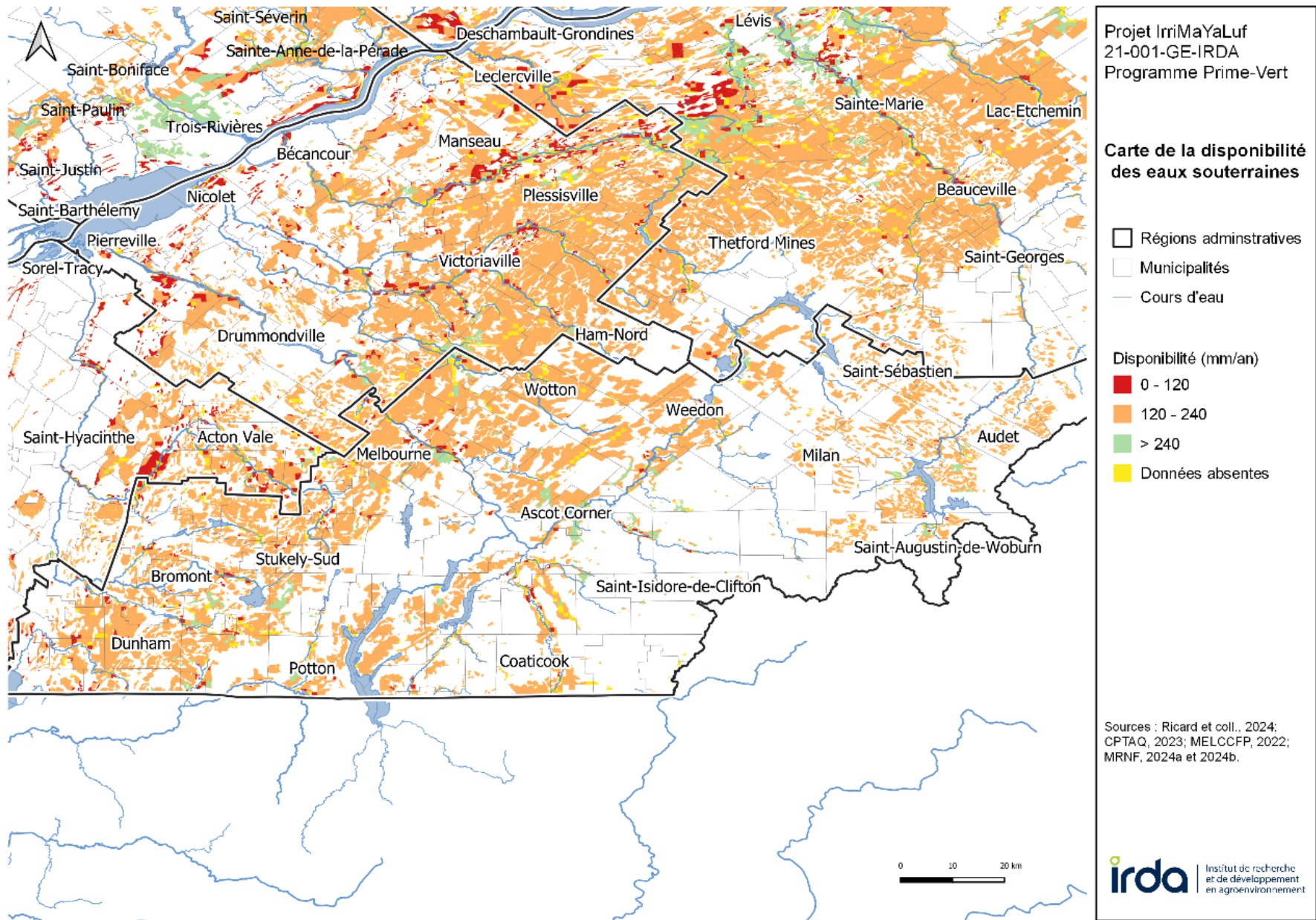


Figure 96. Disponibilité des eaux souterraines – Estrie.

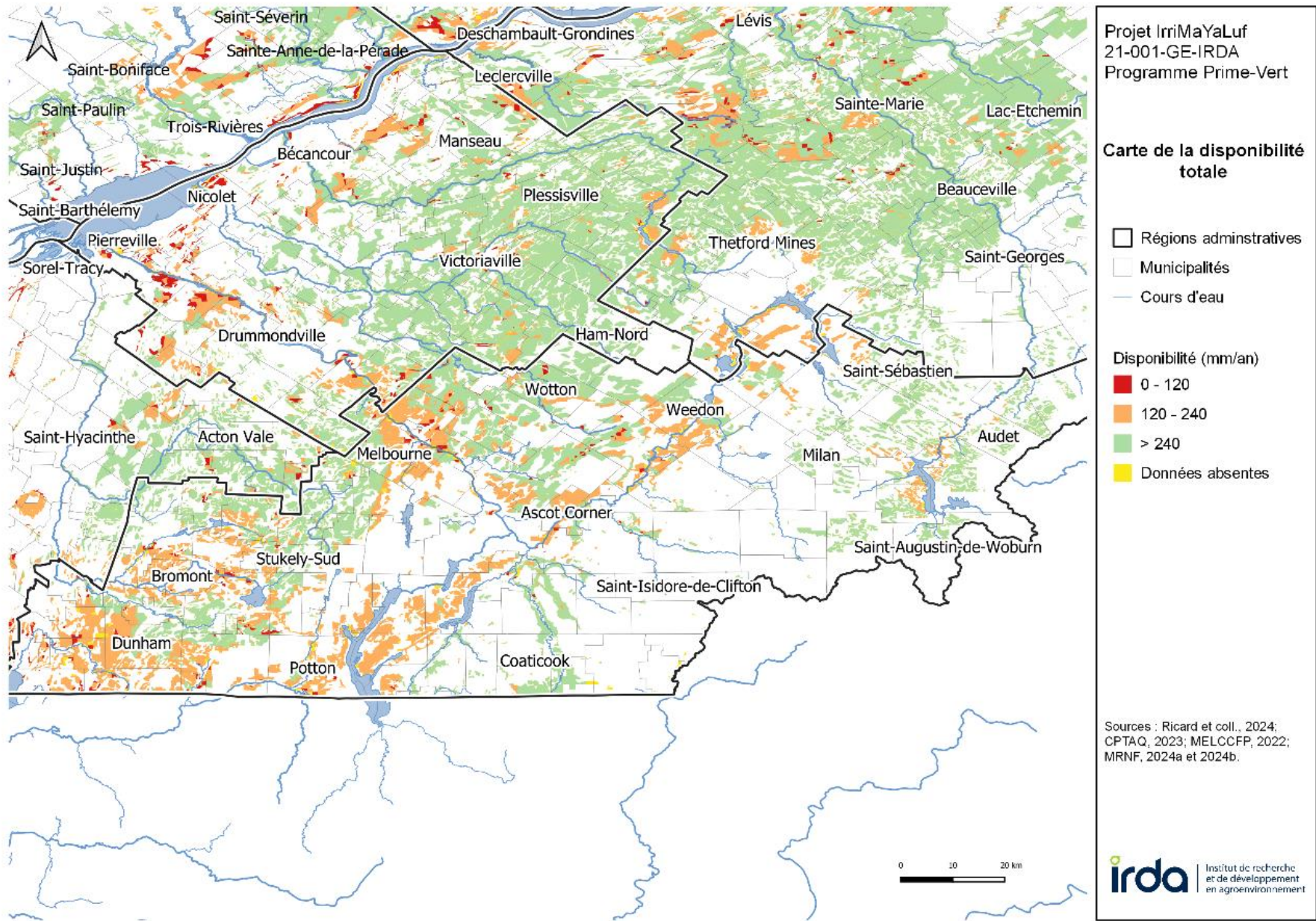


Figure 97. Disponibilité totale – Estrie.

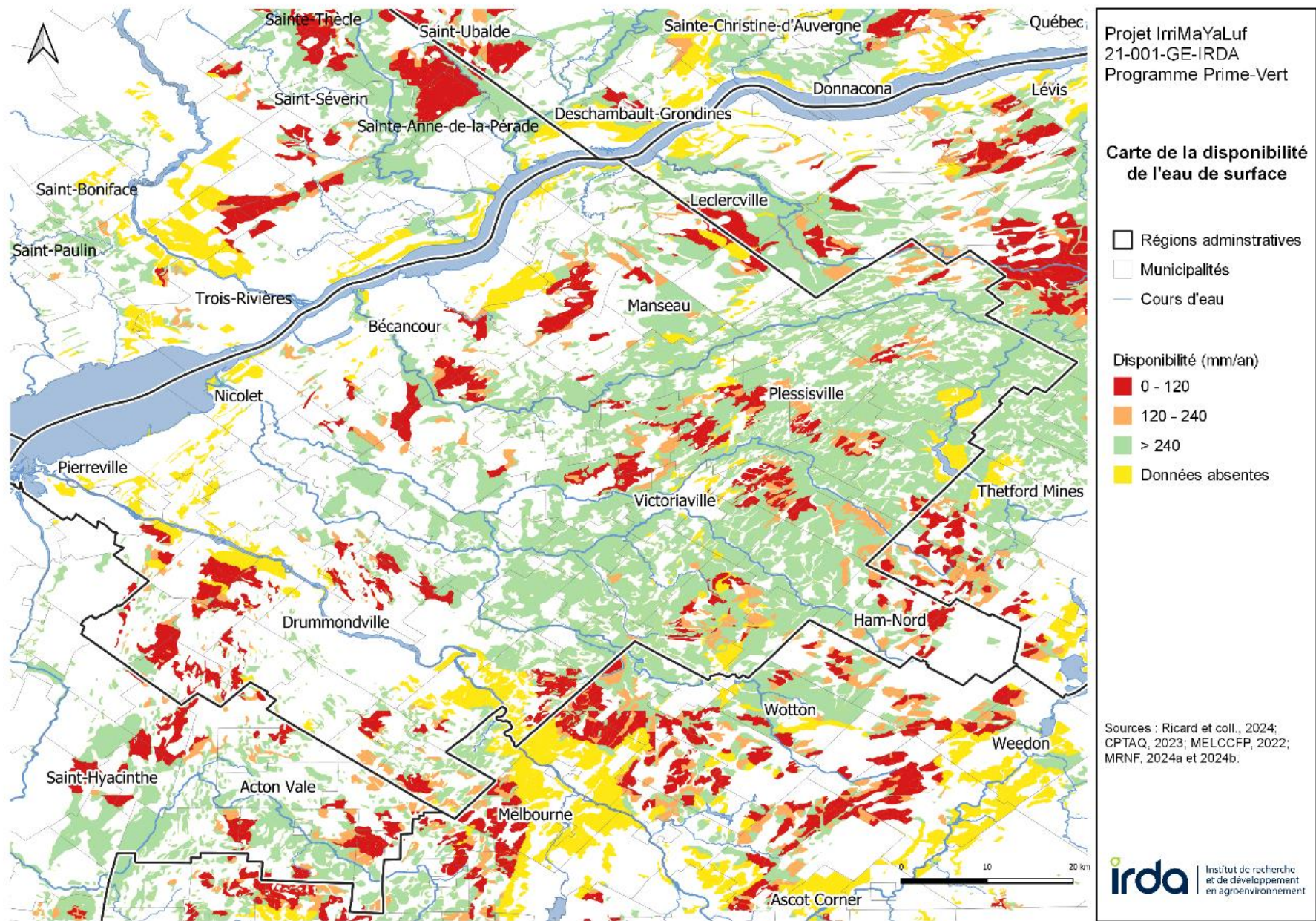


Figure 98. Disponibilité de l'eau de surface – Centre-du-Québec.

