

ÉVALUATION DE SCÉNARIOS DE GESTION INTÉGRÉE ET SOUTENABLE DE L'EAU DANS LE COMPLEXE TOURBEUX DE LANORAIE (SCELANEAU)

EAU-003/6809241

DURÉE DU PROJET : 02-2021 / 02-2024

Présenté au
ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation

Québec 

RAPPORT FINAL

Réalisé par :
Dominic Brochu, agr., FUPAL

2024-04-25

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.

Équipe de réalisation du projet SCELANEAU

Dominic Brochu, agr., Fédération de l'UPA de Lanaudière
Charles Bergeron, agr., Fédération de l'UPA de Lanaudière
Sylvestre Delmotte, agr., Consultant
Marie Larocque, Professeure, UQAM
Julien Chéné, Étudiant à la maîtrise, UQAM
Simon Ricard, ing., Ph.D., Chercheur IRDA
Arianne Blais-Gagnon, IRDA
William Huertas, IRDA
Meaghan Kilmartin, M.Sc., McGill
Chandra Madramootoo, Ph.D., ing., McGill

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	3
RÉSULTATS SIGNIFICATIFS OBTENUS	4
Volet 1 - Caractérisation des prélèvements d'eau.....	4
DIFFUSION DES RÉSULTATS.....	13
SYNTHÈSE ET CONCLUSION.....	15
PERSONNE-RESSOURCE POUR INFORMATION	16
REMERCIEMENTS	16
ANNEXE 1 - Rapport final de l'IRDA.....	17
ANNEXE 2 - Rapport final de l'UQAM.....	50
ANNEXE 3 - Rapport final de McGill	95
ANNEXE 4 - Rapport final de Sylvestre Delmotte.....	160
ANNEXE 5 – Rencontre de producteurs – 2022-04-01.....	194
ANNEXE 6 – Rencontre de producteurs – 2023-03-14.....	249
ANNEXE 7 – Réponses du MELCCFP aux questions, projet SCELANEAU.....	294
ANNEXE 8 – Présentation St-Rémi – 2023-12-07	308
ANNEXE 9 – Présentation Comité tourbière – 2024-04-05.....	330

ÉVALUATION DE SCÉNARIOS DE GESTION INTÉGRÉE ET SOUTENABLE DE L'EAU DANS LE COMPLEXE TOURBEUX DE LANORAIE

SCELANEAU

EAU-003/6809241

INTRODUCTION

Le projet SCELANEAU vise à analyser des solutions techniques permettant de concilier les prélèvements en eau pour l'irrigation des cultures et le maintien des fonctions hydrologiques et écologiques du complexe tourbeux de Lanoraie. Le territoire visé inclut un complexe tourbeux dont l'évolution récente, tout comme les perspectives d'évolution dans un contexte de changements climatiques, est inquiétante : assèchement estival, transformation graduelle de la végétation typique d'une tourbière vers une végétation arborée.

L'objectif général du projet est de développer et d'évaluer la faisabilité et la pertinence de scénarios techniques visant à concilier les usages agricoles de l'eau (et des autres usagers) et le maintien des fonctions hydrologiques du complexe tourbeux de Lanoraie dans un contexte de changements climatiques.

Spécifiquement, le projet SCELANEAU vise à :

- 1) Documenter spatialement et temporellement les prélèvements en eau, notamment ceux pour l'irrigation des cultures horticoles, maraîchères et fruitières;
- 2) Comprendre la dynamique actuelle et future des écoulements d'eau dans la région du complexe tourbeux de Lanoraie;
- 3) Évaluer la faisabilité de diversifier les sources d'approvisionnement en eau.

La réalisation de l'étude s'appuie sur la réalisation de cinq volets, lesquels visent :

- 1) La documentation des besoins en eau des entreprises agricoles;
- 2) La caractérisation de l'hydrologie de surface par la mise en place de suivis hydrométriques;
- 3) La caractérisation de l'hydrologie souterraine par la mise en place de suivis hydrogéologiques;
- 4) La caractérisation des besoins en eau des cultures;
- 5) L'évaluation de la conception d'un système d'approvisionnement en eau d'irrigation.

Ces actions ont été menées par des équipes de la FUPAL, de l'IRDA, de l'UQAM et de l'université McGill.

RÉSULTATS SIGNIFICATIFS OBTENUS

Volet 1 - Caractérisation des prélèvements d'eau

Le territoire visé couvre 364 km², chevauche sept municipalités (Ste-Geneviève-de-Berthier, Lanoraie, Lavaltrie, St-Thomas, St-Paul, L'Assomption, St-Sulpice) et inclut un complexe tourbeux de 76 km² (Figure 1).

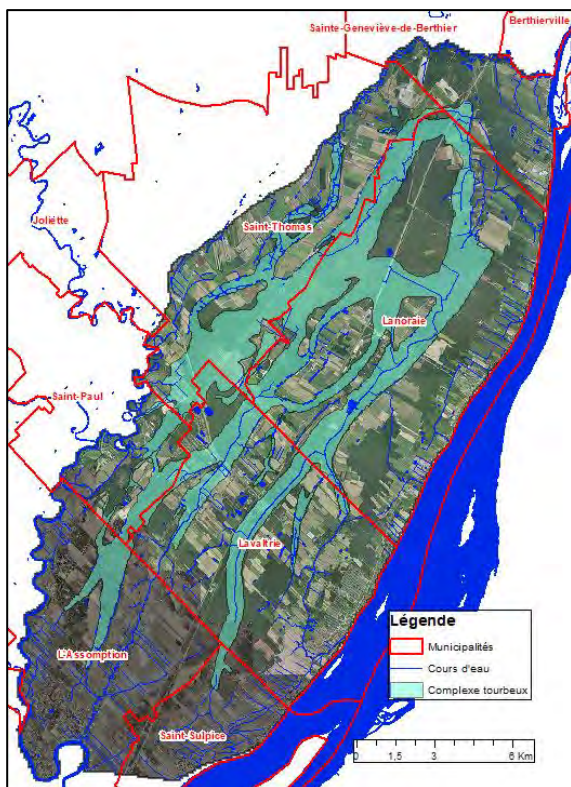


Figure 1. Territoire à l'étude et complexe tourbeux de Lanoraie

Sur ce territoire, environ 11 813 ha sont cultivés (après ajout à la main de certaines superficies n'apparaissant pas dans la base de données des parcelles et productions agricoles déclarées (BDPPAD) de la Financière Agricole du Québec (FADQ)). Le nombre d'entreprises agricoles qui auraient recours à l'irrigation des cultures est estimé entre 45 et 50. Le territoire est composé à 52% de sols sableux (16% de sable fin Lanoraie), 24% de sols organiques, 15% de sols limoneux, 5% de sols argileux et 4% de sol divers.

Selon la base de données BDPPAD de la FADQ, le type de culture assuré sur le territoire est assez bien diversifié (Tableau 1). Les cultures irriguées (canneberges, maraîchers, petits fruits, pommes de terre et vignoble) représentent environ 25% des superficies.

Tableau 1. Superficie des cultures assurées à la FADQ pour les années 2020 à 2023

Cultures	Superficie (ha)			
	2020	2021	2022	2023
Canneberges	66	77	77	77
Céréales	1 014	499	486	580
Engrais vert	1 153	1 124	1 184	1 031
Foin	460	703	351	308
Maïs	1 158	2 153	1 634	1 775
Maraîcher	424	589	434	604
Petits fruits	44	51	51	50
Pommes de terre	1 040	1 176	1 174	1 433
Soya	1 519	1 762	1 958	1 919
Vignoble				6
Non définie	4 371	3 250	4 132	3 762
Total	11 249	11 386	11 481	11 545

Dans le cadre de ce projet, 32 propriétaires de 34 entreprises agricoles ont été rencontrés individuellement en 2021 pour caractériser leur habitude de prélèvement d'eau, les cultures, les rotations, les systèmes d'irrigation, etc. Ceux-ci exploitent 4 911 ha, dont 4 750 ha seraient irrigués selon la culture dans la rotation et 2 850 ha seraient irrigués annuellement. Cependant, puisque l'ensemble des producteurs n'ont pas été rencontrés, on estime la superficie irriguée annuellement à près de 4 000 ha. Les principales cultures irriguées en ordre d'importance de superficie sont : la pomme de terre (59%), les cultures maraîchères (16%), les petits fruits (14%), le gazon en plaque (8%) et les arbres et arbustes en pépinière (3%). Le tableau 2 ci-dessous brosse un portrait des cultures et superficies cultivées par les producteurs rencontrés.

Tableau 2. Cultures et superficies cultivées par les 32 propriétaires des 34 entreprises rencontrés

Cultures 2021	Nombre de producteurs ⁴	Superficie (ha)
Gazon	3	210
Petits fruits ¹	5	65
Vigne	1	11
Canneberges	3	256
Asperge	4	77
Arbres/arbustes	3	75
Pommes de terre	14	1 452
Courges	7	83
Maraîcher	4	189
Maïs sucré	4	41
Engrais vert non irrigué ²	17	1 584
Grandes cultures non irriguées ³	9	380
Culture non définie		489
Irrigué		2 458
Non irrigué		1 964
Irrigation inconnue		489
TOTAL		4 911

¹ Bleuets, fraises, framboises, camerises, cerise de terre

² Seigle aut./millet, sarrasin, avoine-pois

³ Maïs, soya, céréales, haricot fin, foin

⁴ Total > à 32, car 1 producteur peut faire plusieurs cultures

La figure 2 ci-dessous présente les différents bassins versants du territoire. Les données géomatiques des contours des bassins versants proviennent de la base de données topographiques du Québec (BDTQ) à l'échelle 1:20 000.

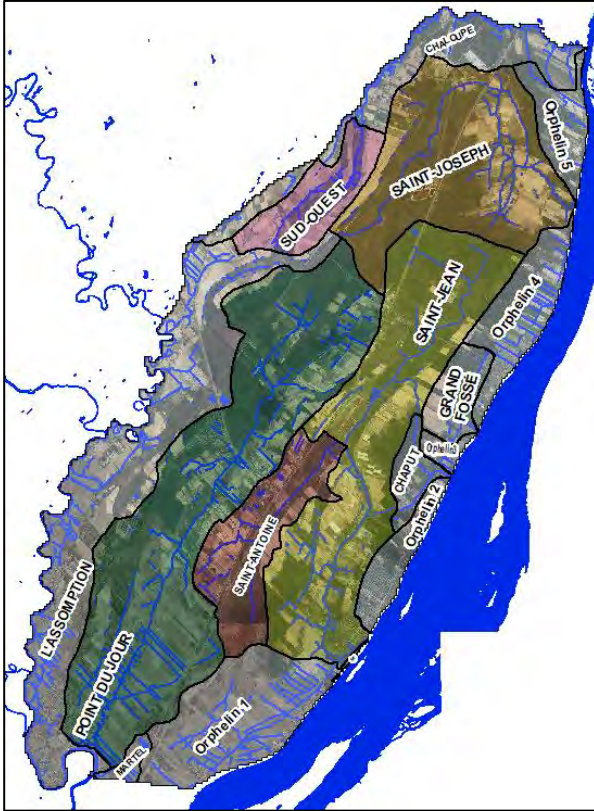


Figure 2. Les bassins versants du territoire visé

Ces 32 producteurs agricoles exploitent 209 sites de prélèvements d'eau, dont 196 sites pour irrigation des cultures (dont trois situés hors du territoire d'étude, mais qui irriguent des terres sur le territoire). Quarante-cinq sites prélèvent l'eau en cours d'eau, alors que les 151 autres sites prélèvent l'eau dans des bassins d'irrigation. Le tableau 3 ci-dessous détaille les superficies totales et enquêtes par bassin versant, ainsi que le nombre de prises d'eau selon le type de prise d'eau.

Tableau 3. Superficies totales, superficies enquêtées et nombre de prises d'eau par bassin versant

Bassin versant de la localisation de la prise d'eau	Superficie du bassin versant (ha)	Superficie BDPPAD' 2020 modifiée (ha)	Superficie enquêtée (ha)	Superficie non enquêtée (ha)	Superficie annuellement irriguée (ha)	Nombre de site de prélèvement						
						Aqueduc	Bassin d'irrig.	Cours d'eau	Pointe	Puits artésien	Puits surface	TOTAL
Chaloupe	1 730	680	305	375	83		2	2	1			5
Chaput	403	113	68	45	31		2					2
Grand fossé	576	176	134	42	77		1					1
L'Assomption	4 607	1 844	607	1 237	295	1	25	2		1		29
Martel	153	103		103								
Orphelin 1	2 203	1 188		1 188								
Orphelin 2	598	96	20	75								
Orphelin 3	161	91	59	32								
Orphelin 4	1 118	400	15	385								
Orphelin 5	684	117	4	114								
Point du Jour	7 669	3 123	1 086	2 037	742		57	13	1		4	75
Saint-Antoine	1 821	478	277	201	172		13	3				16
Saint-Jean	5 413	1 578	901	677	505		20	15	2		1	38
Saint-Joseph	4 131	1 193	819	374	563		14	7	1			22
Sud-Ouest	1 098	634	616	18	281		17		1			18
Hors zone d'étude ²					99			3				3
TOTAL	32 365	11 813	4 911	6 902	2 848	1	151	45	6	1	5	209

¹ Base de données des parcelles et productions agricoles déclarées de la Financière agricoles du Québec

² 3 prises d'eau: 1 dans la rivière l'Assomption et 2 dans le ruisseau St-Thomas

Le volume d'eau annuellement prélevé par les 34 entreprises est d'environ 7,6 M de m³ et 84% des prélèvements totaux ont lieu durant les mois de juin, juillet et août (6,4 M m³). Le tableau 4 ci-dessous détaille les volumes prélevés selon le type de prise d'eau pour chacun des bassins versants. Le volume d'eau prélevé annuellement en cours d'eau est d'environ 2,2 M m³, soit 30% des prélèvements totaux et 5,4 M m³ est prélevé en bassins d'irrigation, soit 70% des prélèvements totaux.

Tableau 4. Volume d'eau prélevé annuellement (m³/an) par type de prise d'eau

Bassin versant	Type de prise d'eau						
	Aqueduc	Bassin	Cours d'eau	Pointe	Puits artésien	Puits surface	Total
Chaloupe		90 907	130 512	360			221 779
Chaput		74 375					74 375
Grand Fossé		374 900					374 900
L'Assomption		561 804	38 060				599 864
Point-du-Jour		1 732 575	376 709	6 023		1 987	2 117 293
Saint-Antoine		365 632	113 790				479 422
Saint-Jean		649 806	919 338	1 901			1 571 045
Saint-Joseph		904 380	463 406	5 905			1 373 691
Sud-Ouest		655 966		61			656 027
Hors zone d'étude ¹			189 088				189 088
Total (m³)		5 410 344	2 230 903	14 250		1 987	7 657 484
Total (%)		71%	29%	0%		0%	100%

¹ 3 prises d'eau: 1 dans la rivière l'Assomption et 2 dans le ruisseau St-Thomas

Pour ce qui est des systèmes d'irrigation, les systèmes à gicleurs, à enrouleurs et à pivot sont prédominants. Pour certains sites de prélèvements d'eau, plus d'une technologie d'irrigation est utilisée, donc regroupée sur la même ligne (ex. : Pivot/enrouleur). Le tableau 5 ci-dessous résume les technologies d'irrigation utilisées et la superficie moyenne annuelle irriguée avec chacune de celle-ci.