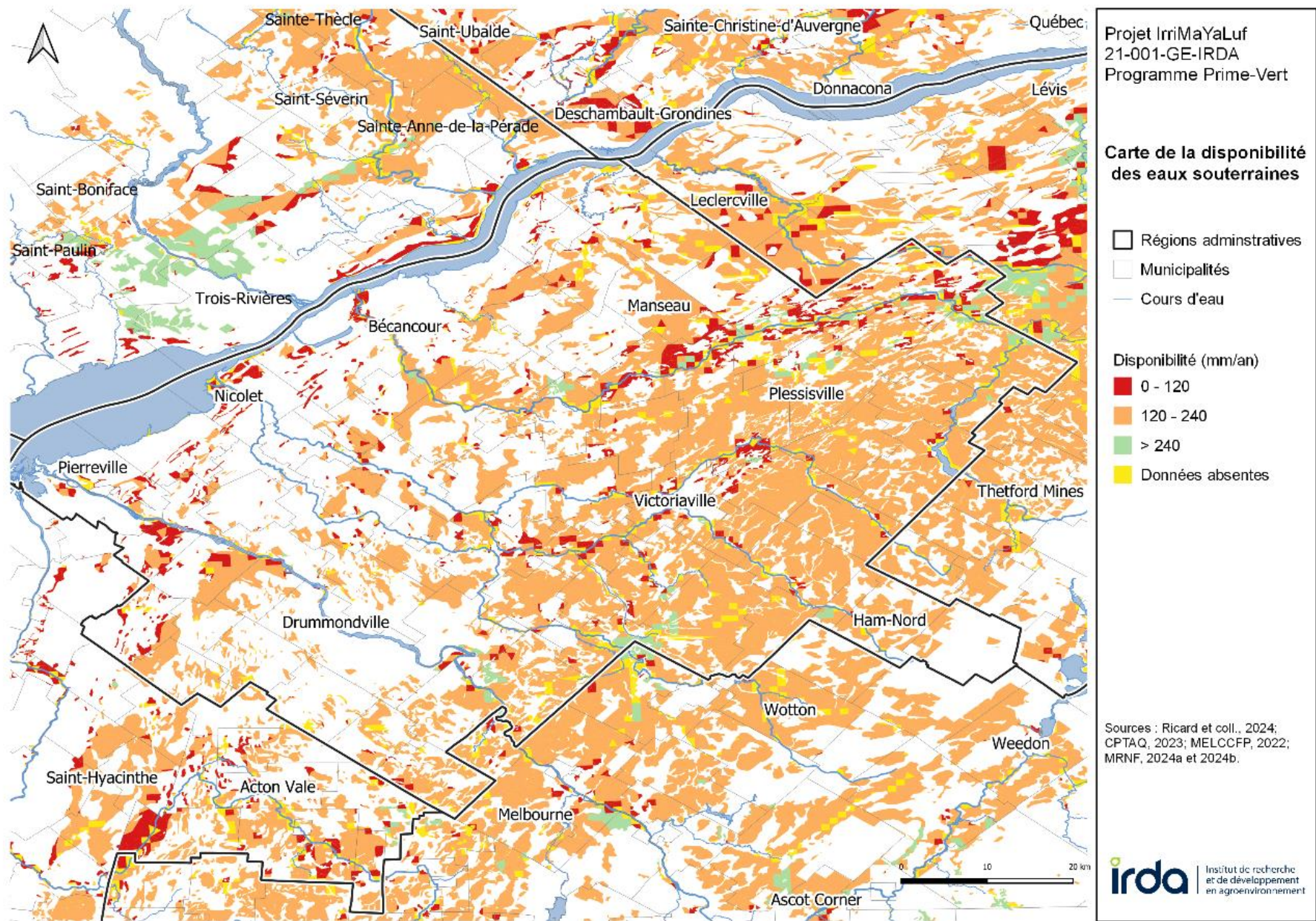


Figure 99. Disponibilité des eaux souterraines – Centre-du-Québec.

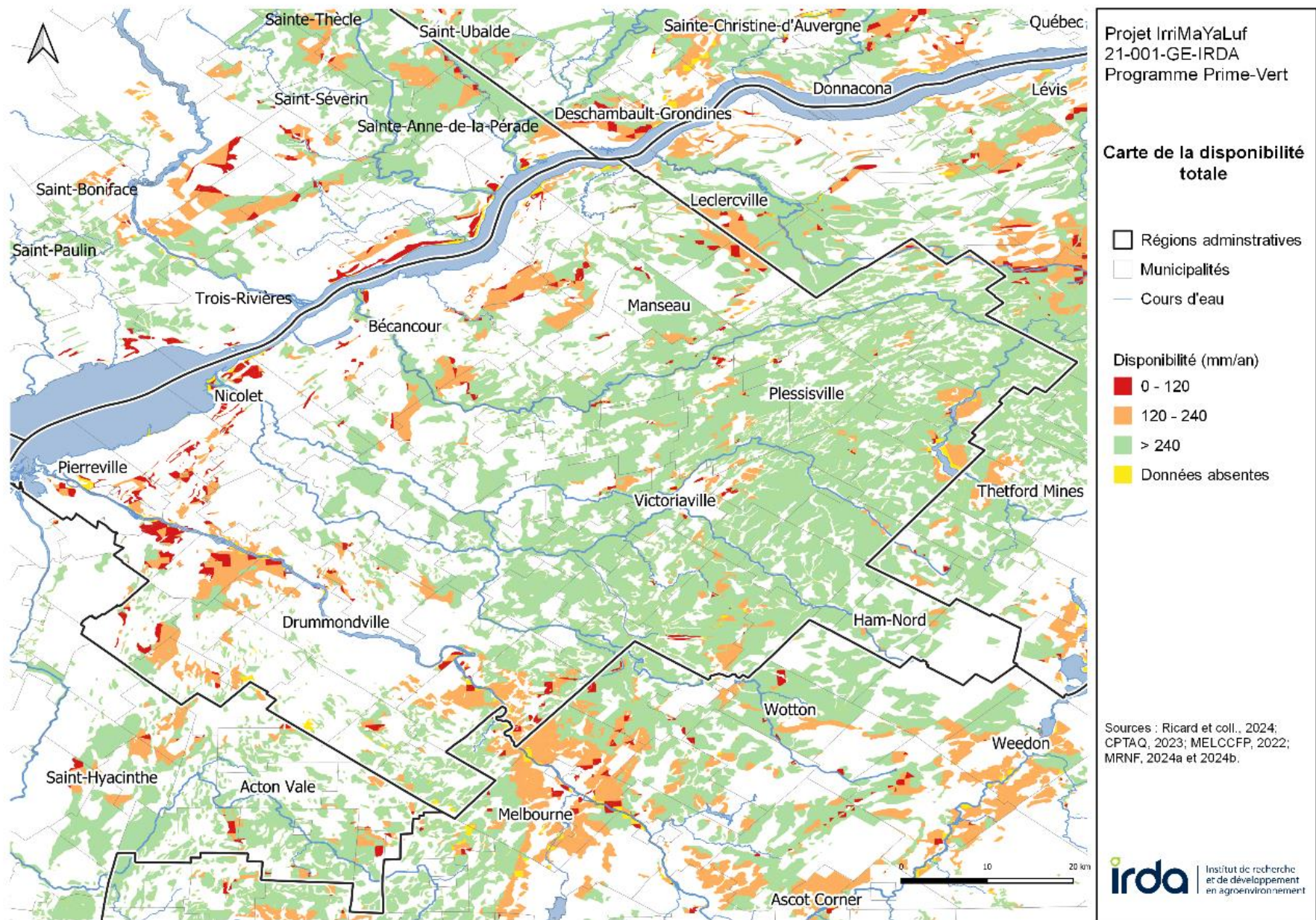


Figure 100. Disponibilité totale – Centre-du-Québec.

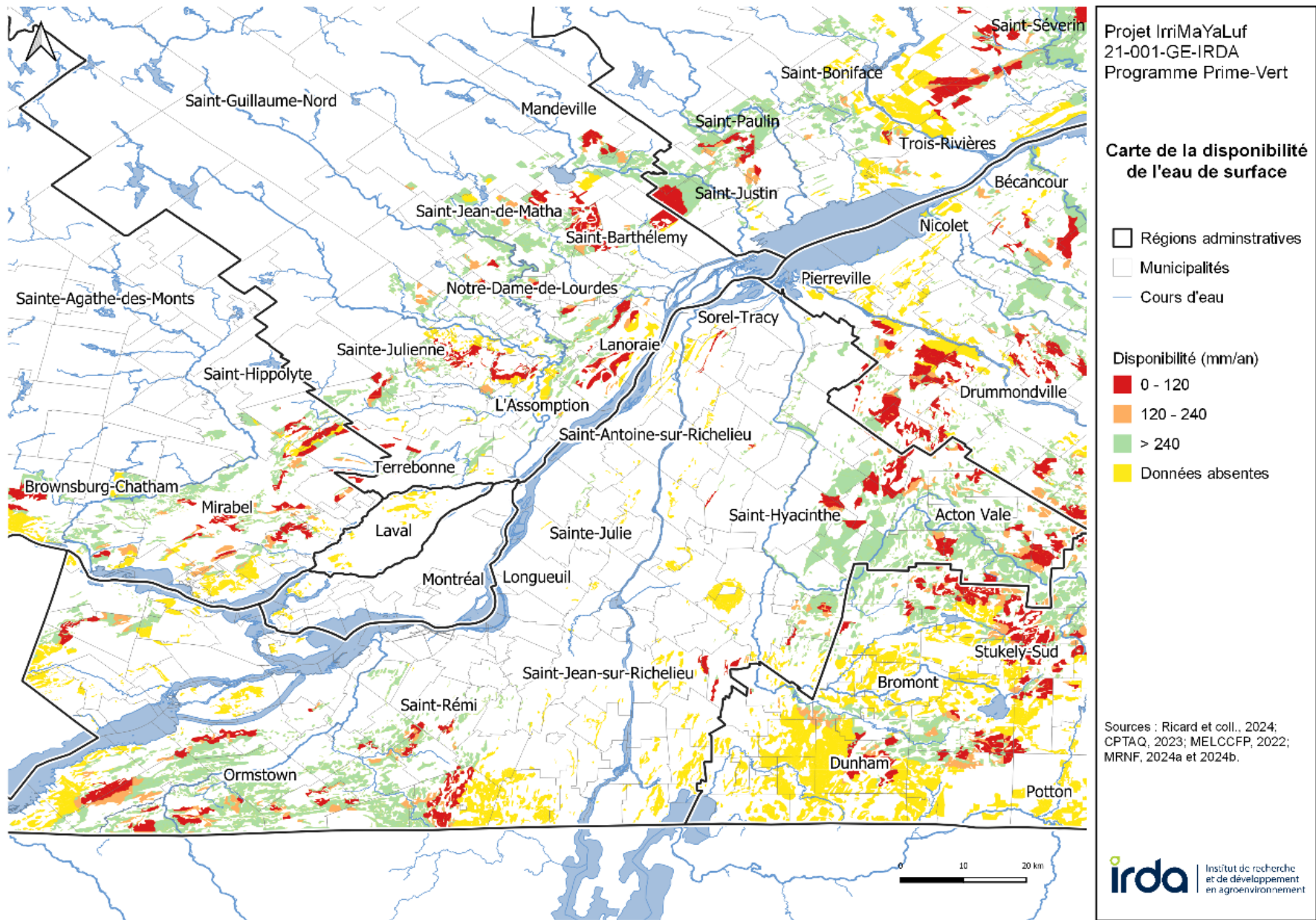


Figure 101. Disponibilité de l'eau de surface – Montérégie.

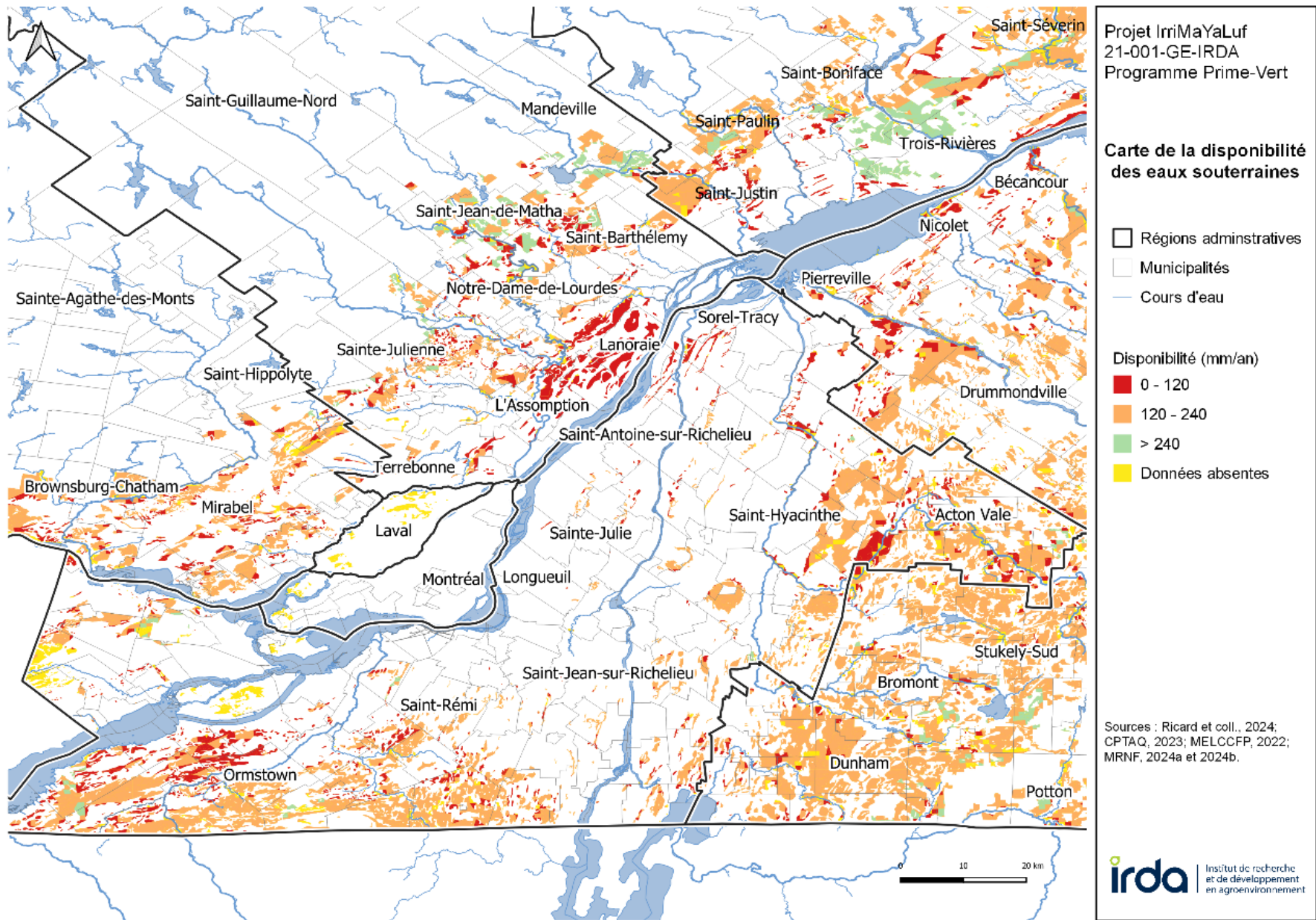


Figure 102. Disponibilité des eaux souterraines – Montérégie.

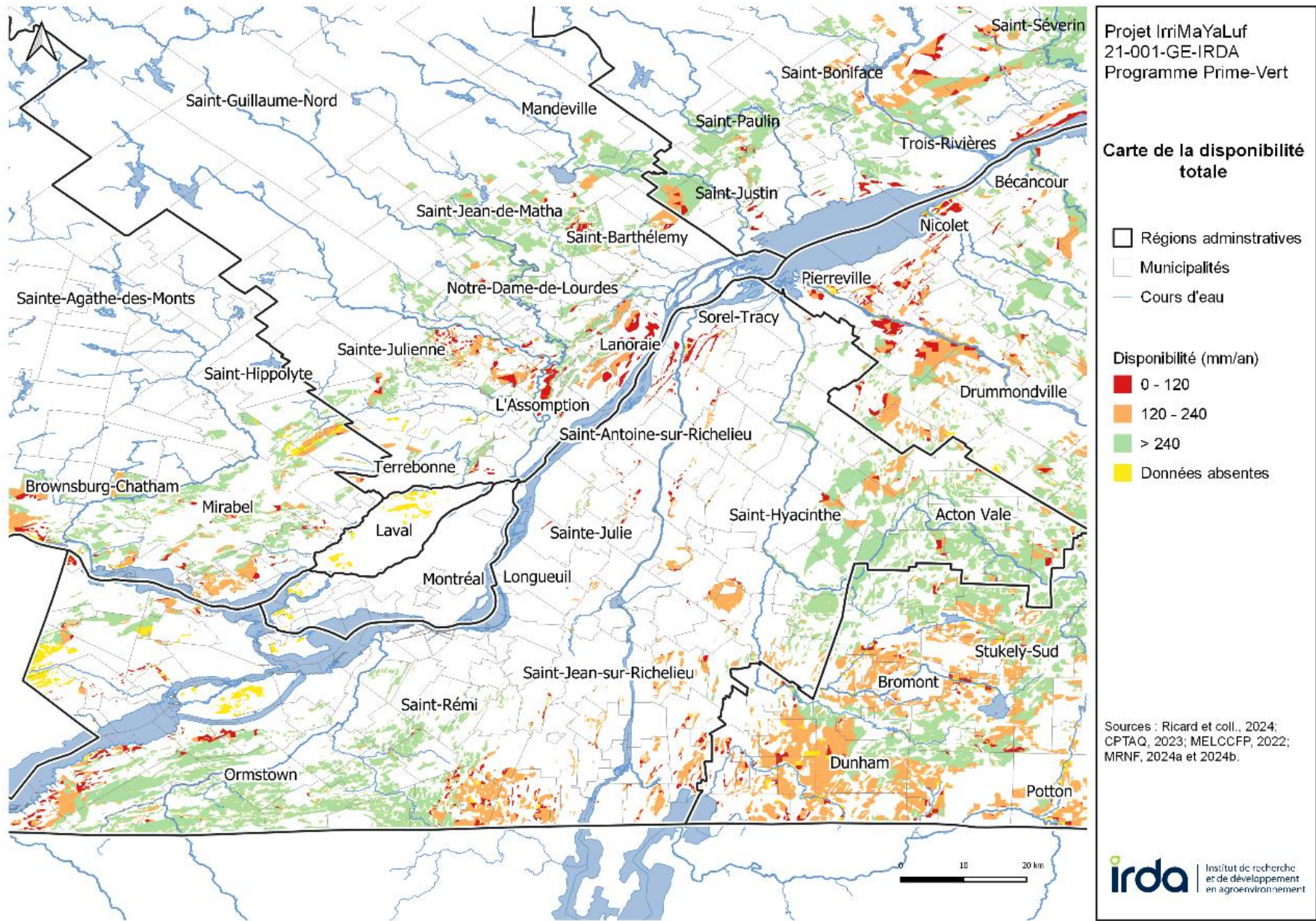


Figure 103. Disponibilité totale – Montérégie.

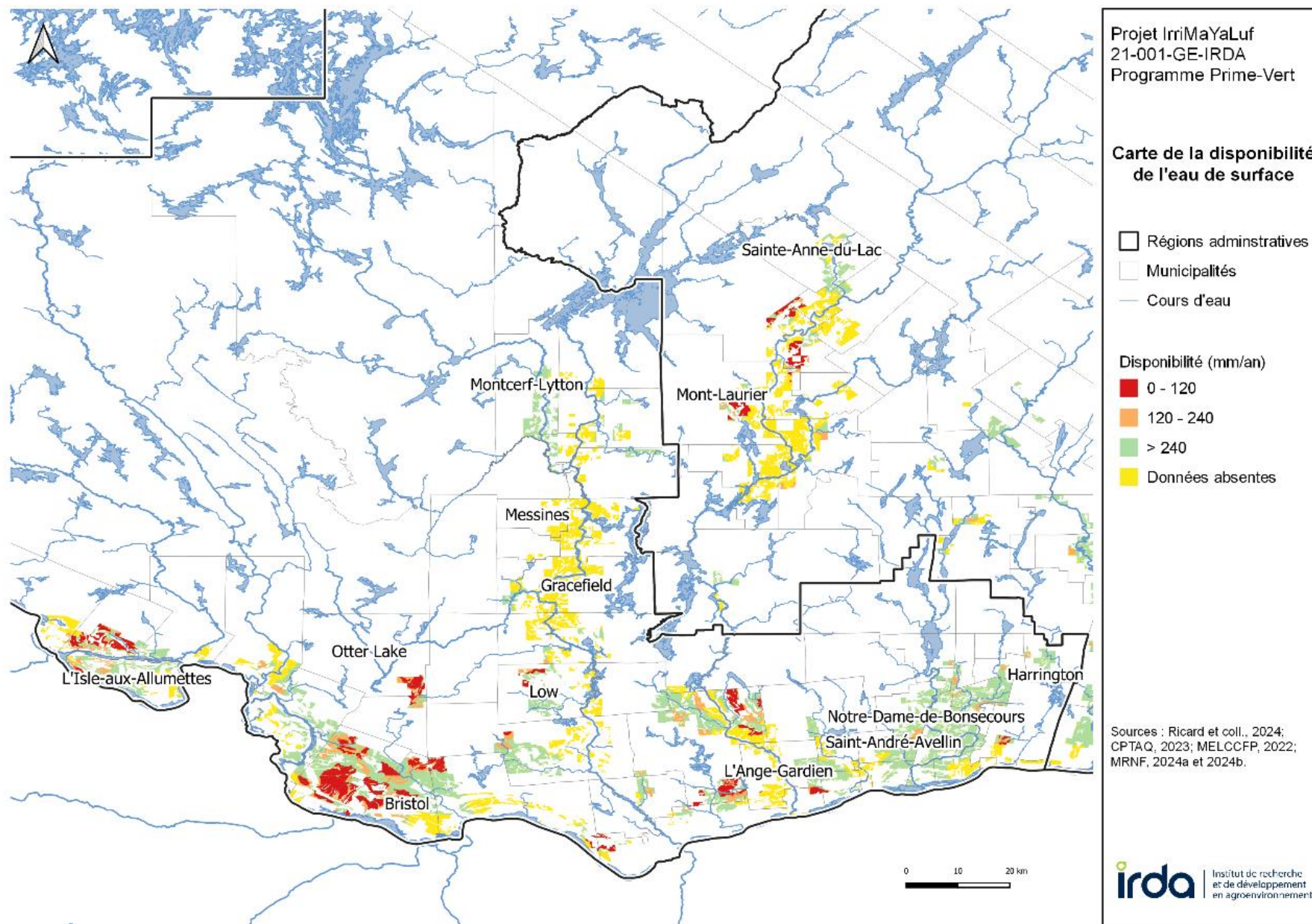


Figure 104. Disponibilité de l'eau de surface – Outaouais.

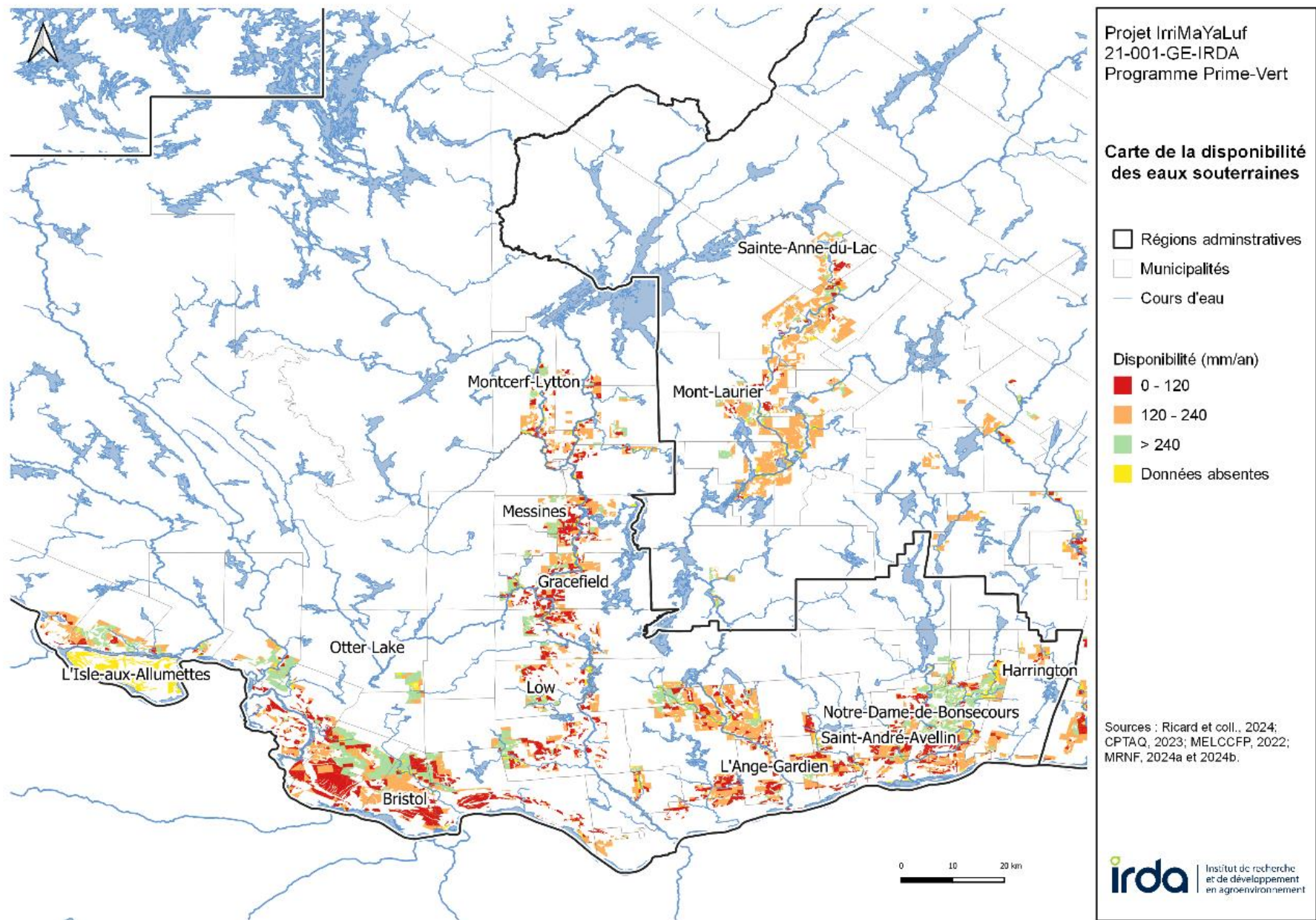


Figure 105. Disponibilité des eaux souterraines – Outaouais.