Tableau 5. Technologie d'irrigation utilisée et superficie annuellement irriguée

Technologie d'irrigation utilisée	Nombre de site de prélèvement	Superficie (ha)	Superficie (%)
Canon	1	3	0%
Gicleurs/Enrouleur/Goutte a goutte	1	7	0%
Goutte a goutte	1	6	0%
Pivot	1	9	0%
Pivot/Rampe	1	70	2%
Rampe	1	2	0%
Gicleurs/Goutte à goutte	10	115	4%
Rampe/Enrouleur/Gicleur	11	145	5%
Enrouleur	30	367	13%
Pivot/Enrouleur	32	957	34%
Gicleurs/Enrouleur	48	431	15%
Gicleurs	49	699	25%
Non défini	1	38	1%
Site de prélèvement autre que irrigation ou pour irrigation mais non utilisé actuellement	22		
Total	209	2 847	100%

Finalement, la hauteur d'irrigation moyenne annuelle par culture est présentée au tableau 6 avec une moyenne, pour toutes les cultures confondues, de 223 mm/an (22,3 cm/an).

Tableau 6. Hauteur d'irrigation moyenne annuelle par culture

Cultures	Hauteur d'irrigation moyenne annuelle (mm/an)
Maraîcher	32
Courges	75
Maïs sucré	75
Vigne	114
Canneberges	139
Petits fruits	197
Asperge	223
Pommes de terre	223
Gazon	274
Arbres/arbustes	603
Moyenne pondérée	223

Lors des rencontres individuelles avec les producteurs, ceux-ci ont été questionnés sur les manques d'eau dans le passé. Quatre producteurs sur 19 ont mentionné ne jamais avoir subi de problème de manque d'eau (production maraîchère diversifiée et petits fruits), 8 n'ont pas manqué d'eau, mais ont craint d'en manquer, car les niveaux d'eau dans les bassins d'irrigation et les cours d'eau étaient très bas (production maraîchère diversifiée, pommes de terre et petits fruits) et finalement, 7 producteurs ont déjà manqué d'eau dans le passé, car les niveaux d'eau dans les bassins d'irrigation et les cours d'eau étaient trop bas pour faire des prélèvements (production de pommes de terre majoritairement). Quelques producteurs ont mentionné craindre les changements climatiques à venir d'ici 2050 avec l'augmentation des chaleurs estivales ainsi que le prolongement des épisodes de canicule. Ils estiment devoir augmenter la fréquence d'irrigation et ainsi augmenter leur prélèvement d'eau d'environ 25% dans le futur.

Le tableau 7 suivant résume le nombre de producteurs par lieu de la prise d'eau. Dix-huit producteurs prélèvent en cours d'eau, dont 6 prélèvent dans un seul cours d'eau et 12 prélèvent dans plus d'un cours d'eau. Trente producteurs prélèvent en bassin d'irrigation, dont 4 dans un seul bassin et 26 dans plus d'un bassin. Deux producteurs prélèvent en cours d'eau seulement, 14 producteurs prélèvent en bassin d'irrigation seulement et 16 producteurs prélèvent en cours d'eau et en bassin d'irrigation.

Tableau 7. Nombre de producteurs par lieu de la prise d'eau

Nombre de prise en cours d'eau	Nombre de prise en bassin d'irrigation	Nombre de producteur	Nombre de producteur qui prélèvent dans un seul cours d'eau	Nombre de producteur qui prélèvent dans plus d'un cours d'eau	Nombre de producteur qui prélèvent dans un seul bassin	Nombre de producteur qui prélèvent dans plus d'un bassin	Nombre de producteur qui prélèvent en cours d'eau seulement	Nombre de producteur qui prélèvent en bassin d'irrigation seulement	Nombre de producteur qui prélèvent dans au moins un cours d'eau et au moins un bassin
1	0	1	1				1		
>1	0	1		1			1		
0	1	1			1			1	
0	>1	13				13		13	
1	1	1	1		1				1
1	>1	4	4			4			4
>1	1	2		2	2				2
>1	>1	9		9		9			9
TOTAL		32	6	12	4	26	2	14	16

Situation des prélèvements d'eau en cours d'eau :

Le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) interprète ses différents règlements comme quoi les prélèvements en cours d'eau ne doivent en aucun temps excéder 15 % du débit du cours d'eau. Suivant cette interprétation, les débits potentiellement prélevable durant la période estivale sont très faibles puisque les débits des cours d'eau sont au plus bas (débit d'étiage). De plus, selon son interprétation, cet indicateur seuil de pression des prélèvements d'eau doit tenir compte de l'ensemble des prélèvements en amont.

Dans notre secteur d'étude, pour les mois de juillet et août, si on compare les prélèvements théoriques des producteurs agricoles aux débits d'étiage « naturels » calculés (débit mesuré par l'IRDA en 2021 + les prélèvements théoriques des producteurs caractérisés par la FUPAL), les prélèvements d'eau sont nettement au-dessus du 15 % visé par le MELCCFP. En juillet, les prélèvements théoriques des producteurs sont de 44 %, 53 % et 30 % respectivement pour les cours d'eau Saint-Joseph, Saint-Jean (et Saint-Antoine) et Point-du-Jour, et de 83 %, 75 % et 82 % pour le mois d'août (tableau 8).

Tableau 8. Estimation des débits d'étiage « naturels » des cours d'eau

2021		St-Joseph	Sud-Ouest	St-Jean + St-Antoine	Point-du- Jour
Mai	Débit d'étiage mesuré par l'IRDA en 2021 (m ³ /s)	0,414	0,172	0,640	0,553
	Débit d'étiage "naturel" calculé (m ³ /s) (IRDA + prélèvement théorique des producteurs)			0,651	0,555
	% prélevé par les producteurs			1,7%	0,4%
Juillet	Débit d'étiage mesuré par l'IRDA en 2021 (m ³ /s)	0,114	0,040	0,157	0,130
	Débit d'étiage "naturel" calculé (m ³ /s) (IRDA + prélèvement théorique des producteurs)	0,202		0,336	0,185
	% prélevé par les producteurs	44%		53%	30%
Août	Débit d'étiage mesuré par l'IRDA en 2021 (m ³ /s)	0,010	0,015	0,026	0,007
	Débit d'étiage "naturel" calculé (m ³ /s) (IRDA + prélèvement théorique des producteurs)	0,060		0,104	0,038
	% prélevé par les producteurs	83%		75%	82%

Suivant l'interprétation du MELCCFP (respect du 15% du débit), il devient alors très problématique pour les producteurs agricoles de respecter ce seuil lors de leur demande d'autorisation de prélèvement d'eau au MELCCFP.

Situation des prélèvements d'eau à partir des bassins d'irrigation :

La réglementation du MELCCFP pour les prélèvements d'eau souterraine est beaucoup moins précise que pour les prélèvements d'eau en cours d'eau. Lors de sa demande d'autorisation de prélèvement d'eau souterraine, le producteur doit fournir un rapport technique signé par un professionnel. Ce rapport technique doit minimalement :

- Définir le scénario de prélèvement;
- Démontrer le caractère raisonnable du prélèvement;
- Évaluer les effets du prélèvement sur les autres usagers des propriétés voisines et sur les milieux humides à proximité et si des effets sont constatés, les moyens pour minimiser les impacts;
- Démontrer que les prélèvements ne causent aucun impact négatif significatif, individuel ou cumulatif, sur la qualité ou la quantité des eaux du bassin et que des efforts sont déployés pour conserver l'eau;

À cette étape-ci du projet, il est donc plus difficile de différencier les prélèvements problématiques de ceux qui le sont moins. De plus, selon le ministère, la distance entre le bassin d'irrigation et le milieu humide à proximité ne constitue pas un critère pour accepter ou refuser une demande d'autorisation de prélèvement. Néanmoins, en classant les bassins d'irrigation selon leur distance par rapport à un milieu humide à proximité (à partir de la cartographie détaillée des milieux humides des zones habitées du sud du Québec (juillet 2022)), on peut déjà prioriser nos actions (Tableau 9).

Tableau 9. Synthèse de la caractérisation des prélèvements d'eau en bassin d'irrigation

Lieu de la prise d'eau, distance d'un milieu humide cartographié (2022)	Nombre de producteur	Nombre de prise d'eau	Superficie moyenne irriguée annuellement (ha)	Volume moyen prélevé annuellement (m ³)	Volume moyen prélevé annuellement par ha (m ³ /ha)	Superficie des bassins (ha)	Prélèvement (%)
Bassin 0m-MH2022 ¹	22	64	841	1 955 593	2 325	47	36%
Bassin 0-30m-MH2022 ²	25	53	687	2 025 093	2 948	53	37%
Bassin >30m-MH2022 ³	19	34	455	1 429 659	3 142	29	26%
Total bassin d'irrigation	30	151	1 983	5 410 345	2 728	129	100%

¹ Bassin 0m-MH2022: Bassin d'irrigation à 0 mètre d'un milieu humide (donc en lien direct avec la tourbière) selon la cartographie détaillée des milieux humides des zones habitées du sud du Québec (juillet 2022) (Canards illimités Canada)

² Bassin 0-30m-2022MH: Bassin d'irrigation entre 0 et 30 mètres d'un milieu humide selon la cartographie détaillée des milieux humides des zones habitées du sud du Québec (juillet 2022) (Canards illimités Canada)

³ Bassin >30m-MH2022: Bassin d'irrigation à plus de 30 mètres d'un milieu humide selon la cartographie détaillée des milieux humides des zones habitées du sud du Québec (juillet 2022) (Canards illimités Canada)

Les prélèvements d'eau les plus critiques sur le territoire :

À la lumière de ces informations, il devient plus évident que certains types de prélèvement d'eau sont plus à risque d'être problématiques lors des demandes d'autorisation des producteurs agricoles, soit les prélèvements en cours d'eau et les prélèvements dans les bassins d'irrigation ayant un lien direct avec un milieu humide (0m-MH2022). Ces deux catégories de prélèvement d'eau représentent plus de 55 % (4,2 M m³) des prélèvements sur le territoire du projet SCELANEAU. (Tableau 10)

Tableau 10. Prélèvements d'eau les plus critiques

Lieu de la prise d'eau, distance d'un milieu humide cartographié (2022)	Nombre de producteur	Nombre de prise d'eau	Superficie moyenne irriguée annuellement (ha)	Volume moyen prélevé annuellement (m ³)	Volume moyen prélevé annuellement par ha (m ³ /ha)	Superficie des bassins (ha)	Prélèvement (%)
Cours d'eau ¹	18	45	864	2 230 903	2 581		29%
Bassin 0m-MH2022 ²	22	64	841	1 955 593	2 325	47	26%
Bassin 0-30m-MH2022 ³	25	53	687	2 025 093	2 948	53	27%
Bassin >30m-MH2022 ⁴	19	34	455	1 429 659	3 142	29	19%
Total bassin d'irrigation	30	151	1 983	5 410 345	2 728	129	71%
Grand total	32	196	2 847	7 641 248	2 684		100%
					268 mm/ha/an		
Les plus critiques	40	109	1 705	4 186 496	2 455	47	55%

¹ 3 prises d'eau à l'extérieur de la zone d'étude, mais qui irriguent des terres dans la zone d'étude.

² Bassin 0m-MH2022: Bassin d'irrigation à 0 mètre d'un milieu humide (donc en lien direct avec la tourbière) selon la cartographie détaillée des milieux humides des zones habitées du sud du Québec (juillet 2022) (Canards illimités Canada)

³ Bassin 0-30m-2022MH: Bassin d'irrigation entre 0 et 30 mètres d'un milieu humide selon la cartographie détaillée des milieux humides des zones habitées du sud du Québec (juillet 2022) (Canards illimités Canada)

⁴ Bassin >30m-MH2022: Bassin d'irrigation à plus de 30 mètres d'un milieu humide selon la cartographie détaillée des milieux humides des zones habitées du sud du Québec (juillet 2022) (Canards illimités Canada)

Le tableau 11 suivant détaille le nombre de prises d'eau, le volume prélevé (m³) et la superficie irriguée par bassin versant.

Tableau 11. Nombre de prise d'eau, volume prélevé (m³) et superficie irriguée (ha) par bassin versant

Lieu de la prise d'eau, distance d'un milieu humide cartographié (2022)	Point-du-Jour			St-Jean			St-Joseph			Sud-Ouest		
	Nb prise d'eau	Volume prélevé (m ³)	Superficie annuellement irriguée (ha)	Nb prise d'eau	Volume prélevé (m ³)	Superficie annuellement irriguée (ha)	Nb prise d'eau	Volume prélevé (m ³)	Superficie annuellement irriguée (ha)	Nb prise d'eau	Volume prélevé (m ³)	Superficie annuellement irriguée (ha)
Cours d'eau	13	376 709	167	18	1 033 128	313	7	463 406	214			
Cours d'eau - Hors zone étude ¹												
0 m-MH2022 ²	15	261 216	106	9	174 938	75	8	630 659	269	12	458 266	197
0-30 m-MH2022 ³	27	1 146 472	359	14	490 821	161	1	33 596	15	4	173 312	77
>30 m-MH2022 ⁴	15	324 887	110	10	349 679	127	5	240 125	64	1	24 388	7
Total	70	2 109 283	742	51	2 048 566	677	21	1 367 786	563	17	655 966	281

Lieu de la prise d'eau, distance d'un milieu humide cartographié (2022)	Autre bassin versant			Hors zone d'étude			Total			Total		
	Nb prise d'eau	Volume prélevé (m ³)	Superficie annuellement irriguée (ha)	Nb prise d'eau	Volume prélevé (m ³)	Superficie annuellement irriguée (ha)	Nb prise d'eau	Volume prélevé (m ³)	Superficie annuellement irriguée (ha)	Nb prise d'eau	Volume prélevé (m ³)	Superficie annuellement irriguée (ha)
Cours d'eau	4	168 572	70				42	2 041 815	765	45	2 230 903	864
Cours d'eau - Hors zone étude ¹				3	189 088	99	3	189 088	99			
0 m-MH2022 ²	20	430 514	193				64	1 955 593	841	151	5 410 344	1 983
0-30 m-MH2022 ³	7	180 892	76				53	2 025 093	687			
>30 m-MH2022 ⁴	3	490 580	147				34	1 429 659	455			
Total	34	1 270 558	486	3	189 088	99	196	7 641 247	2 847	196	7 641 247	2 847

¹ 3 prises d'eau à l'extérieur de la zone d'étude, mais qui irriguent des terres dans la zone d'étude.

² Bassin 0m-MH2022: Bassin d'irrigation à 0 mètre d'un milieu humide (donc en lien direct avec la tourbière) selon la cartographie détaillée des milieux humides des zones habitées du sud du Québec (juillet 2022) (Canards illimités Canada)

³ Bassin 0-30m-MH2022: Bassin d'irrigation entre 0 et 30 mètres d'un milieu humide selon la cartographie détaillée des milieux humides des zones habitées du sud du Québec (juillet 2022) (Canards illimités Canada)

⁴ Bassin >30m-MH2022: Bassin d'irrigation à plus de 30 mètres d'un milieu humide selon la cartographie détaillée des milieux humides des zones habitées du sud du Québec (juillet 2022) (Canards illimités Canada)

DIFFUSION DES RÉSULTATS

Estimer le nombre de producteurs agricoles rejoints par la diffusion des résultats du projet.	32 producteurs agricoles
---	--------------------------

Une première rencontre d'information de manière virtuelle a eu lieu au printemps 2021 avec les producteurs agricoles pour expliquer le projet, les objectifs et la démarche. Seulement cinq producteurs étaient présents lors de cette rencontre.