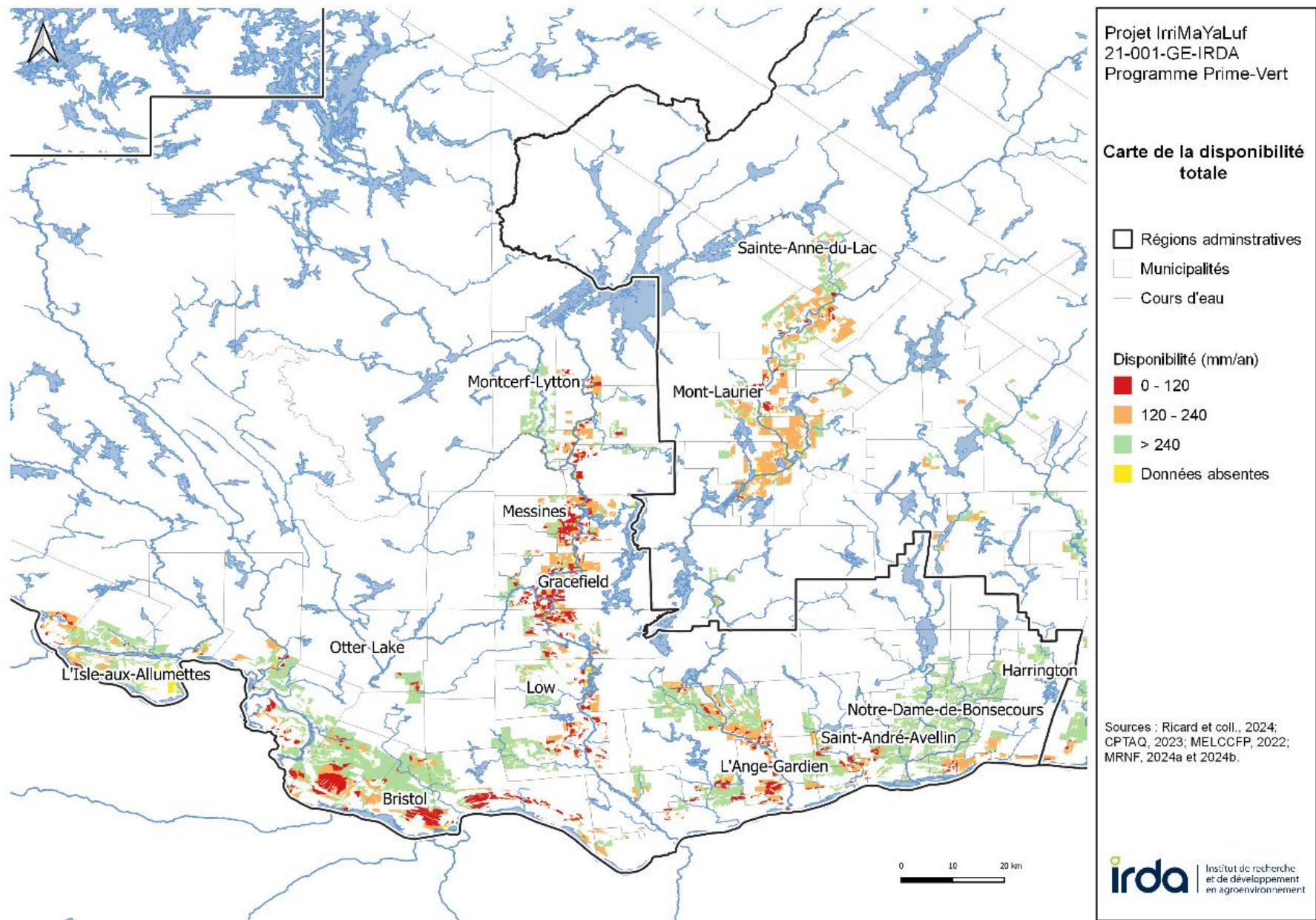


Figure 106. Disponibilité totale – Outaouais.

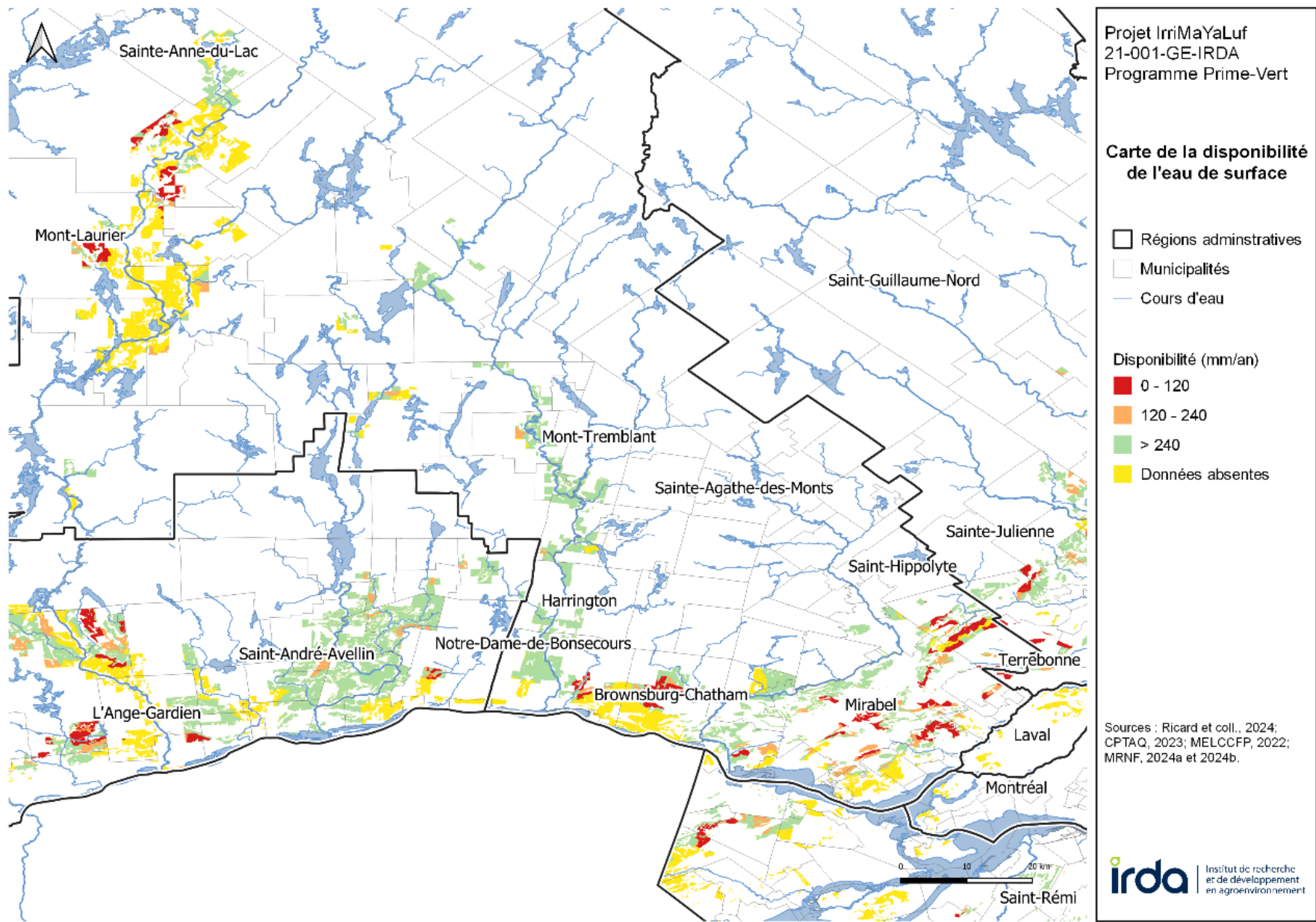


Figure 107. Disponibilité de l'eau de surface – Laurentides.

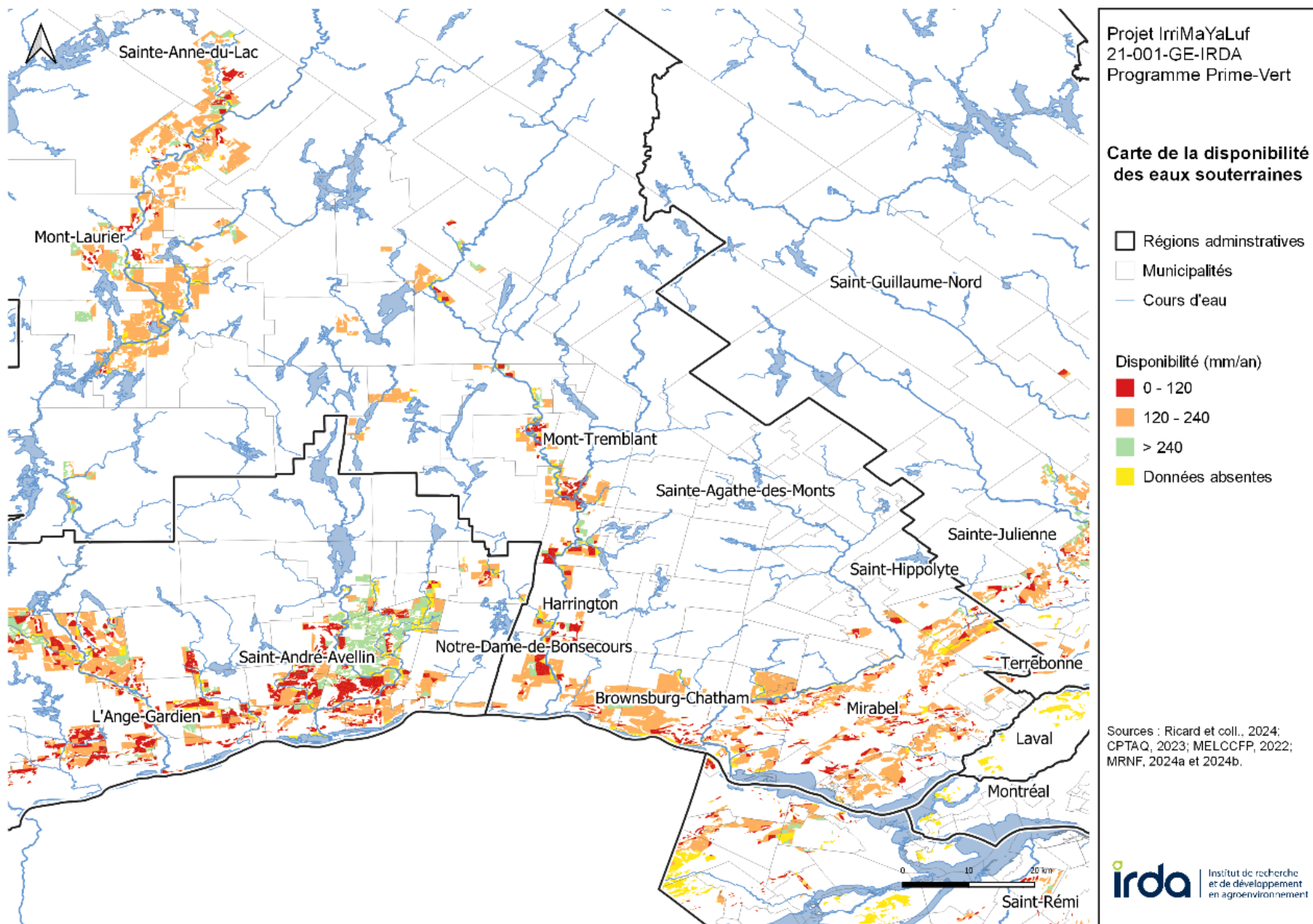


Figure 108. Disponibilité des eaux souterraines – Laurentides.