Par la suite, deux rencontres en présentiels de producteurs ont eu lieu au printemps 2022 (annexe 5) et 2023 (annexe 6) pour exposer l'avancement du projet et les résultats de recherche. Lors de ces rencontres, 21 et 24 producteurs respectivement étaient présents. Les producteurs devront, dès 2025, déposer au MELCCFP leur demande de prélèvement d'eau et ils sont inquiets d'essuyer un refus de prélèvement du ministère. On sent beaucoup de stress des producteurs face à cette situation et ils auraient aimé avoir des solutions avant la fin du projet actuel, alors que ça ne sera pas le cas.

Une dernière rencontre aura lieu avec les producteurs au printemps 2024 (après dépôt de ce rapport) pour clore le projet et, espérons-le, leur annoncer une phase II du projet SCELANEAU (demande de projet déposé en décembre 2023 au MAPAQ et au MELCCFP).

Deux rencontres du comité aviseur ont eu lieu (2021 et 2022) ainsi qu'une rencontre (2022) du comité technique. Ces rencontres ont permis d'expliquer le projet, les objectifs et la démarche ainsi que l'avancement du projet. Une dernière rencontre du comité aviseur aura lieu au printemps 2024 pour clore le projet et, espérons-le, leur annoncer une phase II du projet SCELANEAU (demande de projet déposé en décembre 2023 au MAPAQ et au MELCCFP).

En juin 2022, une première rencontre avec des représentants du MAPAQ et du MELCCFP du régional et du provincial a été sollicitée. Cette rencontre était pour discuter de la réglementation sur les prélèvements d'eau et sur les solutions possibles d'approvisionnement en eau des producteurs. Cette rencontre a aussi été l'occasion de discuter du stress vécu par les producteurs sur les demandes d'autorisation à venir en 2025. À la suite de cette rencontre, le MELCCFP a répondu à plusieurs de nos questions par écrit (voir annexe 7: Réponses du MELCCFP aux questions, projet SCELANEAU). Cinq autres rencontres ont eu lieu en 2023 avec le MELCCFP provincial et le MAPAQ provincial et régional (pour 4 rencontres) pour discuter de la suite du projet SCELANEAU. Les représentants du MELCCFP et du MAPAQ ont fait preuve d'ouverture sur une potentielle suite au projet actuel. En décembre 2023, des demandes de projet ont été déposées au MAPAQ et au MELCCFP pour une phase II du projet SCELANEAU.

Sur les trois années du projet, plus d'une vingtaine de rencontres de l'équipe de travail (FUPAL, Sylvestre Delmotte, UQAM, IRDA, McGill) ont été réalisées pour assurer le bon déroulement du projet. Quatre visites sur le terrain avec l'équipe de travail ont aussi été réalisées chez des producteurs au début du projet pour prendre connaissance du territoire, discuter avec les producteurs et choisir les sites pour l'installation des piézomètres de l'UQAM.

Une présentation du projet SCELANEAU a été faite le 7 décembre 2023 lors des journées horticoles de Saint-Rémi. Près d'une centaine de producteurs, intervenants et conseillers étaient présents. Cette conférence a permis de présenter les objectifs du projet, les enjeux de la tourbière de Lanoraie et des producteurs agricoles ainsi qu'un résumé des connaissances

acquises. La présentation a aussi permis d'exposer le point de vue des producteurs agricoles et le stress vécu concernant la précarité des prélèvements d'eau dans le futur. La présentation est en annexe 8.

Une présentation du projet SCELANEAU a été faite le 5 avril 2024 au comité tourbière de Lanoraie. Vingt-trois personnes siègent à ce comité, dont plusieurs des ministères régionaux de l'Environnement, de la Faune et de l'Agriculture, ainsi que des personnes des organismes de bassins versants (OBV) et ZIP, des municipalités et MRC et autres organismes de conservation de la région. Cette conférence a permis de présenter les objectifs du projet, les enjeux de la tourbière de Lanoraie et des producteurs agricoles ainsi qu'un résumé des connaissances acquises. La présentation a aussi permis d'exposer différents scénarios d'approvisionnement en eau et piste de solution. La présentation est en annexe 9.

SYNTHÈSE ET CONCLUSION

Ce projet a permis de répondre à certaines questions sur les volumes d'eau prélevée par les producteurs agricoles, sur le comportement des eaux de surface et souterraine, sur les besoins en eau d'irrigation de certaines cultures en années historiques et futures ainsi qu'à une évaluation préliminaire de système d'adduction d'eau pour cinq secteurs de gestion de l'eau. Les connaissances acquises permettront aux personnes concernées de mieux comprendre la dynamique hydrologique et hydrogéologique du complexe tourbeux et de prendre les meilleures décisions pour le futur.

À la suite du projet SCELANEAU, plusieurs questions restent en suspens et la recherche doit se poursuivre pour mieux comprendre la dynamique de l'eau du milieu et répondre à ces questions. La recherche doit donc se poursuivre pour développer davantage les connaissances :

- Documenter avec plus de précision les prélèvements réels des producteurs avec des équipements de mesure;
- Documenter les prélèvements des autres préleveurs (industries, commerces, institutions, municipalités, citoyens, etc.);
- Documenter sur une plus longue période les données d'humidité du sol pour améliorer la calibration du modèle AquaCrop;
- Calibrer le modèle AquaCrop pour plusieurs cultures et sur plusieurs champs;
- Récolter des données supplémentaires (indice foliaire, biomasse cumulée, rendement final, etc.) pour alimenter le modèle AquaCrop pour renforcer les prédictions du modèle;
- Documenter la réponse au stress hydrique des plantes à des régimes d'irrigation spécifiques;
- Documenter sur une plus longue période l'hydrométrie des cours d'eau et l'hydrogéologie de la nappe d'eau;
- Produire un modèle d'écoulement souterrain sur l'ensemble du complexe tourbeux de Lanoraie;
- Ce modèle doit coupler les flux de surface et souterrains (p.ex. SWAT-MODFLOW) pour simuler les effets des pompages dans les cours d'eau et dans les bassins d'irrigation;
- Faire une analyse écohydrologique de l'effet des baisses de charges dans la tourbière sur la croissance de la végétation ligneuse pour comprendre les relations de causalité, ce qui pourrait mener à l'établissement de seuils de rabattements à ne pas dépasser.
- Évaluer de façon plus précise le ou les systèmes d'aqueduc à implanter (topographie, tracé, longueur, matériaux, système de pompage, enfouissement, qualité de l'eau, impact environnemental, norme réglementaire, etc.);
- Faire une analyse technico-économique du ou des aqueducs en tenant compte des coûts de construction initiaux, mais également des coûts d'entretien et des dépenses opérationnelles.

PERSONNE-RESSOURCE POUR INFORMATION

Dominic Brochu, agr., Agent en agroenvironnement
Fédération de l'UPA de Lanaudière
110, rue Beaudry Nord
Joliette (Québec) J6E 6A5
Tél. : 450-753-7486, poste 238
Télec. : 450-759-7610
dbrochu@upa.qc.ca
<https://lanaudiere.upa.qc.ca/>

REMERCIEMENTS

Ce projet a été réalisé en vertu du Programme d'appui à la lutte contre les changements climatiques en agriculture et il a bénéficié d'une aide financière du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation dans le cadre du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques.

D'une durée de trois ans (2021 à 2024), il est coordonné par la Fédération de l'Union des Producteurs Agricoles de Lanaudière (Dominic Brochu, agr. et Charles Bergeron, agr.) et bénéficie de la participation de Sylvestre Delmotte, (agr. Ph.D., consultant), Marie Laroque (Pr. UQAM, spécialiste des eaux souterraines), Simon Ricard (ing., Ph.D., chercheur à l'IRDA, spécialiste des eaux de surface), Chandra Madramootoo (ing., Pr. à l'université McGill, spécialiste de l'irrigation et du drainage). Le projet bénéficie des orientations d'un comité aviseur et technique composé des coordonnateurs, des partenaires, de professionnels du MAPAQ et du MELCC provincial et régional et du MFFP provincial, de représentants de producteur de Lanaudière (pommes de terre, asperges, canneberges, maraîcher), d'aménagistes de trois MRC (Joliette, d'Autray et L'Assomption), de représentants des OBV CARA et Zone Bayonne, d'un représentant d'un club en agroenvironnement (Services AgriXpert), d'une représentante de la Société pour la conservation de la tourbière de Lanoraie, d'un ingénieur fournisseur de service-conseil en irrigation (Riego) et de représentants de l'IQDHO.

ANNEXE 1 - Rapport final de l'IRDA

RAPPORT FINAL

ÉVALUATION DE SCÉNARIOS DE GESTION INTÉGRÉE ET SOUTENABLE DE L'EAU DANS LE COMPLEXE TOURBEUX DE LANORAIE (SCELANEAU) - DISPONIBILITÉ DES EAUX DE SURFACE

Responsable scientifique : SIMON RICARD, ing., Ph.D., Chercheur IRDA

Collaborateurs : Arianne BLAIS-GAGNON, William HUERTAS, Neysa Mireille SAWADOGO, Flora UMUHIRE, Michael OSINA, Colline GOMBAULT et Aubert MICHAUD.

Rapport présenté au MAPAQ dans le cadre du Programme d'appui à la lutte contre les changements climatiques en agriculture (PALCCA)

Janvier 2024

Projet IRDA #400245



À l'IRDA, on **collabore**, on se **questionne**, on **explore** et on **progresses** ensemble dans la même direction : celle d'une agriculture saine, dynamique et performante.

Nous sommes des **scientifiques**, mais aussi des **gens de terrain** qui **collaborent** avec l'ensemble du milieu agricole.

Notre mission consiste à innover en agroenvironnement pour créer ensemble la production agricole de demain. Consulter le www.irda.qc.ca pour en connaître davantage sur l'Institut et ses activités.

Question ou commentaire

Simon Ricard, ing., Ph.D.

Chercheur en hydrologie

Responsable scientifique et auteur principal

T : 418 64302380, poste 691

simon.ricard@irda.qc.ca

Auteur du rapport	Équipe de réalisation
Simon RICARD	Arianne BLAIS-GAGNON William HUERTAS Neysa Mireille SAWADOGO Flora UMUHIRE Michael OSINA Colline GOMBAULT Aubert MICHAUD

Merci à notre partenaire financier

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à une aide financière accordée par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ).



Ce rapport peut être cité comme suit :

Ricard, S., A. Blais-Gagnon, W. Huertas, N. M. Sawadogo, F. Umuhire, M. Osina, C. Gombault et A. Michaud. 2023. Évaluation de scénarios de gestion intégrée et soutenable de l'eau dans le complexe tourbeux de Lanoraie (Scélaneau) – Disponibilité des eaux de surface. Rapport final. IRDA et partenaires. 20 pages.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements.....	i
1 Introduction.....	1
2 Suivi hydrométrique	2
3 Modélisation.....	5
3.1 Modèle hydrologique SWAT.....	5
3.2 Couches géomatiques	5
3.3 Données météorologiques	9
3.4 Pratiques culturales.....	9
3.5 Simulation de l’irrigation	9
3.6 Calibration des paramètres	10
3.7 Disponibilité des eaux de surface.....	12
3.8 Projection en changements climatiques	14
4 Conclusion	17
RÉFÉRENCES	19
ANNEXE A - Suivi hydrométrique incluant 2023	21
ANNEXE B - Propriétés pédologiques des sols modélisés	22
ANNEXE C - Données météorologiques recueillies à la station l’Assomption (ECCC)	23
ANNEXE D - Paramètres optimisés du modèle SWAT	24
ANNEXE E – Relations empiriques entre le $Q_{2,7}$ et la superficie du bassin versant.....	25
ANNEXE F – Variables NA-CORDEX brutes et post-traitées	26

REMERCIEMENTS

Le projet « Évaluation de scénarios de gestion intégrée et soutenable de l'eau dans le complexe tourbeux de Lanoraie » (SCELANEAU) est financé par le MAPAQ dans le cadre du Programme d'appui à la lutte contre les changements climatiques en agriculture (PALCCA). D'une durée de trois ans (2021 à 2024), il est coordonné par la Fédération de l'Union des Producteurs Agricoles de Lanaudière (Dominic Brochu, agr. et Charles Bergeron, agr.) et bénéficie de la participation de Sylvestre Delmotte, (agr. Ph.D., consultant), Marie Laroque (Pr. UQAM, spécialiste des eaux souterraines), Simon Ricard (ing., Ph.D., chercheur à l'IRDA, spécialiste des eaux de surface), Chandra Madramootoo (ing., Pr. à l'université McGill, spécialiste de l'irrigation et du drainage). Le projet bénéficie des orientations d'un comité technique composé des coordonnateurs, des partenaires, de professionnels du MAPAQ provincial et régional, d'agents du MELCC et du MFFP provincial, de représentants des producteurs de pommes de terre de Lanaudière, d'aménagistes de trois MRC (Joliette, d'Autray et L'Assomption) et de représentants des OBV CARA et Zone Bayonne.

1 INTRODUCTION

Les objectifs du projet SCELANEAU sont d'identifier des solutions pour garantir l'approvisionnement en eau pour l'irrigation des cultures, tout en conciliant cet usage avec ceux des autres usagers et en garantissant le maintien des fonctions hydrologiques du complexe tourbeux de Lanoraie tout en tenant compte des changements climatiques. La contribution spécifique de l'IRDA vise à caractériser la disponibilité des eaux de surface par :

- i. la mise en place d'un suivi hydrométrique sur les cours d'eau Bras-du-Sud-Ouest, Saint-Joseph, Saint-Jean et Point-du-Jour;
- ii. l'estimation de la disponibilité des eaux de surface à l'aide de la modélisation hydrologique;
- iii. la projection de la disponibilité des eaux de surface en contexte de changements climatiques.

2 SUIVI HYDROMÉTRIQUE

Quatre stations hydrométriques (Figure 1) ont été installées par l'IRDA les 8 et 9 avril 2021 aux environs des exutoires de quatre ruisseaux tributaires de la tourbière :

1. Ruisseau Point-du-jour (L'Assomption, 8114 ha)
2. Rivière Saint-Jean (Lavaltrie, 7517 ha)
3. Rivière Saint-Joseph (Lanoraie, 4126 ha)
4. Ruisseau Bras-du-Sud-Ouest (Saint-Thomas, 851 ha)

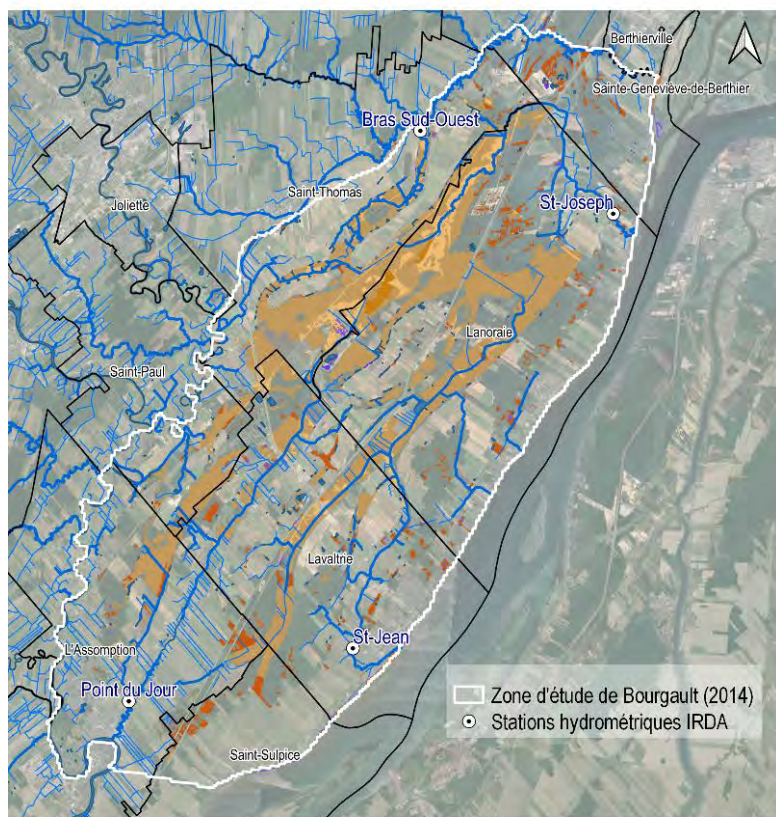


Figure 1. Localisation des stations hydrométriques dans la zone d'étude.

Chaque station comprend une sonde à pression HOBO (suivi des hauteurs d'eau) enregistrant les mesures au pas de temps de 15 minutes. Les mesures de débits périodiques au moulinet hydrologique permettent d'établir la courbe de tarage. Le calage de la courbe de tarage se fait à partir de données de débit prises à différentes périodes de l'année. Dans le cadre du projet et considérant les budgets disponibles, les mesures de débit ont été synchronisées avec les visites pour l'entretien de sondes. La campagne n'a donc pas l'objet d'une emphase particulière, par exemple sur les périodes d'étiage ou de crue. Ce dispositif de suivi hydrologique permet de documenter dans le temps l'évolution des débits et de qualifier l'origine des écoulements (ruissellement de surface et souterrain). Pour la période 2021-2022, 19 campagnes de mesures au moulinet hydrologique ont été

réalisées par les équipes de l'UQAM (12) et de l'IRDA (7). Les quatre stations profitent d'un suivi en continu du printemps 2021 à l'automne 2023, grâce à un dispositif de sondes multiparamétriques YSI submergées (suivi des conductivités électriques).

Les suivis hydrométriques aux stations se sont poursuivis tels que prévus tout au long du projet, soit du printemps 2021 à l'automne 2023. Le Tableau 1 recense les débits mesurés lors des visites ponctuelles de jaugeage réalisées sur la période 2021-2022. Le suivi hydrométrique s'est poursuivi en 2023, mais n'a pu être valorisé pour la modélisation hydrologique. La mise à jour des courbes de tarage et le suivi hydrométrique incluant l'année 2023 est présenté à l'annexe A.

Tableau 1. Débits mesurés (m³/s) lors des sorties de jaugeages sur la période 2021-2022*.

Date	Échantillonneur	Saint-Jean	Saint-Joseph	Bras Sud-Ouest	Point du jour
2021-04-08	IRDA	1,549	1,172	0,255	1,802
2021-05-13	UQAM	0,640	0,414	0,172	0,553
2021-05-13	IRDA	0,631	0,443	0,106	0,571
2021-07-23	UQAM	0,157	0,114	0,040	0,130
2021-08-06	UQAM	0,026	0,010	0,015	0,056
2021-08-10	IRDA	0,030	0,051	0,027	0,071
2021-09-14	UQAM	0,104	0,082	0,036	0,124
2021-09-28	UQAM	0,069	0,128	0,064	0,169
2021-11-01	UQAM	1,902	0,756	0,269	1,283
2021-11-16	UQAM	1,212	0,546	0,206	1,018
2021-11-30	IRDA	0,513	0,346	0,132	0,441
2022-04-01	IRDA	2,571	1,512	0,390	4,379
2022-04-08	UQAM	11,816	5,630	0,000	12,253
2022-04-22	UQAM	-	2,350	0,447	4,058
2022-06-16	IRDA	0,425	0,403	0,107	0,625
2022-10-13	IRDA	0,494	0,385	0,124	0,448
2022-11-16	UQAM	1,022	-	0,146	1,232
2022-11-22	UQAM	0,699	0,465	0,146	0,726
2022-12-08	UQAM	2,575	2,138	0,340	4,127

* Période utilisée pour l'exercice de modélisation.

Les mesures de jaugeages ont permis de monter les courbes de tarage hauteur-débit propre à chaque station et d'en estimer par la suite, avec les données de hauteur en continu des sondes HOB0, le débit pour chaque instant donné. La Figure 2 présente les hydrogrammes aux quatre stations sur la période valorisée par l'exercice de modélisation.

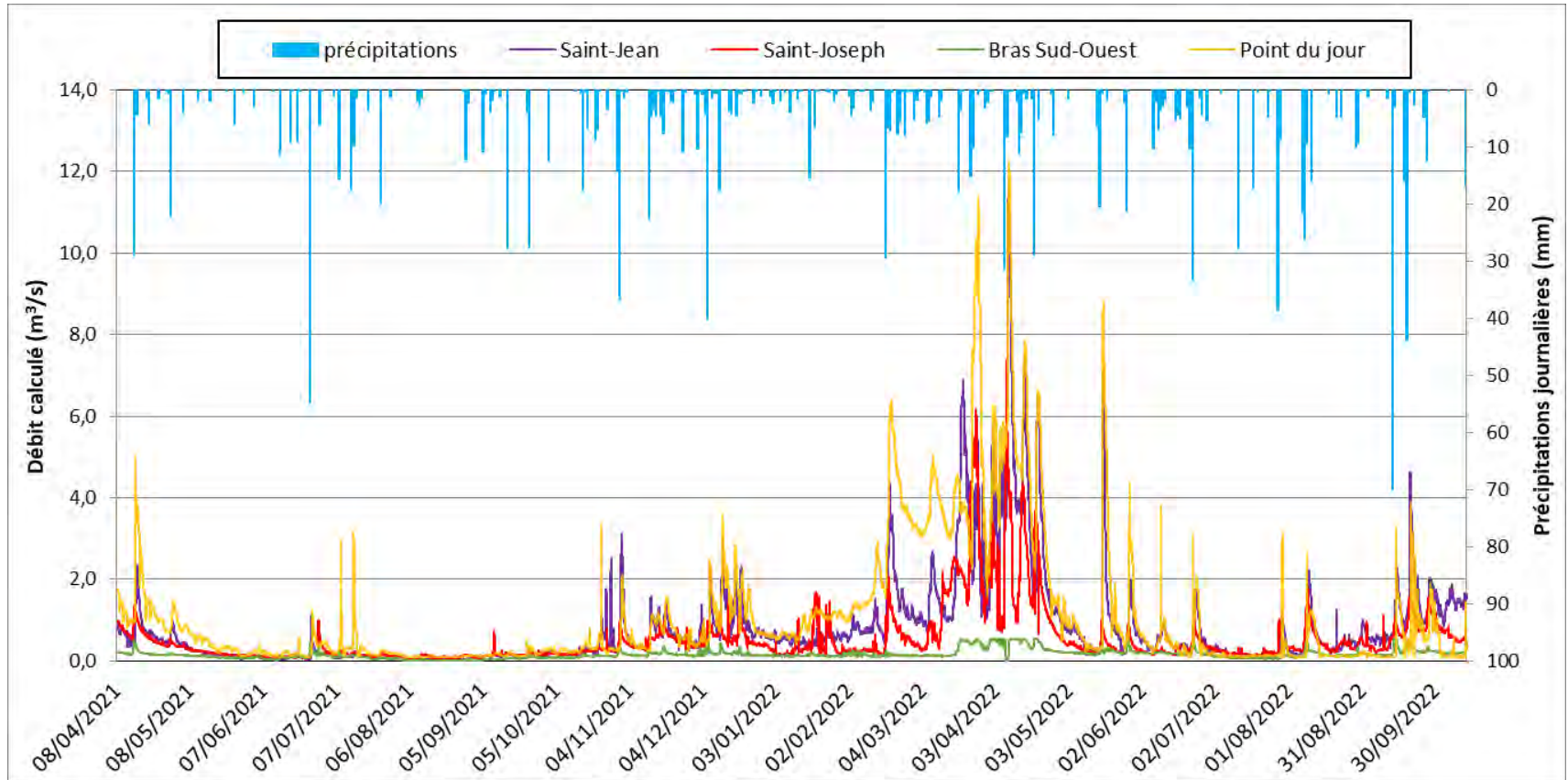


Figure 2. Hydrogrammes à chacune des stations hydrométriques pour la période 2021-2022.

3 MODÉLISATION

3.1 MODÈLE HYDROLOGIQUE SWAT

Le modèle hydrologique SWAT (Arnold et al., 2011) est un outil largement utilisé en Amérique du Nord et en Europe pour simuler les processus agro-hydrologiques à l'échelle d'un bassin versant. Ce modèle déterministe et semi-distribué simule, de manière simplifiée et sur une base journalière, les processus du cycle de l'eau pour chaque unité de réponse hydrologique (URH). Il nécessite le traitement de différentes couches géomatiques (topographie, occupation du territoire, pédologie) et le formatage de données météorologique en entrée. Les paramètres du modèle sont typiquement calibrés pour garantir une représentation jugée optimale des conditions agro-hydrologiques observées sur le bassin versant. Le modèle SWAT permet notamment de reconstituer la réponse hydrologique historique en contexte de changements climatiques, en fonction de scénarios d'occupation du sol et de pratiques agricoles. Il permet aussi de simuler les prélèvements en rivière pour subvenir au besoin pour l'irrigation de différentes cultures.

3.2 COUCHES GÉOMATIQUES

La Figure 3 présente le modèle numérique de terrain (MNT) utilisé pour mettre en place le modèle hydrologique SWAT. Ces données d'une résolution de 1m sont issues de relevés LIDAR colligés par le ministère des Ressources naturelles et des Forêts et rendus disponibles sur Données Québec (MRNF, 2023). Pour les fins du présent projet, le MNT a été rééchantillonné à la résolution de 5m puis corrigé pour traiter l'effet des ponts et ponceaux sur l'écoulement de l'eau. Les exutoires des bassins versants sont localisés aux stations hydrométriques. Le découpage des sous-bassins est effectué à partir du relief, du réseau hydrométrique et d'un seuil de drainage et de densification de ce réseau (seuils par défaut).

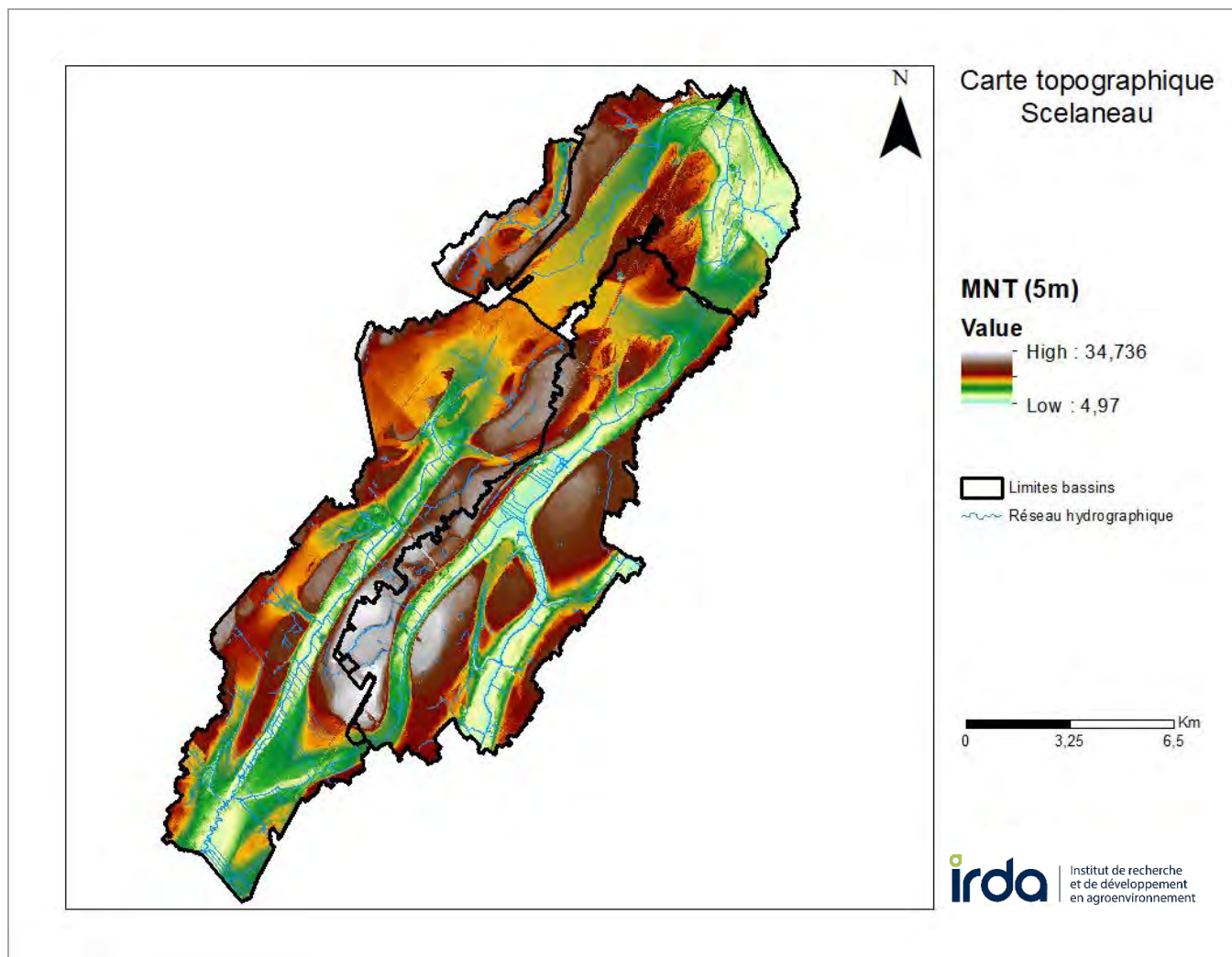


Figure 3. Modèle numérique de terrain de la zone d'étude.

La Figure 4 décrit l'occupation du territoire pour l'année de référence 2021. Cette carte est produite à partir des couches géospatiales suivantes : la Base de Données des Parcelles et Productions Agricoles du Québec (FADQ, 2022); les couches des milieux humides (Canard Illimité, 2020); le réseau hydrologique surfacique du Québec (GRHQ, 2016), incluant les plans d'eau; le réseau routier sur lequel une zone tampon de trois (3) mètres a été créée (MNR, 2018); la couche écoforestière (MFFP, 2020). La couche est rastérisée et chaque pixel est associé à une classe d'occupation du sol correspondant à la base de données des plantes proposée par le modèle SWAT.