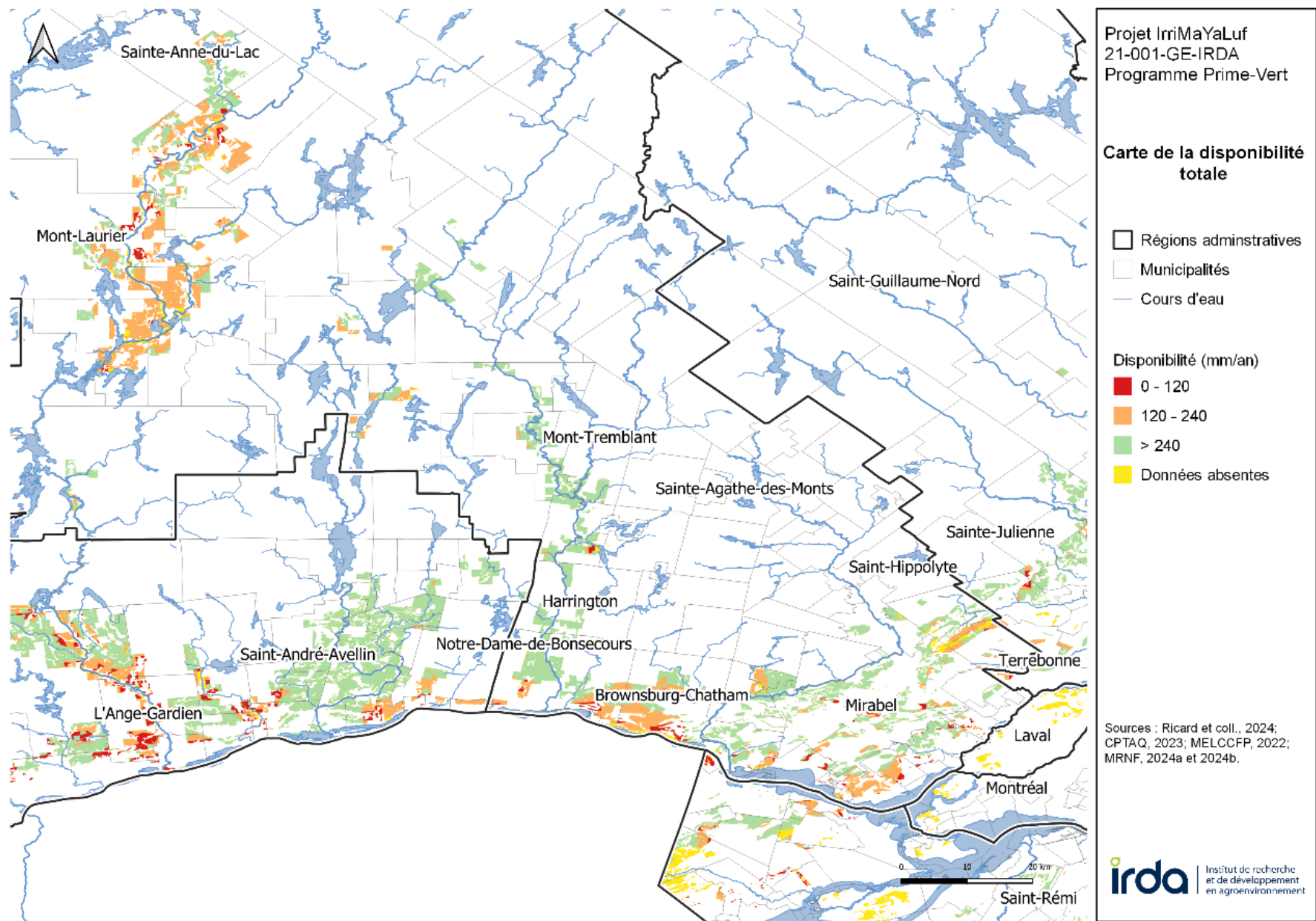


Figure 109. Disponibilité totale – Laurentides.

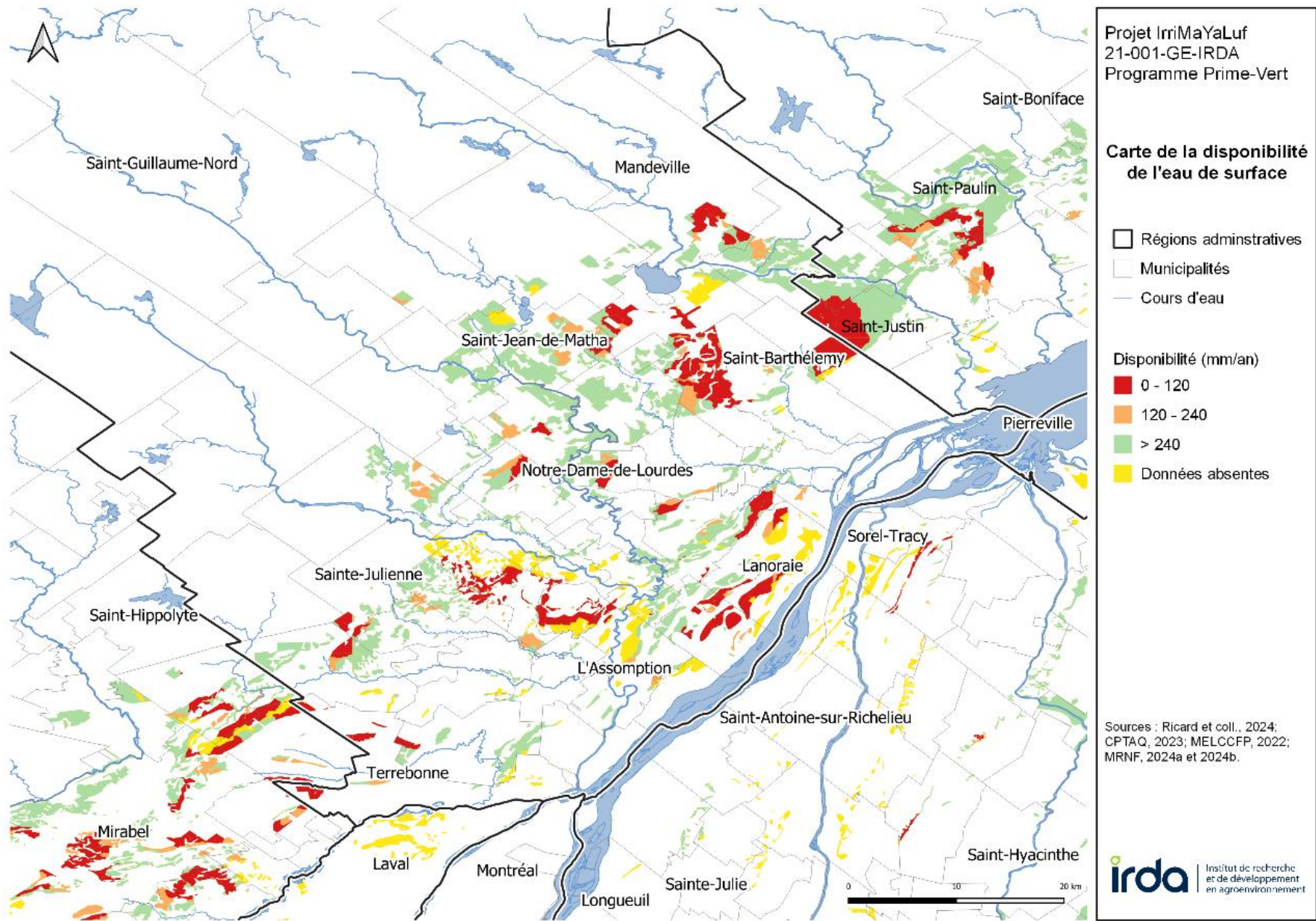


Figure 110. Disponibilité de l'eau de surface – Lanaudière.

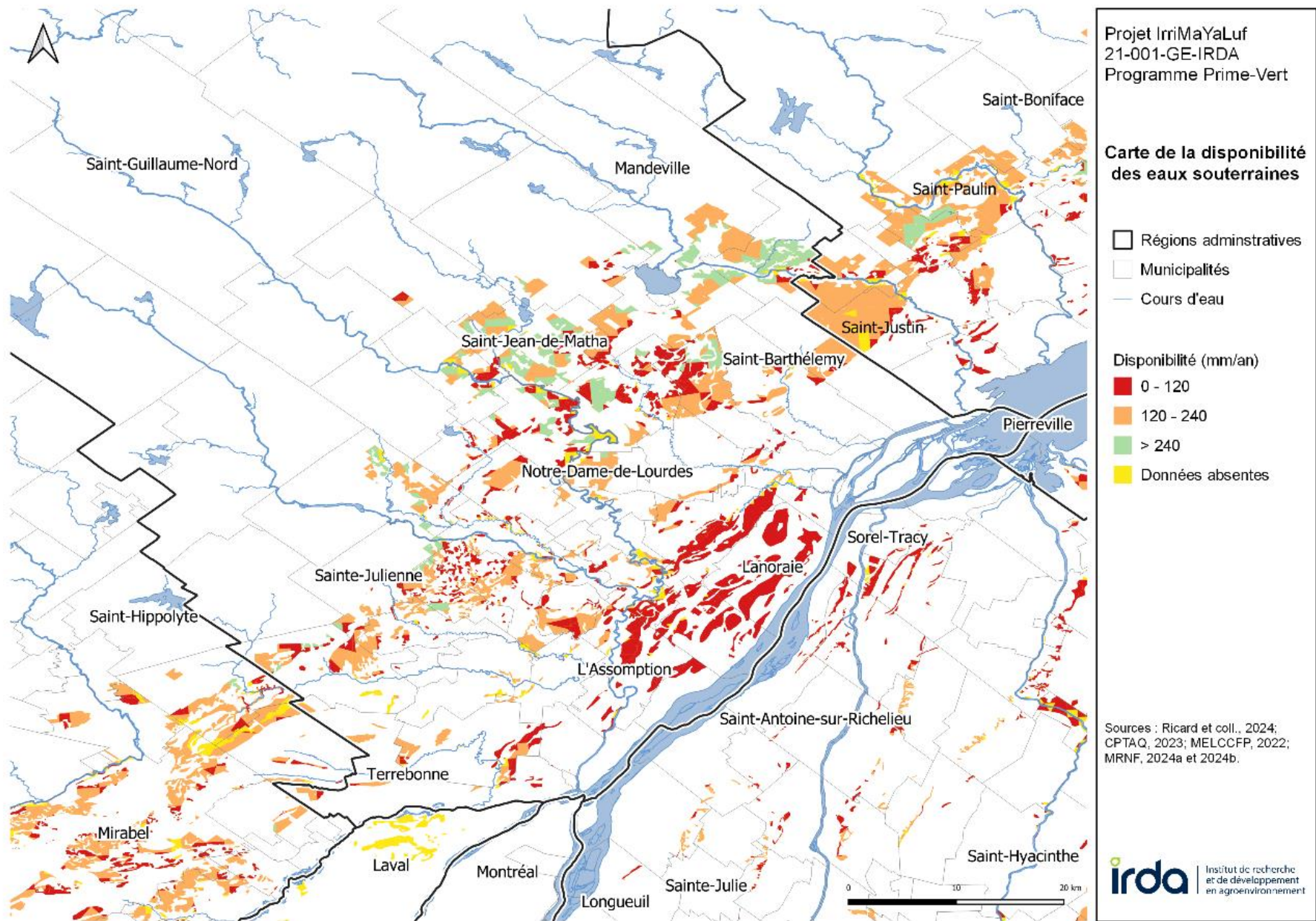


Figure 111. Disponibilité des eaux souterraines – Lanaudière.