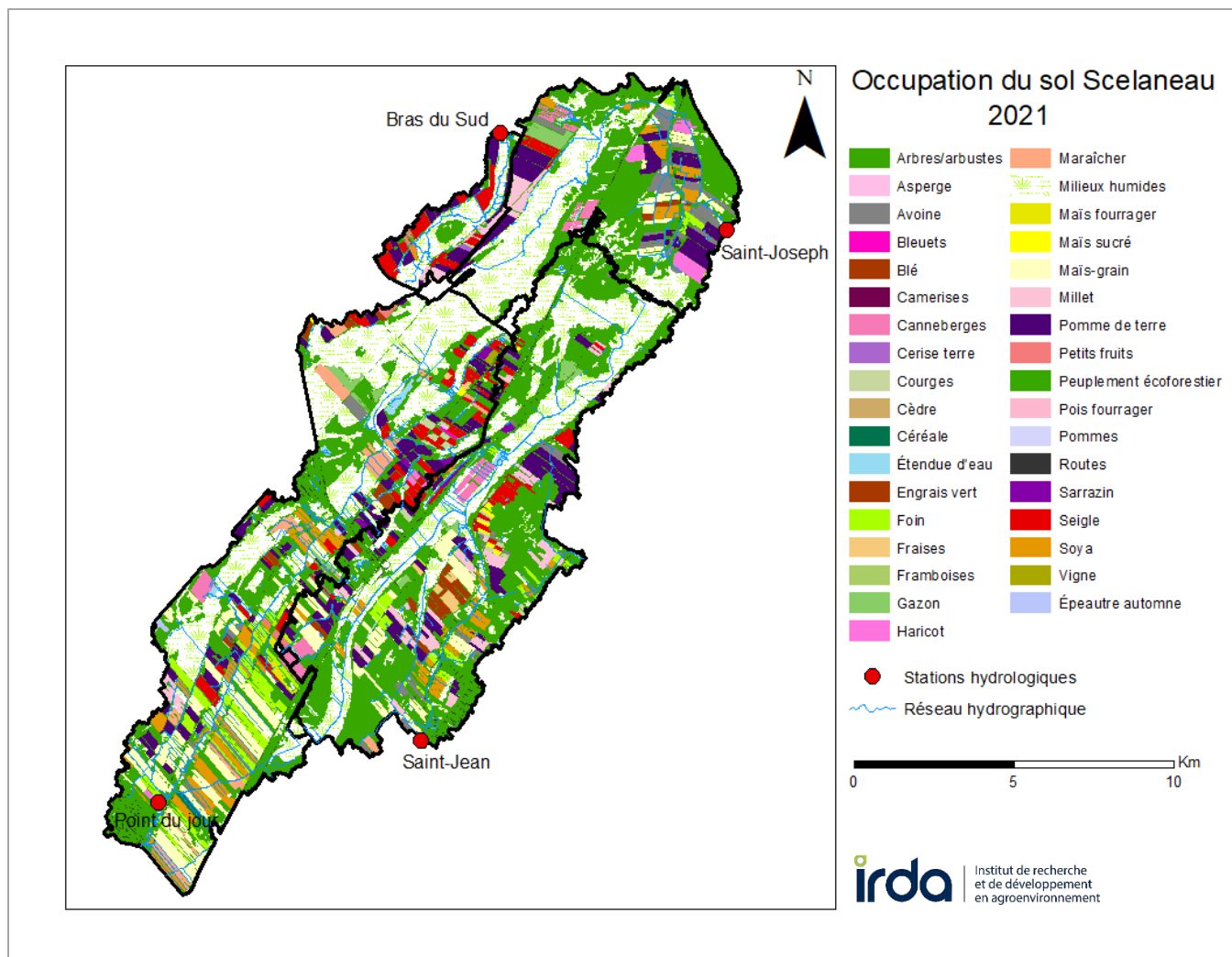


Figure 4. Distribution de l'occupation du territoire pour l'année de référence 2021 de la zone d'étude.

La Figure 5 présente la distribution des types de sol. Cette couche a été produite en joignant la carte de la Couverture pédologique québécoise (2022) à la table de données des propriétés physico-chimiques des sols de SWAT (une description est fournie à l'annexe B). Cette table est montée à partir de trois sources de données pédologiques, soit la Base de Données Hydropédologiques du Québec de l'IRDA (BDHP, 2021) pour la première couche de sol, la table des propriétés Physico-Chimiques par couche de sol de l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec de Tabi et collaborateurs (1990) pour les données manquantes de la BDHP et les couches de sol plus profondes, et finalement la table de couche sol SLT de la Base Nationale de Données sur les Sols (BNDS) d'Agriculture et agroalimentaire Canada (Leblanc et Gagné, 2016). Les dernières données manquantes ont été complétées grâce à des fonctions de transfert pédologique.

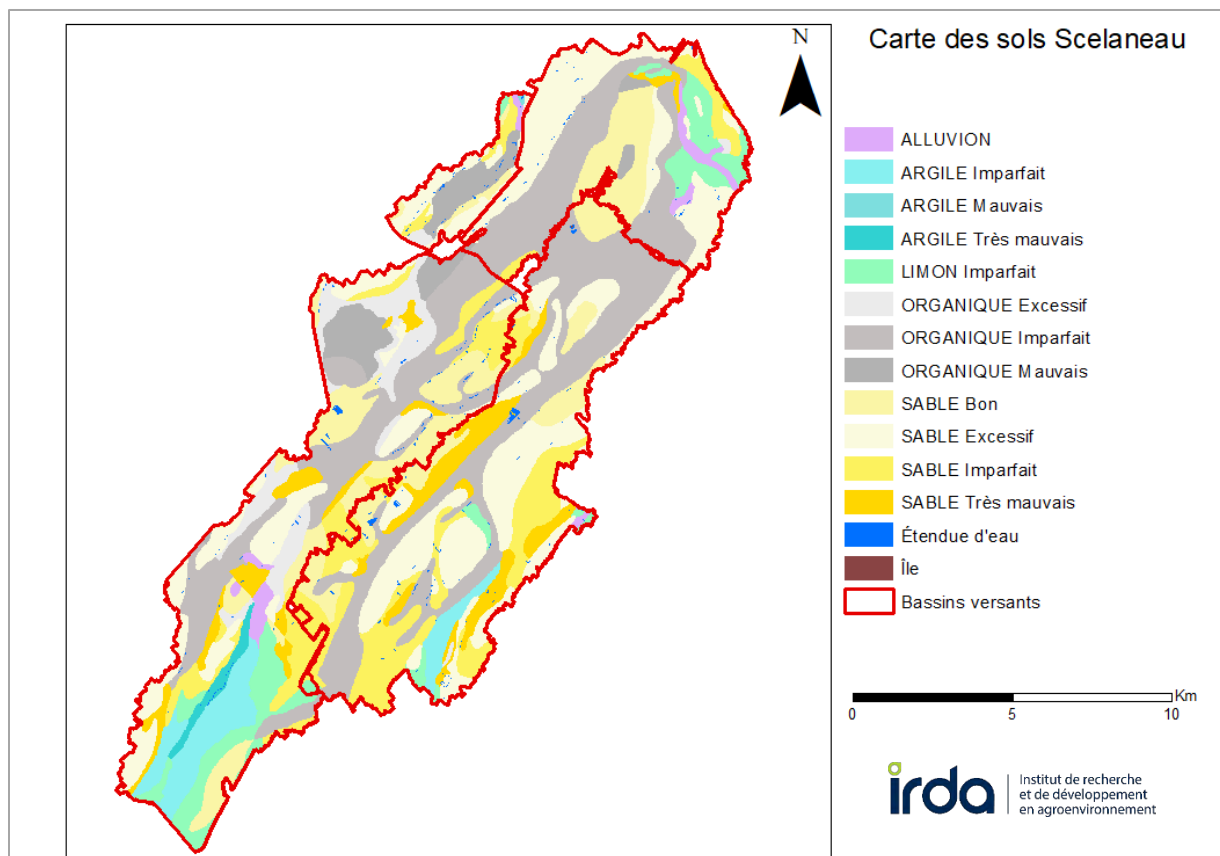


Figure 5. Distribution des types de sol de la zone d'étude.

La distribution des unités de réponses hydrologiques (URH), unités spatiales à la base du calcul du bilan hydrologique par le modèle SWAT, résulte de la superposition des couches pédologiques et de l'utilisation du territoire. Les URHs sont donc une représentation du territoire qui intègre un type de sol, une utilisation du territoire et une classe de pente jugés homogènes pour lesquelles différents critères de gestion des opérations agricoles peuvent être attribués. Les classes de pentes utilisées pour chaque bassin peuvent être consultées au Tableau 2. La partition des écoulements de l'eau simulée par SWAT est a priori sensible au choix de classification des pentes. Établir une classification rigoureuse requiert cependant une analyse de sensibilité, malheureusement hors portée dans le cadre du projet. Nous avons décidé de travailler avec les classes ci-dessous en posant l'hypothèse que ce choix n'induit pas un impact majeur sur les volumes d'eau disponibles à l'échelle des bassins versants.

Tableau 2. Classes de pente (%) et superficies couvertes par ces classes pour chaque bassin.

Saint-Jean	Saint-Joseph	Bras-du-Sud-Ouest	Point-du-Jour
0-10 (7230 ha)	0-10 (3944 ha)	0-10 (833 ha)	0-10 (7967 ha)
10-35 (287 ha)	10-35 (182 ha)	10-35 (17 ha)	10-35 (144 ha)
35 +	35 +	35 + (0,99 ha)	35 + (3,38 ha)

3.3 DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

Les données météorologiques (précipitations, températures minimales et maximales; annexe C) nécessaires en entrée au modèle SWAT sont issues de la station l'Assomption d'Environnement et changements climatiques Canada (ECCC). Les données couvrent les périodes 1995-2015 et 2021-2022 au pas de temps journalier. La période 2021-2022 est utilisée pour la calibration des paramètres du modèle (Section 3.5) et la période 1995-2015, pour la reconstitution des conditions hydrologiques historiques (Section 3.7).

3.4 PRATIQUES CULTURALES

La modélisation des pratiques culturales se limite à la rotation de la culture de la pomme de terre. Une rotation biannuelle avec le seigle est appliquée à partir de l'occupation du territoire de référence défini en 2021 (Figure 4) et implémentée sur les périodes de calibration (2021-2022) et de reconstitution (1995-2015). Les autres cultures se trouvant sur la zone d'étude sont considérées comme pérennes. Cette hypothèse constitue une limitation parce qu'elle ne correspond pas à la réalité pour ce qui est des cultures de canneberge, les pépinières et le maraîchage.

3.5 SIMULATION DE L'IRRIGATION

Le modèle hydrologique SWAT est muni d'un module permettant de simuler les prélèvements pour les besoins des cultures en irrigation. Il est possible de spécifier les cultures irriguées et la source du prélèvement (cours d'eau, réservoir ou aquifère peu profond). Dans le cas d'un prélèvement dans un cours d'eau, le modèle permet de définir des paramètres de gestion comme le débit minimal à conserver dans le cours d'eau ou la quantité maximale d'eau prélevable. Le module d'irrigation est opéré selon un mode « automatique », c'est-à-dire que les prélèvements sont déclenchés automatiquement à partir d'un seuil lié au stress hydrique d'une culture donnée.

Dans le cadre du présent projet, le module d'irrigation s'est malheureusement avéré corrompu. Il n'a donc pas été possible d'attribuer un seuil de déclenchement sur la base du stress hydrique de la pomme de terre (initialement posé à une teneur en eau volumétrique de 0,85). Nous avons donc été contraint d'opérer le modèle en mode « boîte noire », sans attribuer de seuil de déclenchement. Le débit minimal à préserver dans le cours d'eau a été étalonné manuellement à partir des configurations calibrées décrites à la section 3.6 pour obtenir une simulation des prélèvements jugée la plus acceptable possible. Le Tableau 3 présente les sorties du modèle d'irrigation, c'est-à-dire le dénombrement des épisodes de prélèvements (valeur modale issue de l'ensemble des URH irriguées) et le volume total annuel d'eau prélevée (valeur moyenne issue de l'ensemble des URH irriguées). Les résultats sont présentés pour la période de calibration (le modèle n'a pu être opéré que sur l'année 2022) et la période de reconstitution historique (les années 1995, 2000, 2005, 2010 et 2015 ont été retenues pour alléger la compilation des résultats). Le Tableau 3 présente également les valeurs de débit minimal préservé fixé pour chaque bassin versant. Le modèle d'irrigation n'a pas été opéré sur le bassin Bras-du-Sud-Ouest parce que la performance des simulations hydrologiques a été jugée insuffisante (Section 3.6). Il est possible de constater que le module d'irrigation sur le bassin Point-du-Jour propose une représentation relativement acceptable des prélèvements (nombre d'épisodes et volume total prélevé) sur la période de calibration. Il présente cependant une sous-estimation des prélèvements sur le bassin Saint-Jean et sur la période de reconstitution historique. Cette importante limitation sera discutée en conclusion.

Tableau 3. Prélèvements simulés pour l'irrigation des cultures de pommes de terre.

Bassins	Période de calibration (2022)			Période historique (1995, 2000, 2005, 2010, 2015)	
	Débit minimal préservé* (m ³ /s)	Nombre d'épisodes** (-)	Prélèvement annuel total*** (mm)	Nombre d'épisodes** (-)	Prélèvement annuel total*** (mm)
Saint-Jean	0	7	84	7	36,6
Saint-Joseph****	-	0	0	4	20,4
Bras-du-Sud-Ouest*****	-	-	-	-	-
Point-du-jour	0,05	18	231	7	43,9

* Le débit minimal à préserver est un paramètre du modèle d'irrigation du modèle SWAT. Il représente le seuil à partir duquel aucun prélèvement n'est opéré. Ce paramètre a été étalonné manuellement afin d'obtenir une simulation des prélèvements jugée la plus acceptable possible. ** Valeur modale; *** valeur moyenne; **** modèle d'irrigation opéré seulement en 2010; ***** modèle d'irrigation non opéré (performance insuffisante des simulations hydrologiques brutes).

3.6 CALIBRATION DES PARAMÈTRES

La calibration des paramètres du modèle SWAT s'opère à l'aide de l'algorithme SCE-UA (Duan et al. 1993) sur la période 2021-2022 et de la fonction-objectif du $\log KGE$, c'est-à-dire le critère standard du KGE (Gupta et al., 2009), mais évalué à partir du logarithme des débits tel que :

$$\log KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\sigma - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (1)$$

où : r est la corrélation linéaire entre le logarithme des débits observés et simulés;

σ est le ratio entre les écarts-types du logarithme des débits observés et simulés;

β est le ratio entre les moyennes du logarithme des débits observés et simulés.

L'application du critère $\log KGE$ est reconnue comme plus adéquate pour la représentation des faibles débits. Plus $\log KGE$ et ses composantes se rapprochent de 1, plus la simulation est jugée performante.