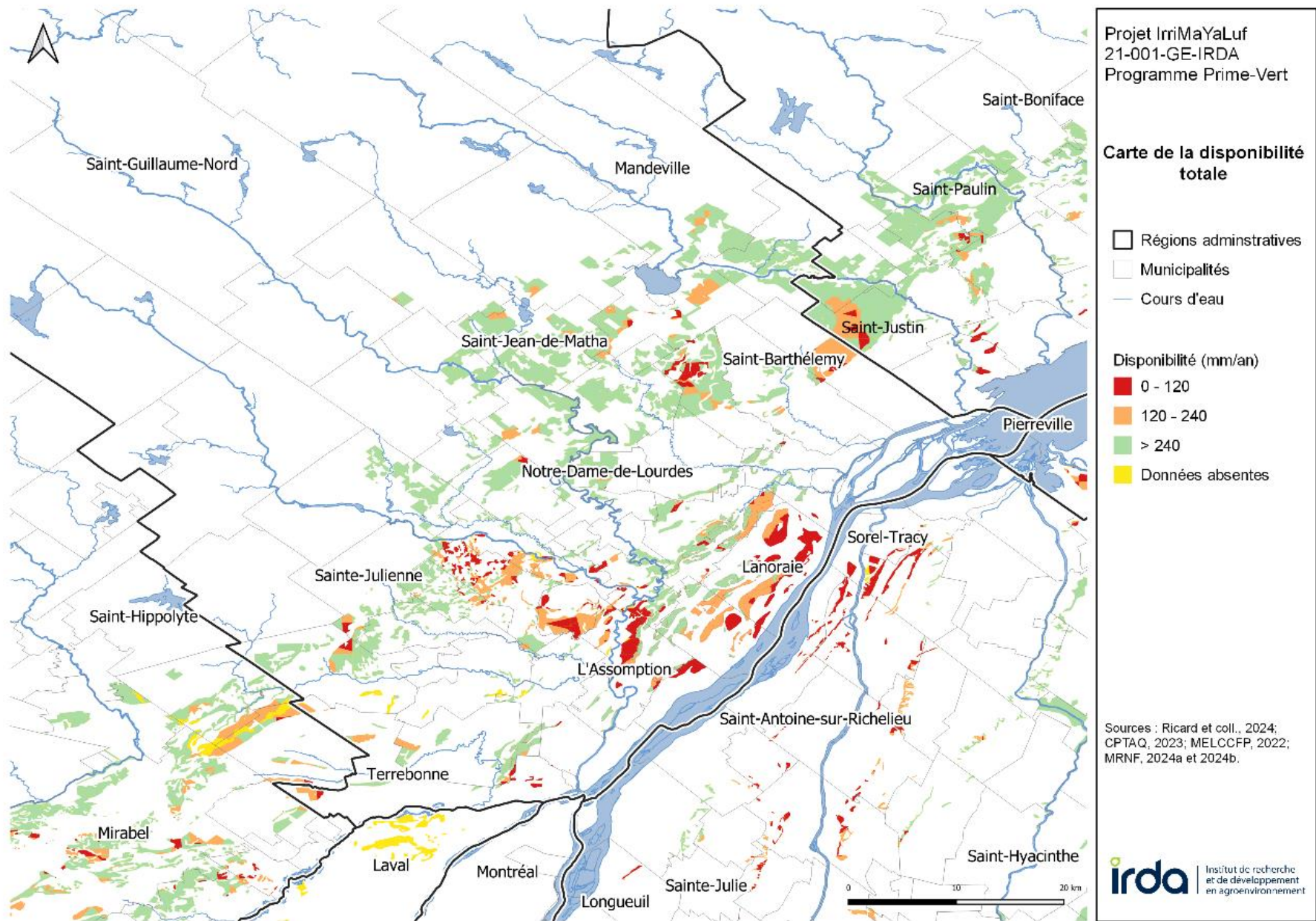


Figure 112. Disponibilité totale – Lanaudière.

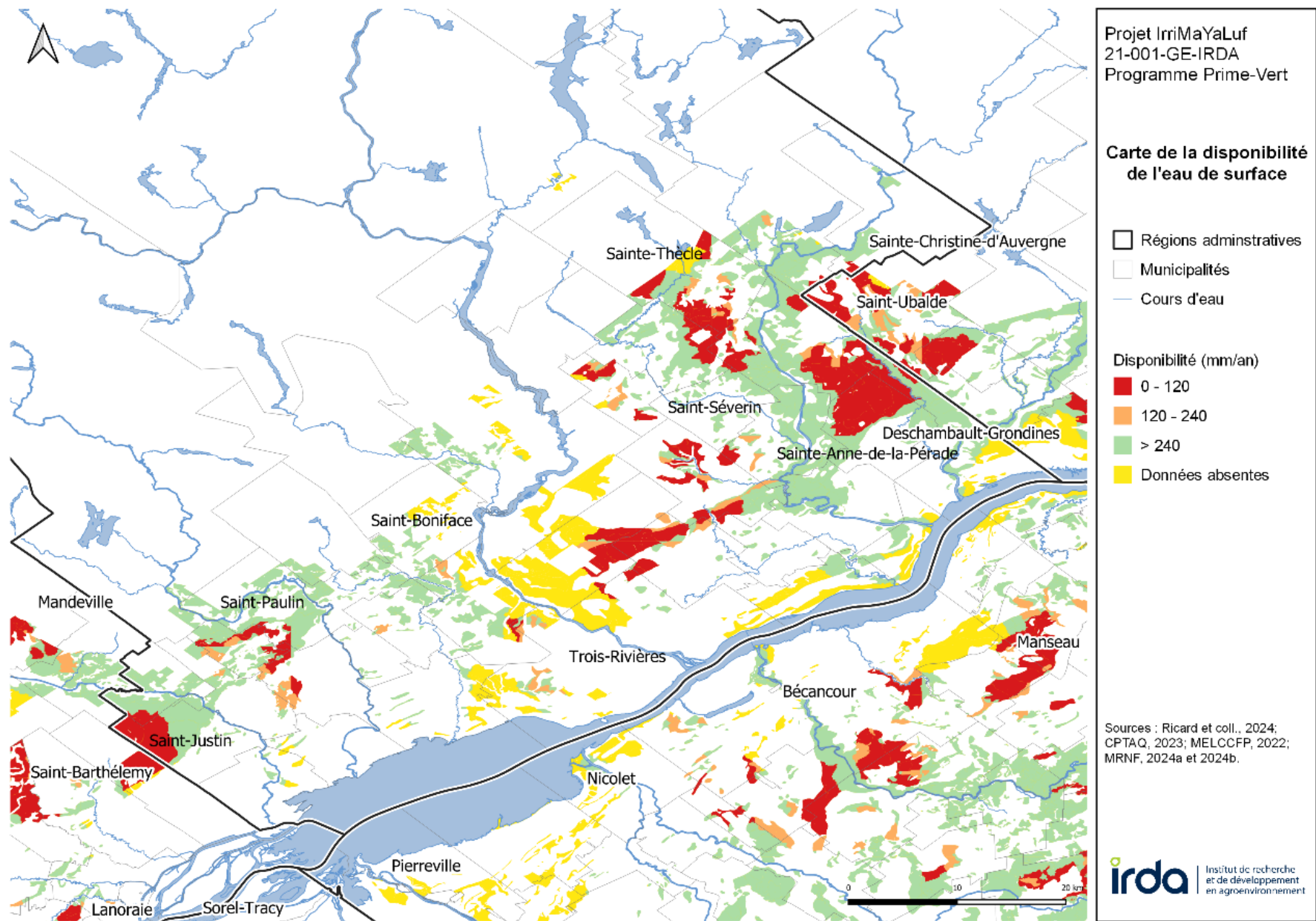


Figure 113. Disponibilité de l'eau de surface – Mauricie.

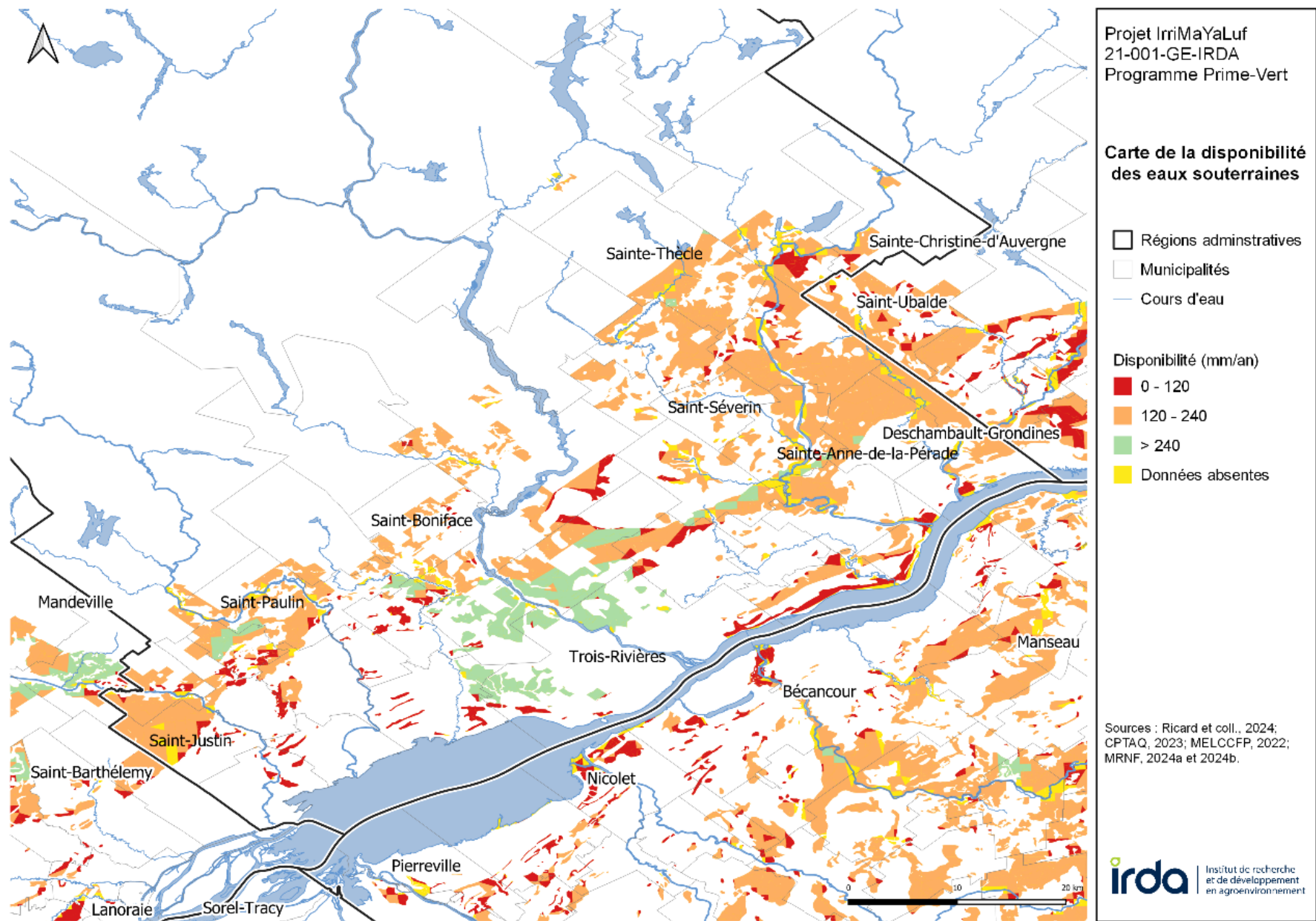


Figure 114. Disponibilité des eaux souterraines – Mauricie.

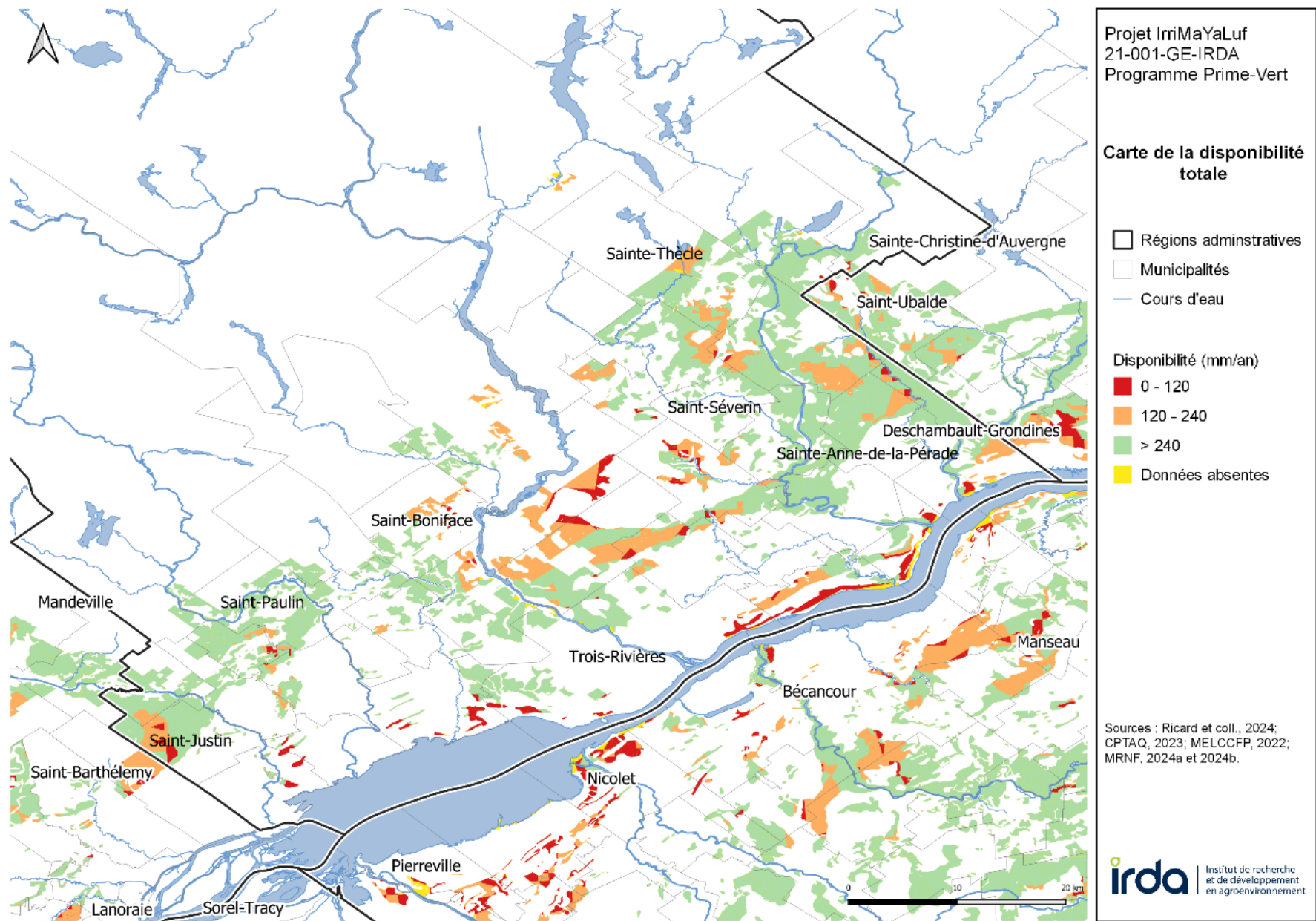


Figure 115. Disponibilité totale – Mauricie.

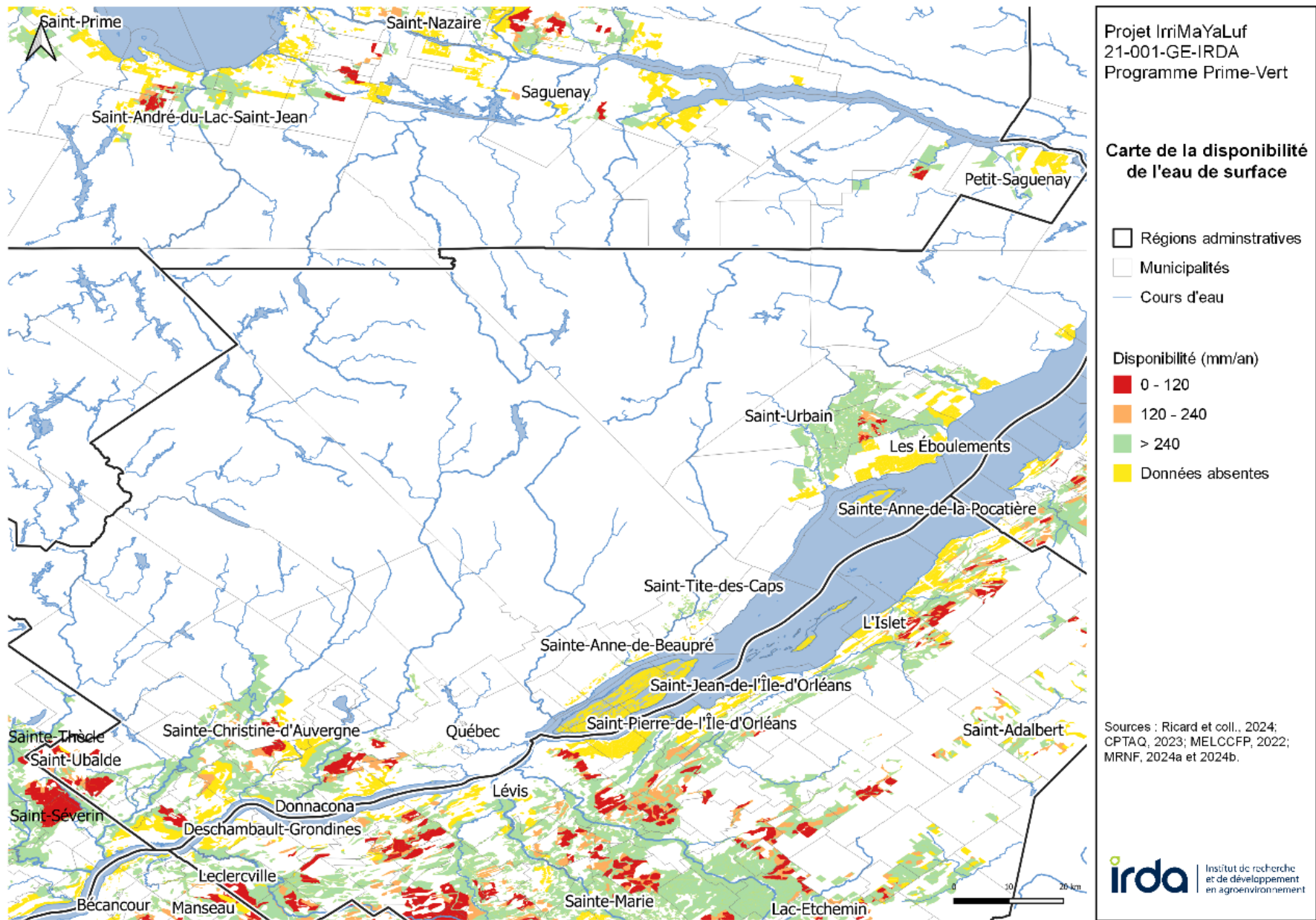


Figure 116. Disponibilité de l'eau de surface – Capitale-Nationale.

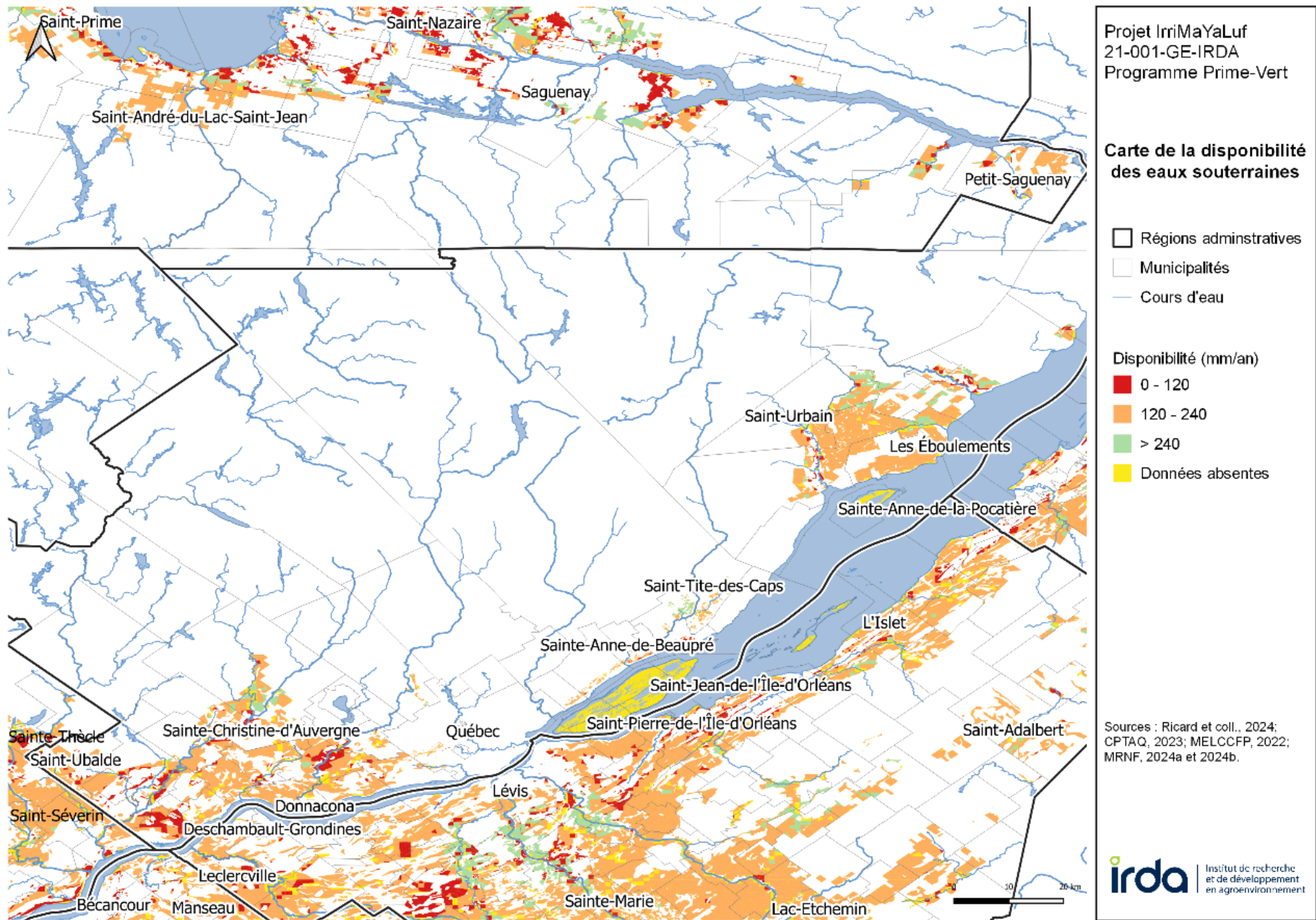


Figure 117. Disponibilité des eaux souterraines – Capitale-Nationale.

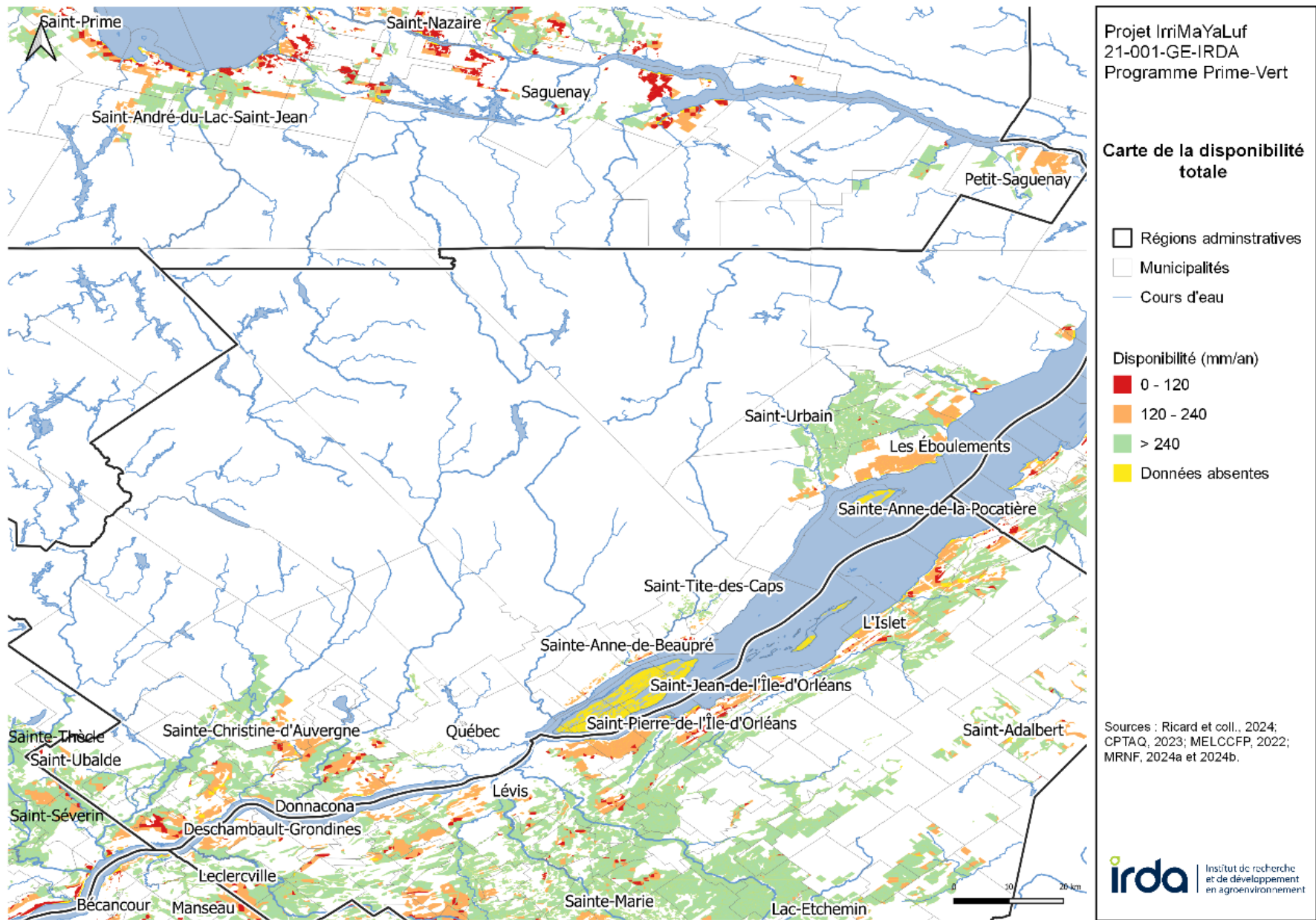


Figure 118. Disponibilité totale – Capitale-Nationale.