La Figure 6 présente les hydrogrammes simulés et observés sur la période 2021 à 2022. Les valeurs paramétriques optimisées sont présentées à l'annexe D. Le Tableau 4 présente les scores de performance KGE ainsi que les composantes présentées à l'équation (1). Les hydrogrammes simulés par le modèle SWAT suite à la calibration de ses paramètres (simulations brutes) présentent des biais importants (erreurs systématiques). Un post-traitement statistique de type quantile mapping (Thiemeßl et al., 2011) a donc été appliqué aux simulations brutes afin de leur attribuer des propriétés statistiques comparable aux observations disponibles. Il est possible de constater que cette manipulation améliore grandement la représentativité de l'hydrogramme simulé, tel qu'indiqué par l'amélioration quasi-systématique des critères de performance présentés au Tableau 4. Le post-traitement statistique et les analyses subséquentes n'est pas appliqué sur le bassin Bras-du-Sud-Ouest parce que la performance des simulations hydrologiques brutes est jugée insuffisante.

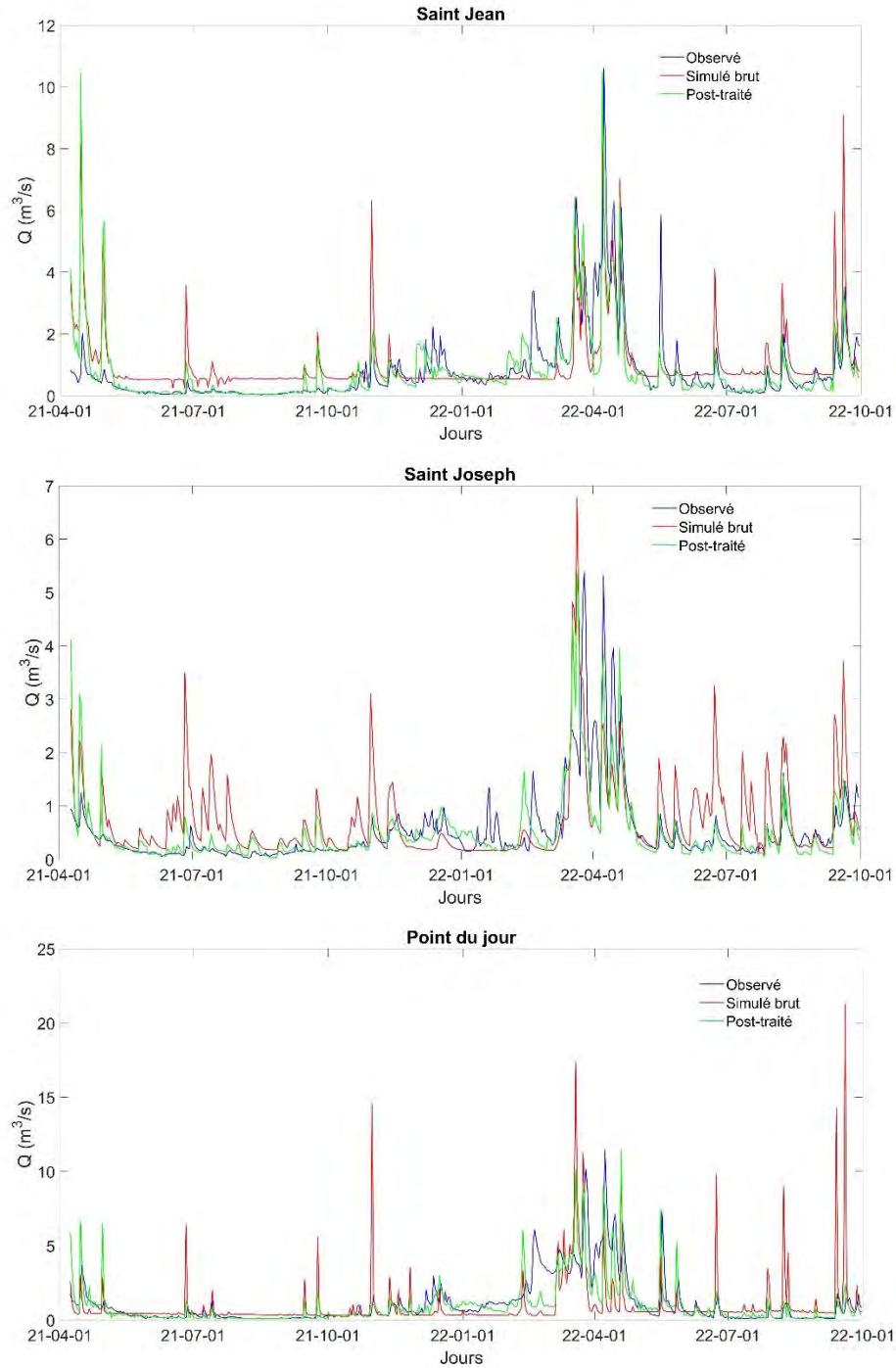


Figure 6. Hydrogrammes simulés (simulations brutes et post-traitées) et observés sur la période 2021 à 2022 aux stations hydrométriques Saint-Jean, Saint-Joseph et Point-du-jour.

Tableau 4. Critères de performance des hydrogrammes simulés de 2021 à 2022.

Bassins	Simulations brutes				Simulations post-traitées			
	<i>KGE</i>	<i>r</i>	σ	β	<i>KGE</i>	<i>r</i>	σ	β
Saint-Jean	0.44	0.58	0.88	1.27	0,66	0,66	1,02	1,00
Saint-Joseph	0.38	0,54	1,37	0,82	0,70	0,70	0,99	1,01
Bras-du-Sud-Ouest	-0.1	-	-	-	-	-	-	-
Point-du-Jour	0.19	0,30	1,39	0,88	0,65	0,68	1,04	0,87

3.7 DISPONIBILITÉ DES EAUX DE SURFACE

La reconstitution des débits est réalisée en forçant le modèle hydrologique calibré (Section 3.6) avec les observations météorologiques sur la période 1995 à 2015 (20 ans, section 3.3). Un post-traitement statistique est ensuite appliqué aux hydrogrammes simulés (section 3.6) afin d'en corriger les biais et de leur attribuer des propriétés statistiques comparables aux observations hydrométriques récentes (période 2021-2022). La Figure 7 présente les hydrogrammes reconstitués sur cette période historique aux stations hydrométriques Saint-Jean, Saint-Joseph et Point-du-jour. Le Tableau 5 présente le critère du débit d'étiage de récurrence 2 ans sur 7 jours consécutifs ($Q_{2,7}$) évalué à partir des reconstitutions historiques des débits, avec et sans l'activation du modèle d'irrigation. Le Tableau 6 présente les valeurs mensuelles de $Q_{2,7}$ évaluées à partir des observations collectées par le MELCCFP à la station 052236 sur la période 2000 à 2005. Le Tableau 7 présente les valeurs saisonnières de $Q_{2,7}$ (périodes estivale et hivernale) estimées à partir de relations empiriques basées sur la superficie du bassin versant. Ces relations ont été déterminées dans le cadre du projet RADEAU (Groupe AGÉCO, 2019) et sont présentées à l'annexe E.

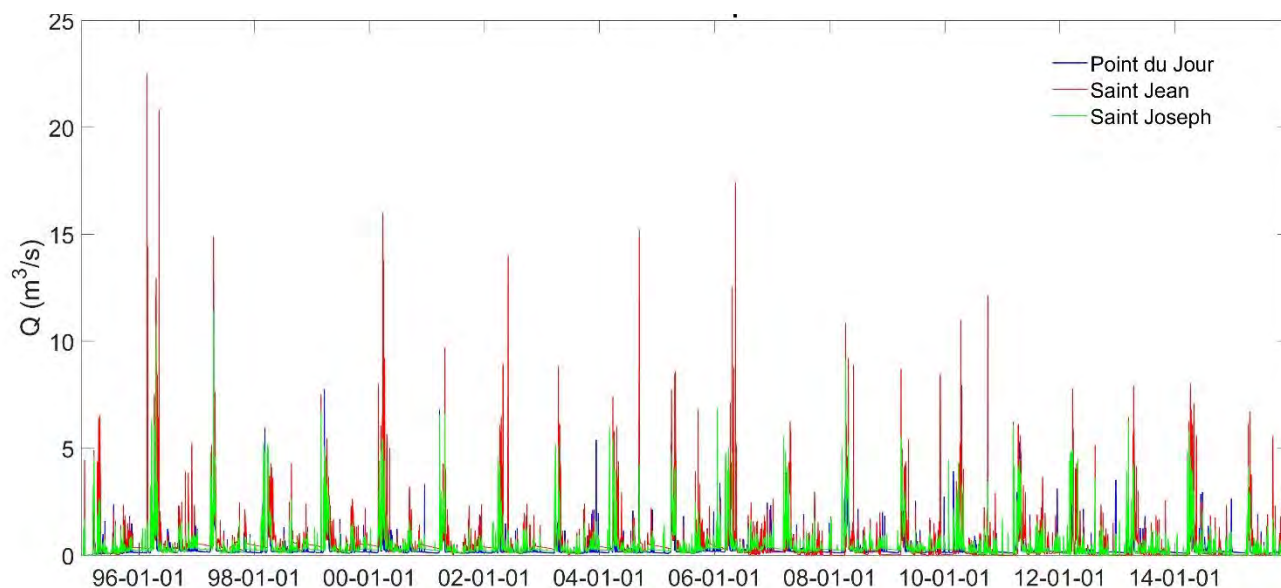


Figure 7. Hydrogrammes reconstitués sur la période 1995 à 2015 aux stations hydrométriques de la zone d'étude.

Tableau 5. Débit d'étiage de récurrence 2 ans sur 7 jours consécutifs ($Q_{2,7}$) estimé à partir de la reconstitution historique sur la période 1995-2015.

	$Q_{2,7}$ (m ³ /s)						Portion du $Q_{2,7}$ utilisée pour l'irrigation*		
	Avec irrigation			Sans irrigation			* Les valeurs négatives ne sont pas présentées.		
	Saint-Jean	Saint-Joseph	Point-du-jour	Saint-Jean	Saint-Joseph	Point-du-jour	Saint-Jean	Saint-Joseph	Point-du-jour
Janvier	0,341	0,229	0,252	0,537	0,282	0,672	0,36	0,19	0,63
Février	0,313	0,222	0,251	0,830	0,270	1,027	0,62	0,18	0,76
Mars	0,249	0,204	0,619	1,295	0,635	1,310	0,81	0,68	0,53
Avril	0,426	0,388	0,459	0,601	0,524	0,918	0,29	0,26	0,50
Mai	0,152	0,191	0,204	0,165	0,166	0,392	0,08	-	0,48
Juin	0,109	0,119	0,125	0,117	0,103	0,193	0,07	-	0,35
Juillet	0,109	0,132	0,142	0,100	0,126	0,129	-	-	-
Août	0,041	0,103	0,104	0,041	0,087	0,103	0,00	-	-
Sept.	0,096	0,172	0,169	0,113	0,141	0,137	0,15	-	-
Oct.	0,183	0,170	0,171	0,190	0,171	0,241	0,04	0,01	0,29
Nov.	0,330	0,254	0,334	0,397	0,341	0,428	0,17	0,26	0,22
Déc.	0,353	0,252	0,423	0,684	0,410	0,722	0,48	0,39	0,41
Annuel	0,027	0,103	0,102	0,041	0,087	0,103	0,34	-	0,01

Tableau 6. Débit d'étiage de récurrence 2 ans sur 7 jours consécutifs ($Q_{2,7}$) estimé à partir des observations historiques à Point-du-jour sur la période 2000-2005.

$Q_{2,7}$ (m ³ /s)		$Q_{2,7}$ (m ³ /s)	
Mois	Point-du-jour	Mois	Point-du-jour
Janvier	0,357	Juillet	0,166
Février	0,326	Août	0,149
Mars	0,560	Septembre	0,166
Avril	1,513	Octobre	0,362
Mai	1,006	Novembre	0,513
Juin	0,351	Décembre	0,497
Annuel	0,119		

Tableau 7. Débit d'étiage de récurrence 2 ans sur 7 jours consécutifs ($Q_{2,7}$) estimé à partir de la relation empirique basée sur la superficie déterminée dans le projet RADEAU.

$Q_{2,7}$ (m ³ /s)				
Période	Saint-Jean	Saint-Joseph	Point-du-jour	Bras-Sud-Ouest
Estivale	0,057	0,032	0,062	0,007
Hivernale	0,061	0,038	0,064	0,011

3.8 PROJECTION EN CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Neuf simulations climatiques issues de l'ensemble NA-CORDEX (Mearns et al., 2017; Tableau 8) sont utilisées pour évaluer la dérive de la disponibilité en eau de surface à l'horizon 2050. Ces simulations sont issues d'une mise à l'échelle dynamique à la résolution spatiale de 50 km à l'aide de modèles climatiques régionaux (RCM). Ces RCMs sont forcés aux frontières par des modèles climatiques globaux (GCM) selon la trajectoire de forçage radiatif RCP8.5, correspondant à un scénario pessimiste de concentration atmosphérique de gaz à effet de serre. Les températures minimales et maximales ainsi que les précipitations journalières sont extraites sur la période historique de référence 1970 à 1999 ainsi que sur la période future 2040 à 2069. Un post-traitement statistique de type « quantile mapping » (Thiemeßl et al., 2011) est appliqué aux variables climatiques simulées afin de leur attribuer des propriétés statistiques comparables aux observations météorologiques locales décrites à la section 3.3. Le Tableau 9 présente l'ampleur des biais (erreurs systématiques) affectant la température et les précipitations simulées pour chaque simulation NA-CORDEX par rapport aux observations disponibles sur la période de référence (1970-1999). La réduction des biais associée aux simulations post-traitées illustre l'effet du traitement statistique appliqué aux variables climatiques simulées. Les cycles annuels sur la période 1995 à 2004 pour les variables brutes et post-traitées sont présentés à l'annexe F.

Tableau 8. Description des simulations climatiques régionales NA-CORDEX.

ID	Modèle climatique global (GCM)	Modèle climatique régional (RCM)	Résolution	RCP	Période référence	Période future
crx1	CanESM2	CRCM5	50 km	8.5	1970-1999	2040-2069
crx2	CanESM2	CanRCM4				
crx3	CanESM2	RCA4				
crx4	EC-EARTH	HIRHAM5				
crx5	EC-EARTH	RCA4				
crx6	GFDL-ESM2M	RegCM4				
crx7	MPI-ESM-LR	CRCM5-UQAM				
crx8	MPI-ESM-LR	RegCM4				
crx9	MPI-ESM-LR	WRF				

Tableau 9. Biais affectants les températures et précipitations simulées par l'ensemble NA-CORDEX.