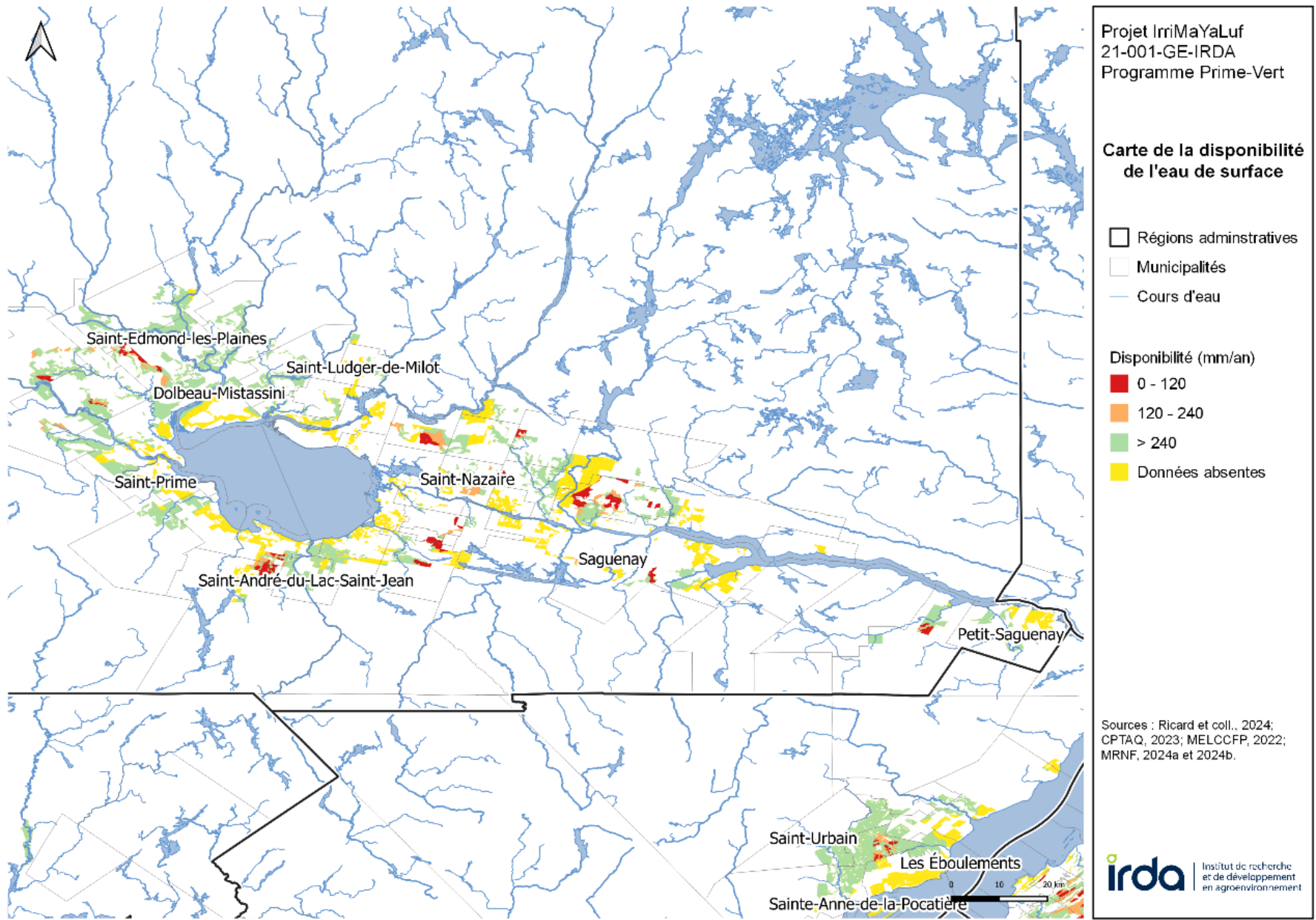


Figure 119. Disponibilité de l'eau de surface – Saguenay-Lac-Saint-Jean.

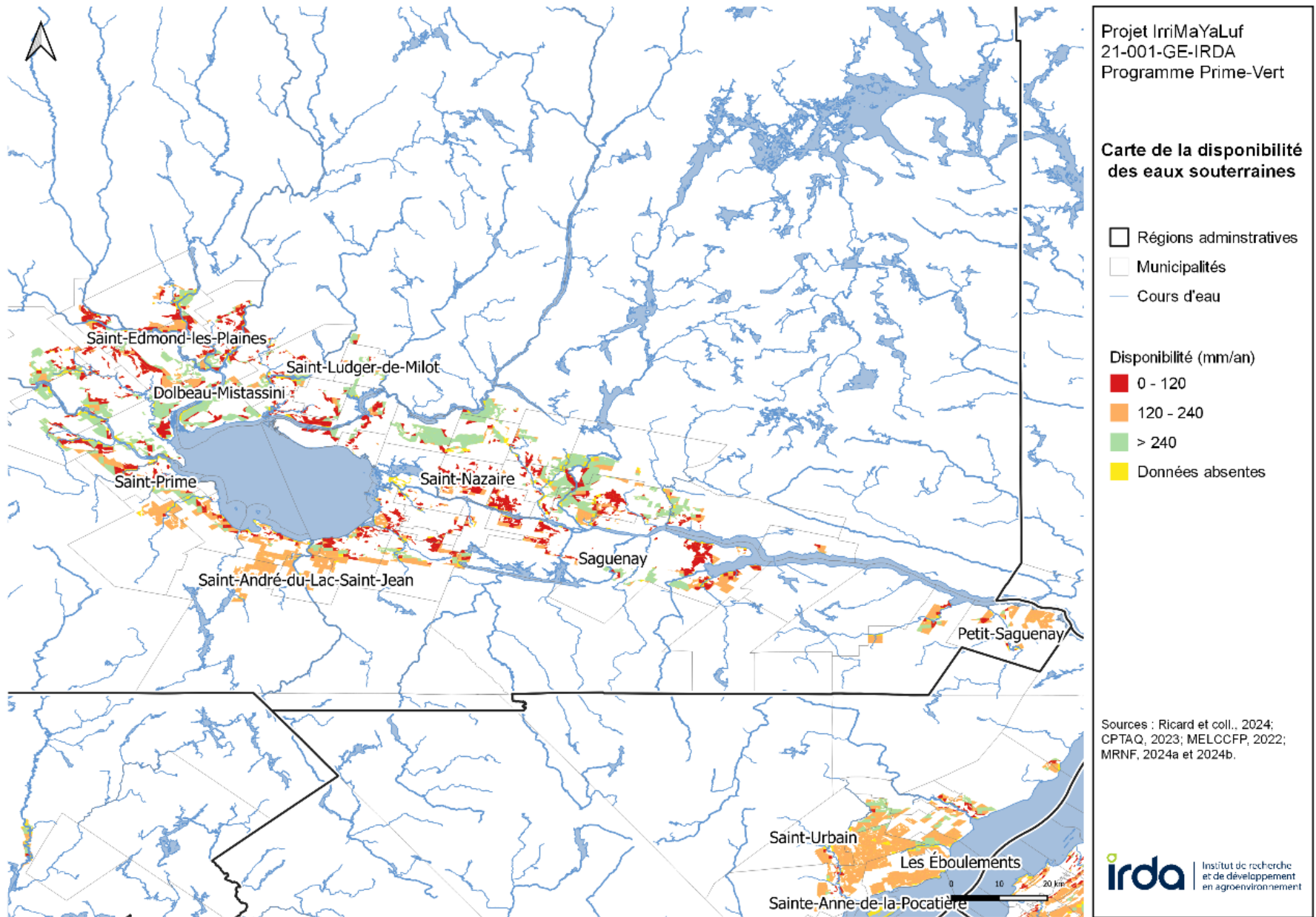


Figure 120. Disponibilité des eaux souterraines – Saguenay-Lac-Saint-Jean.

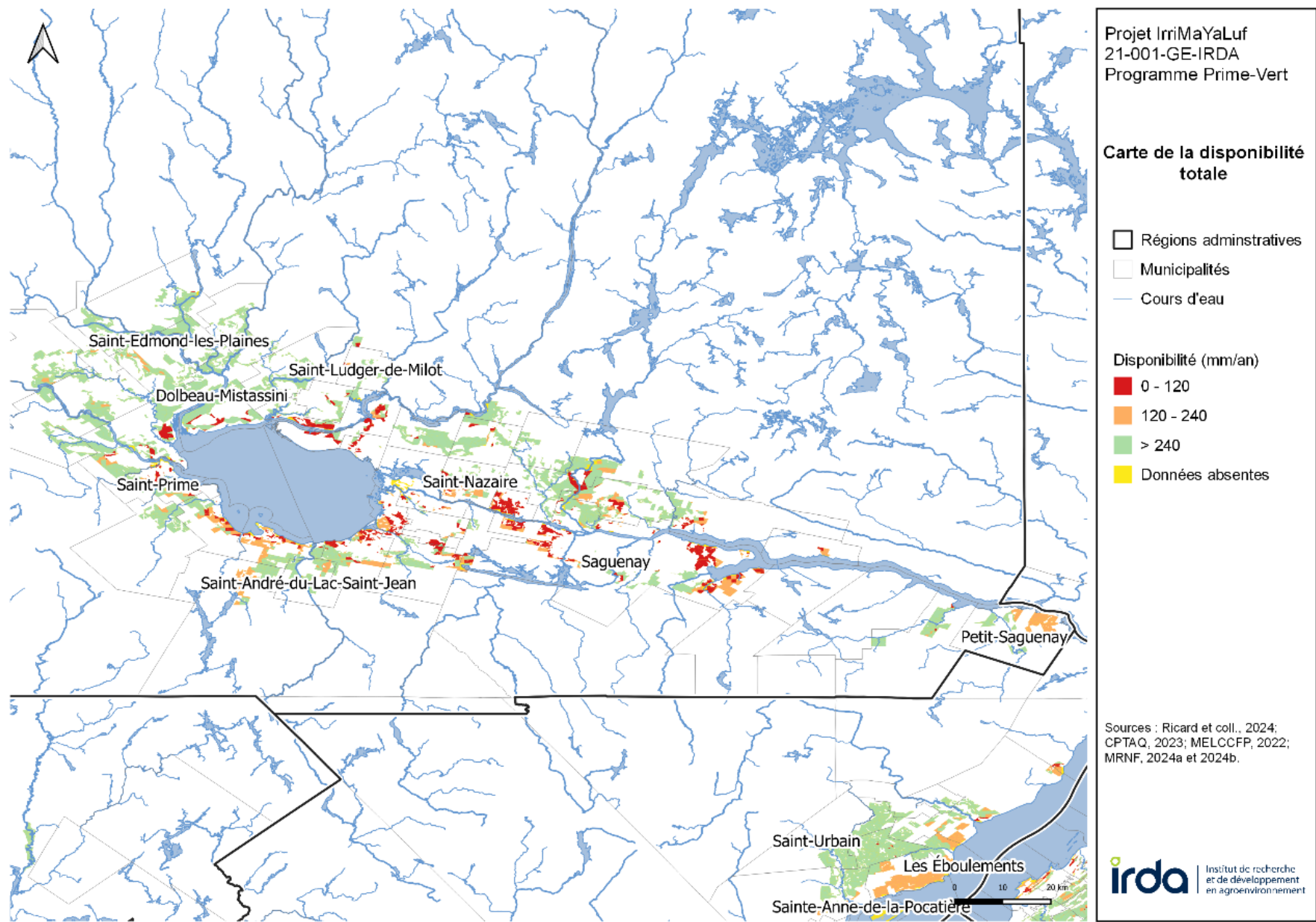


Figure 121. Disponibilité totale – Saguenay-Lac-Saint-Jean.