ID	Modèle climatique global (GCM)	Modèle climatique régional (RCM)	Température minimale (°C)		Température maximale (°C)		Précipitations (mm)	
			Simulation brute	Simulation post-traitée	Simulation brute	Simulation post-traitée	Simulation brute	Simulation post-traitée
crx1	CanESM2	CRCM5	0.69	0.008	-0.14	0.012	0.012	-0.0243
crx2	CanESM2	CanRCM4	1.09	0.004	1.44	0.017	0.017	0.0125
crx3	CanESM2	RCA4	1.49	0.006	0.95	0.008	0.008	-0.0252
crx4	EC-EARTH	HIRHAM5	0.25	0.007	-2.55	0.008	0.008	-0.0282
crx5	EC-EARTH	RCA4	-0.26	0.008	-0.86	0.013	0.013	-0.0037
crx6	GFDL-ESM2M	RegCM4	-3.21	0.006	-3.69	0.014	0.014	0.0008
crx7	MPI-ESM-LR	CRCM5-UQAM	-1.55	0.009	-2.65	0.007	0.007	-0.0013
crx8	MPI-ESM-LR	RegCM4	-2.42	0.001	-2.84	0.010	0.010	-0.0098
crx9	MPI-ESM-LR	WRF	-3.55	0.008	-3.75	0.007	0.007	-0.0212

Des séries hydrologiques correspondant aux périodes de référence et futures sont finalement produites en forçant le modèle hydrologique SWAT avec les simulations climatiques post-traitées. Le Tableau 10 présente les changements relatifs projetés (exprimés en pourcentage) à l’horizon 2050 du critère de disponibilité du $Q_{2,7}$ estimé sur une base annuelle. Il est possible de constater que les projections indiquent une diminution de l’ordre de -20% pour les bassins Saint-Jean et Point-du-jour, alors qu’elles indiquent une diminution de l’ordre de -45% pour le bassin Saint-Joseph.

Tableau 10. Projection à l’horizon 2050 du débit d’étiage de récurrence 2 ans sur 7 jours consécutifs ($Q_{2,7}$).

Bassin	Changement projeté à l’horizon 2050 (%)*
Saint-Jean	-22,0
Saint-Joseph	-45,2
Bras-du-Sud-Ouest	-
Point-du-jour	-20,3

*Valeur médiane issue des neuf simulations NA-CORDEX.

La Figure 8 présente l’estimation et les différentes projections du Q_{2-7} évaluées sur la période estivale produites l’Atlas hydroclimatique du Québec méridional (MELCCFP, 2022). Les résultats présentés sont extraits aux tronçons de rivière modélisé SLNO_00562, correspondant au ruisseau Saint-Jean. Les approches de modélisation mise en œuvre dans l’Atlas diffèrent avec celles employées dans le présent rapport (choix du modèle hydrologique, méthode d’optimisation, choix des ensembles climatiques, etc.), ce qui explique la disparité des résultats obtenus. Il est cependant possible d’observer que le Q_{2-7} estimé au Tableau 5 (0,027 m³/s) est inclus dans l’enveloppe d’incertitude (~25^e percentile) proposée par l’Atlas. L’ampleur du changement projeté (valeur médiane de l’ensemble) à l’horizon 2050 selon le RCP8.5 présenté au Tableau 10 (-22,0%) peut être considéré du même ordre de grandeur que celui produit par l’Atlas hydroclimatique (-35,6 %). Il est important de rappeler que la confiance attribuée aux projections des faibles débits demeure typiquement limitée, principalement à cause des simplifications imposées aux modèles hydrologiques pour simuler les écoulements souterrains. Il est donc raisonnable de penser que la disponibilité des eaux de surface va fort probablement diminuer en été (analyse exhaustive présentée à la Figure 8), mais possiblement d’une ampleur plus modeste (évaluation qualitative sur la base des résultats partiels présentés au Tableau 10). Sur la base des résultats obtenus dans le cadre du projet, nous avons conclu qu’il est hasardeux d’estimer la disponibilité des eaux de surface par le biais d’une reconstitution historique de débits dans le cas où l’information disponible pour entraîner et valider les modèles est insuffisante. En s’appuyant sur le principe de précaution et en attendant un suivi hydrométrique plus long, nous proposons d’utiliser les valeurs les plus conservatrices. Les méthodes proposées par l’IRDA présentent un potentiel d’application et pourraient à terme présenter une estimation jugée adéquate pour être valorisée dans la pratique. Il faudra cependant raffiner ces méthodes et les valider dans le cadre d’autres projets.

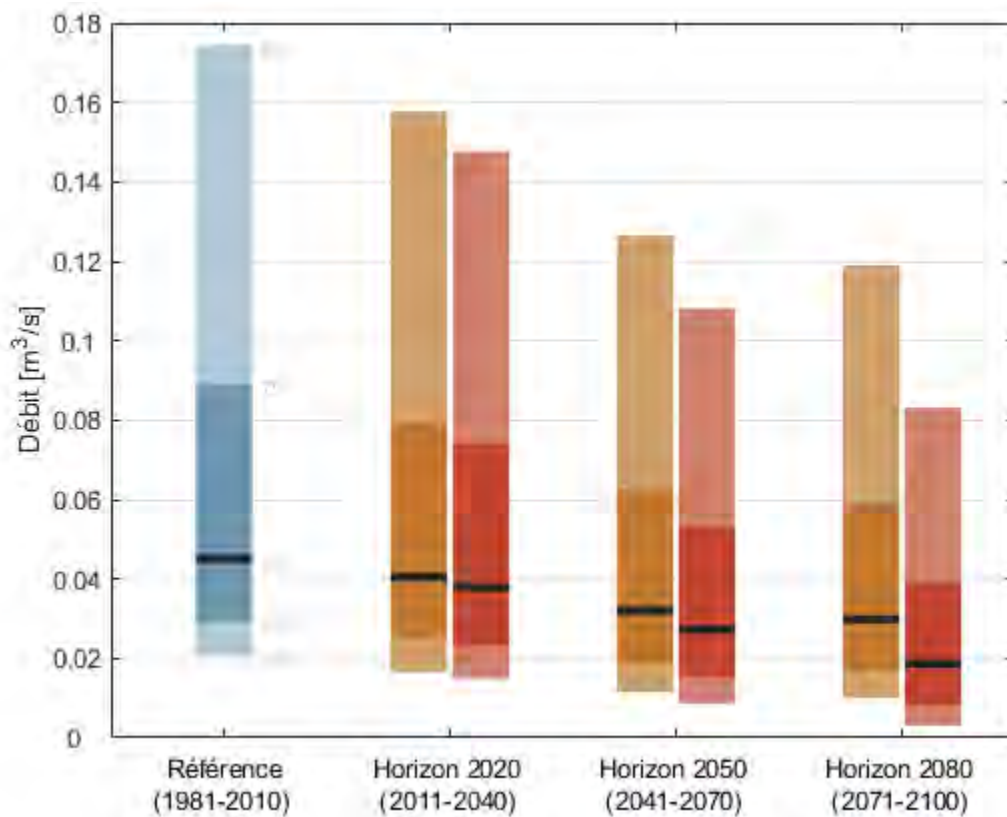


Figure 8. Estimation du $Q_{2.7}$ estival et projections aux horizons 2020, 2050 et 2080 produites par l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional au tronçon SLNO00562 correspondant au ruisseau Saint-Jean. La distribution en rouge correspond au RCP8.5.

4 CONCLUSION

La contribution de l'IRDA au projet SCELANEAU a permis de caractériser la disponibilité des eaux de surface du complexe tourbeux de Lanoraie par : (1) la mise en place d'un suivi hydrométrique sur les cours d'eau Bras-du-Sud-Ouest, Saint-Joseph, Saint-Jean et Point-du-Jour d'avril 2021 à octobre 2023; (2) l'estimation de la disponibilité des eaux de surface à l'aide de la modélisation hydrologique; (3) la projection de la disponibilité en contexte de changements climatiques.

Les mesures hydrométriques collectées sur la période 2021 à 2022 ont été valorisées pour la calibration du modèle hydrologique SWAT. La mise en place du modèle a préalablement nécessité le traitement des couches géomatiques (topographie, occupation du territoire, pédologie) et l'activation du module simulant les prélèvements pour l'irrigation de la pomme de terre. Un post-traitement statistique a été appliqué aux hydrogrammes bruts simulés par le modèle SWAT afin d'en corriger les biais importants (erreurs systématiques). La disponibilité en eau a été évaluée sur la base du débit d'étiage de récurrence 2 ans sur 7 jours consécutifs ($Q_{2,7}$), appliqué sur les séries hydrologiques reconstituées par modélisation sur la période 1995-2015, également post-traitées afin de leur attribuer des propriétés statistiques semblables aux observations disponibles. Le $Q_{2,7}$ a également été évaluée en désactivant le modèle d'irrigation, reproduisant des conditions d'écoulement excluant l'incidence des prélèvements nécessaires à la culture de la pomme de terre. Une analyse en changement climatique a finalement permis d'anticiper une diminution probable de la disponibilité à l'horizon 2050. L'ampleur de cette diminution demeure cependant affectée par de nombreuses sources d'incertitudes.

L'analyse conduite dans le cadre du projet comporte des limitations importantes : (1) l'usage d'une série d'observations hydrométriques sur une très courte période (deux ans), limitant notre capacité à évaluer la validité des résultats de simulations ainsi que la capacité du modèle hydrologique à reproduire des résultats cohérents à l'extérieur de la période de calibration; (2) l'usage d'un module périmé et potentiellement corrompu simulant les prélèvements pour l'irrigation dont la validité n'a pu être confirmée sur la base des épisodes et des prélèvements totaux simulés; (3) des résultats de calibration peu performants, nécessitant l'application d'un post-traitement statistique afin de reproduire des conditions d'étiage jugées satisfaisantes; (4) l'usage d'un ensemble climatique relativement petit (9 simulations), limitant une appréciation adéquate de l'incertitude affectant la projection des conditions hydrologiques en contexte de changements climatiques. Pour ces raisons, nous recommandons, dans le cadre de futurs travaux : (1) de ne pas utiliser les résultats de cette étude pour définir des critères de conception en ingénierie sans l'avis d'un expert; (2) de poursuivre le suivi hydrométrique; (3) d'explorer la valeur ajoutée d'un couplage de modélisation hydrologique et hydrogéologique pour considérer explicitement la contribution du complexe tourbeux aux épisodes d'étiage en rivière; (4) de simuler les prélèvements avec une version récente du modèle SWAT, soutenue par la communauté de pratique; (5) de revoir les processus de modélisation et de calibration afin d'accroître la représentativité des processus simulés, notamment par l'usage d'algorithmes d'optimisation multicritères; (6) d'intégrer les simulations climatiques de l'ensemble CMIP5 à l'analyse en changements climatiques.

Considérant les limitations décrites ci-dessus, nous ne recommandons pas l'utilisation des résultats présentés dans cette étude pour définir des critères de conception en ingénierie. Si un usager souhaite utiliser ces résultats, il le fera à ses risques et périls en engageant sa propre responsabilité. Le cas échéant, nous recommandons un usage aussi conservateur que possible des valeurs présentées dans ce document, en priorisant celles qui sous-estiment la disponibilité des eaux de surface sur la période historique. En contrepartie, nous croyons que l'application d'un facteur moins conservateur associé aux projections en changements climatiques constitue une pratique raisonnée. Le Tableau 11 synthétise pour chaque bassin versant les valeurs de $Q_{2,7}$ les plus conservatrices évaluées dans ce rapport.

Tableau 11. Synthèse des valeurs de $Q_{2,7}$ plus conservatrices.

Bassin	$Q_{2,7}$ (m^3/s)	Période	Méthode	Source	Projection en changements climatiques
Saint-Jean	0.027	Annuelle	Reconstitution historique	Tableau 5	-20%
Saint-Joseph	0.032	Estivale	Relation empirique	Tableau 7	
Bras-du-Sud-Ouest	0.007	Estivale	Relation empirique	Tableau 7	
Point-du-Jour	0.062	Estivale	Relation empirique	Tableau 7	

RÉFÉRENCES

- Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R., Williams, J.R., Haney, E.B., S.L. Neitsch. 2011. Soil and Water Assessment Tool. Input/Output File Documentation. Version 2009. Grassland, Soil and Water Research Laboratory – Agricultural Research Service Blackland Research Center – Texas AgriLife Research.
- BDHP. 2021. Base de Données Hydropédologiques du Québec pour l’horizon de surface des sols agricoles du Québec. 2^{de} version. IRDA. Québec.
- Canards Illimités Canada. 2020. Assemblage des données milieux humides de la cartographie détaillée pour les secteurs habités du sud du Québec (2009-2021). Canards Illimités Canada et ministère de l’Environnement et Lutte contre les changements climatiques. Québec.
- Couverture pédologique québécoise. (2022). Couverture pédologique de la province du Québec. 2nd version numérique. Couverture complète. Échelle 1:20 000. Produit par AAC, MAPAQ, et IRDA. Distribuée par l’IRDA. Québec, Québec.
- Duan, Q. Y., Gupta, V. K. et S. Sorooshian. 1993. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 76, pp. 501–521.
- FADQ, 2022. Base de données des parcelles et productions agricoles déclarées version 03 : productions transposées anonymes. Guide de l’utilisateur. <https://www.fadq.qc.ca/documents/donnees/base-de-donnees-des-parcelles-et-productions-agricoles-declarees/>.
- GRHQ, 2016. Géobase du réseau hydrographique du Québec. Ministère de l’Énergie et des Ressources Naturelles.
- Groupe AGÉCO. 2019. Recherche participative d’alternatives durables pour la gestion de l’eau en milieu agricole dans un contexte de changement climatique (RADEAU). MAPAQ. [En ligne]. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/radeau1-2>. Page consultée le 23 décembre 2021. 271 p.
- Gupta, V., Kling, H., Yilmaz, K. K. et G. F. Martinez. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377, pp. 80-91.
- Leblanc et Gagné. 2016. Modification of Soil name table in order to assure compliance with CanSIS standard. Rapport décrivant les travaux effectués et recommandations pour assurer la disponibilité des données pédologiques du Québec. CRAAQ. Québec, Québec.
- Mearns, L.O., et collaborateurs, 2017. The NA-CORDEX dataset, version 1.0. NCAR Climate Data Gateway, Boulder CO, doi:10.5065/D6SJ1JCH.
- Ministère de l’Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC), Document d’accompagnement de l’Atlas hydroclimatique du Québec méridional, 2022, 40 p. : <https://cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/guide-atlas-hydroclimatique-2022.pdf>.

MFFP. 2020. Carte écoforestière à jour. Direction des inventaires forestier. Québec.
<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/carte-ecoforestiere-avec-perturbations>

Ministère des Ressources naturelles et des Forêts (2023). Guide d'utilisation de la carte interactive *Forêt ouverte*, Québec, Secteur des forêts, Direction des inventaires forestiers, 67 p.

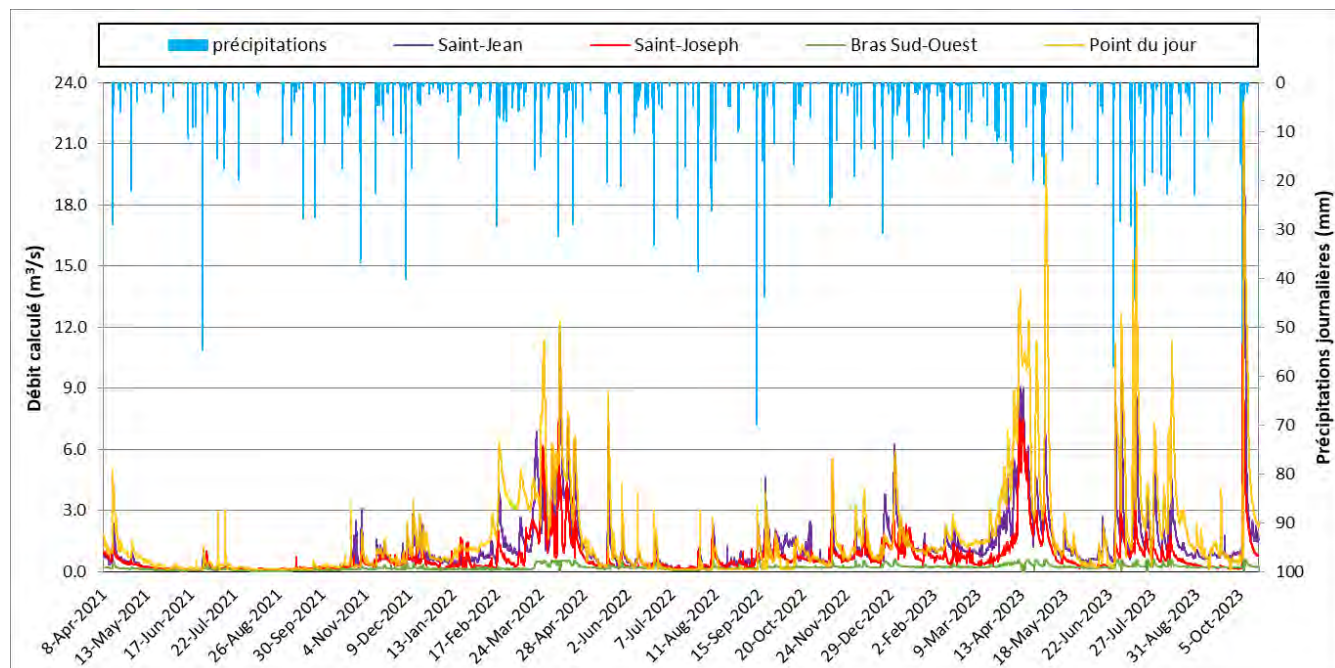
Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, 2018. Adresses Québec. AQReseau +. Direction de la référence géographique. Service de la cartographie. Québec.

Tabi, M., Tardif, L., Carrier, D., Laflamme, G., Rompré, M. 1990. Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec. MAPAQ, Québec, Québec, 65 p.

Themeßl, M. J., Gobiet, A., et Leuprecht, A. 2011. Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *Int. J. Climatol.*, 31, 1530–1544. doi:10.1002/joc.2168.

ANNEXE A - SUIVI HYDROMÉTRIQUE INCLUANT 2023

Hydrogrammes mis à jour, du 8 avril 2021 au 20 octobre 2023.



ANNEXE B - PROPRIÉTÉS PÉDOLOGIQUES DES SOLS MODÉLISÉS

Paramètre	Description	Sources des données utilisées et listées par ordre de priorité
SOL_ZMX (mm)	Profondeur d'enracinement maximal du profil du sol	SLT, 2016
SOL_Z (m)	Profondeur de la surface du sol au base de la couche	SLT, 2016
SOL_BD (mg/m3)	Densité apparente	BDHP, 2022 et PPC_par couche, 1990
SOL_AWC	Capacité en eau disponible ou réserve en eau utile	BDHP, 2022 et SLT, 2016
SOL_K (mm/h)	Conductivité hydraulique saturée	BDHP, 2022 et PPC_par couche, 1990
SOL_CBN (% du poids total)	Teneur en carbone organique	BDHP, 2022 et PPC_par couche, 1990
SOL_CLAY, SOL_SILT, SOL_SAND, SOL_ROCK (%)	Teneur en argile, limon, et sable et en fragment rocheux	BDHP, 2022 et PPC_par couche, 1990 (et SLT,2016 pour les fragments)
SOL_ALB	Albédo du sol humide	BDHP, 2022 et SLT, 2016
USLE_K	Facteur d'érodabilité du sol	BDHP, 2022 et SLT, 2016
HYDGRP	Groupe hydrologique	BDHP, 2022

ANNEXE C - DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES RECUEILLIES À LA STATION L'ASSUMPTION (ECCC)

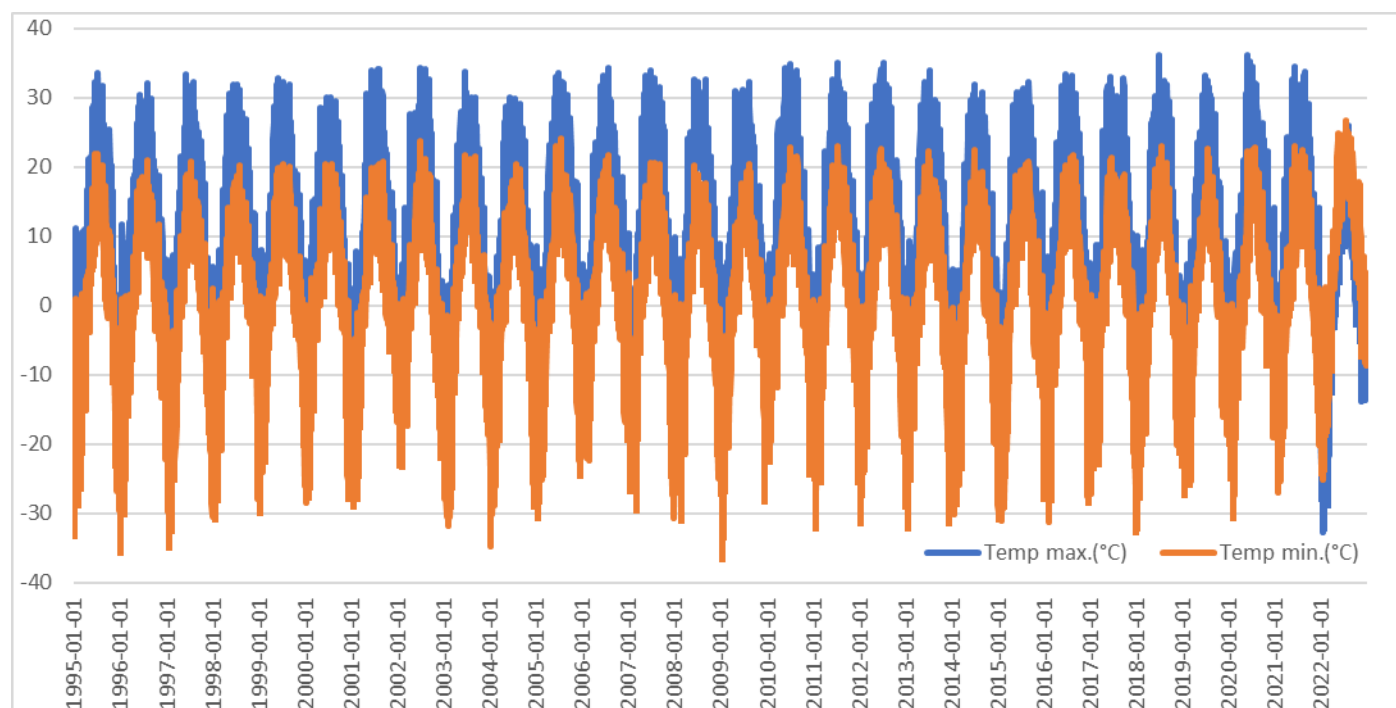


Figure C1 : Températures maximales et minimales à la station l'Assomption (ECCC) sur la période 1995 à 2022.

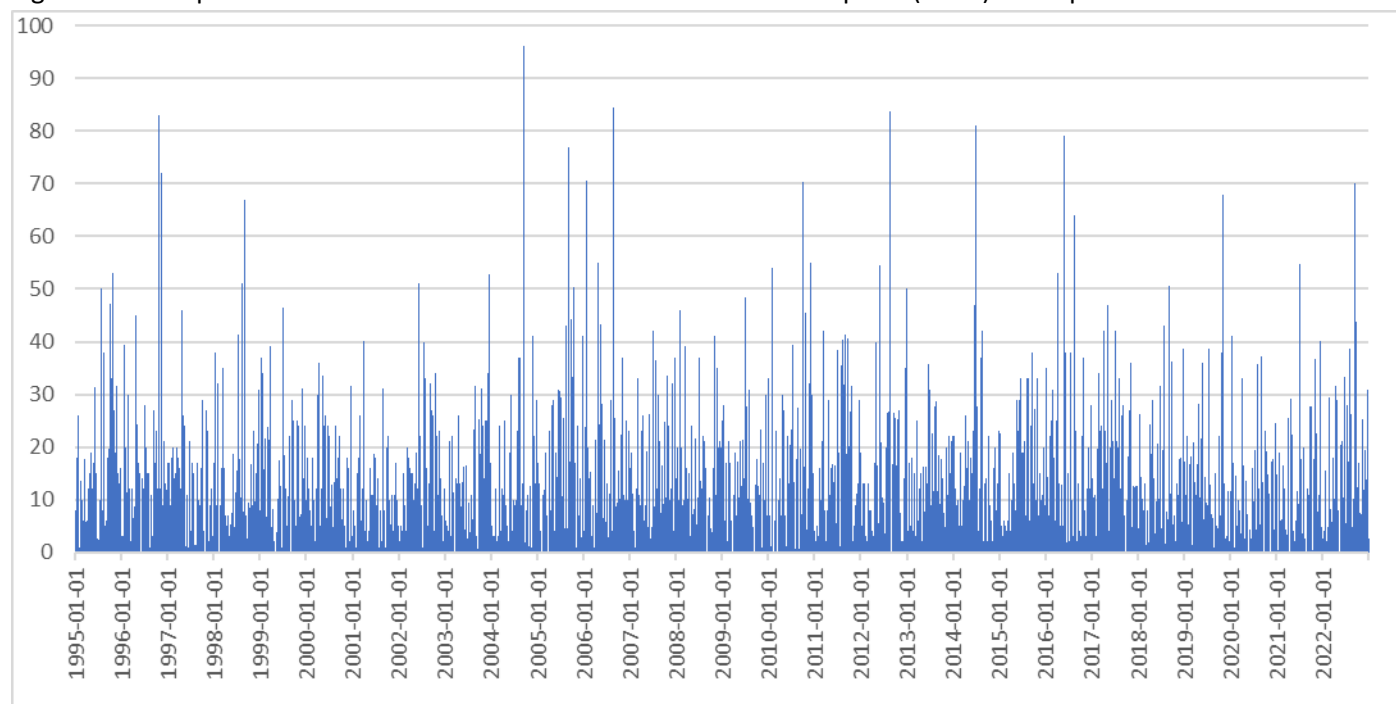


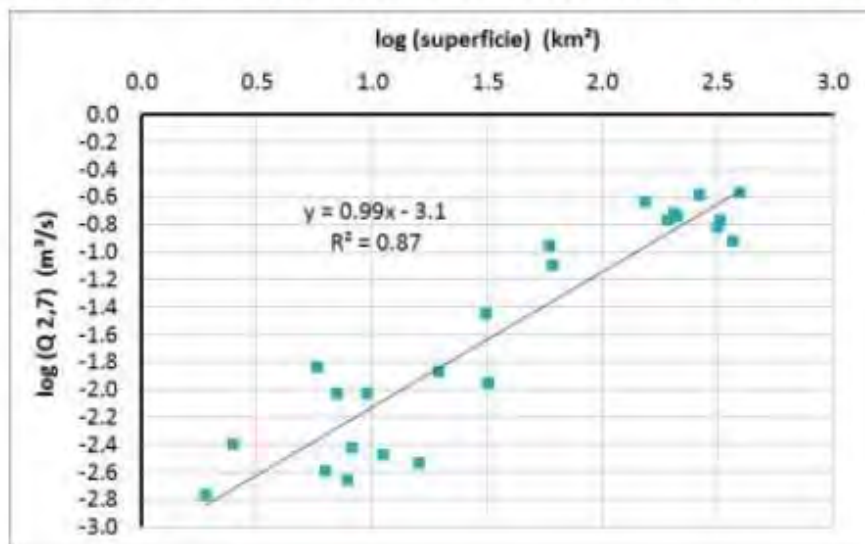
Figure C2 : Précipitations totales journalières à la station l'Assomption (ECCC) sur la période 1995 à 2022.

ANNEXE D - PARAMÈTRES OPTIMISÉS DU MODÈLE SWAT

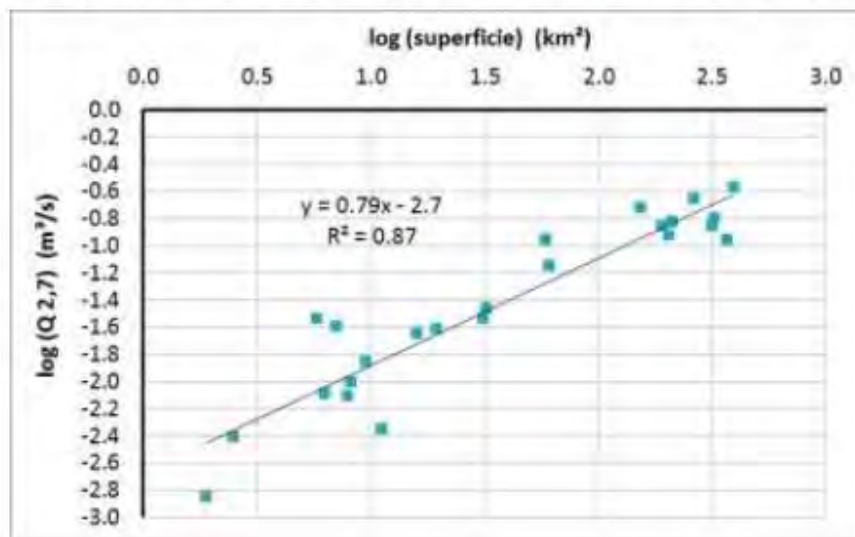
Paramètres		Point jour	Bras du sud	Saint Jean	Saint joseph
Fonte de neige (basins.bsn)	SFTMP (°C)	-1,372	0,800	0,372	-1,372
	SMTMP (°C)	-3,570	-1,031	-1,570	-1,570
	SMFMX (mm _{H2O} /day-°C)	4,090	6,601	4,090	6,090
	SMFMN (mm _{H2O} /day-°C)	1,180	3,776	1,180	4,180
	TIMP	0,269	0,795	0,769	0,878
	SNOCOVMX (mm _{H2O})	100,252	90,547	100,252	124,749
	SNO50COV (fraction)	0,112	0,449	0,112	0,756
	SURLAG (jours)	4,000	4,000	4,000	4,000
Ruissellement (*.mgt)	CN				
Evaporation (*.hru)	ESCO	0,354	0,465	0,354	0,354
	EPCO	0,570	1,000	1,000	1,000
Souterrain (*.gw)	GW_DELAY (jours)	29,960	0,830	69,960	69,960
	ALPHA_BF	0,005	0,991	0,005	0,005
	GWQMN (mm)	187,030	115,661	187,030	187,030
	GW_REVAP	0,053	0,139	0,153	0,153
	REVAPMN (mm)	97,545	176,011	97,545	17,562
	RCHRG_DP	0,479	0,004	0,879	0,879
Drain (*.sol)	SOL_EC	0,330	0,340	0,330	0,330

ANNEXE E – RELATIONS EMPIRIQUES ENTRE LE $Q_{2,7}$ ET LA SUPERFICIE DU BASSIN VERSANT

Relation entre débit d'étiage estival et superficie pour des bassins versants inférieurs à 400 km².



Relation entre débit d'étiage hivernal et superficie pour des bassins versants inférieurs à 400 km².



Tirés de Groupe AGÉCO (2019).

ANNEXE F – VARIABLES NA-CORDEX BRUTES ET POST-TRAITÉES

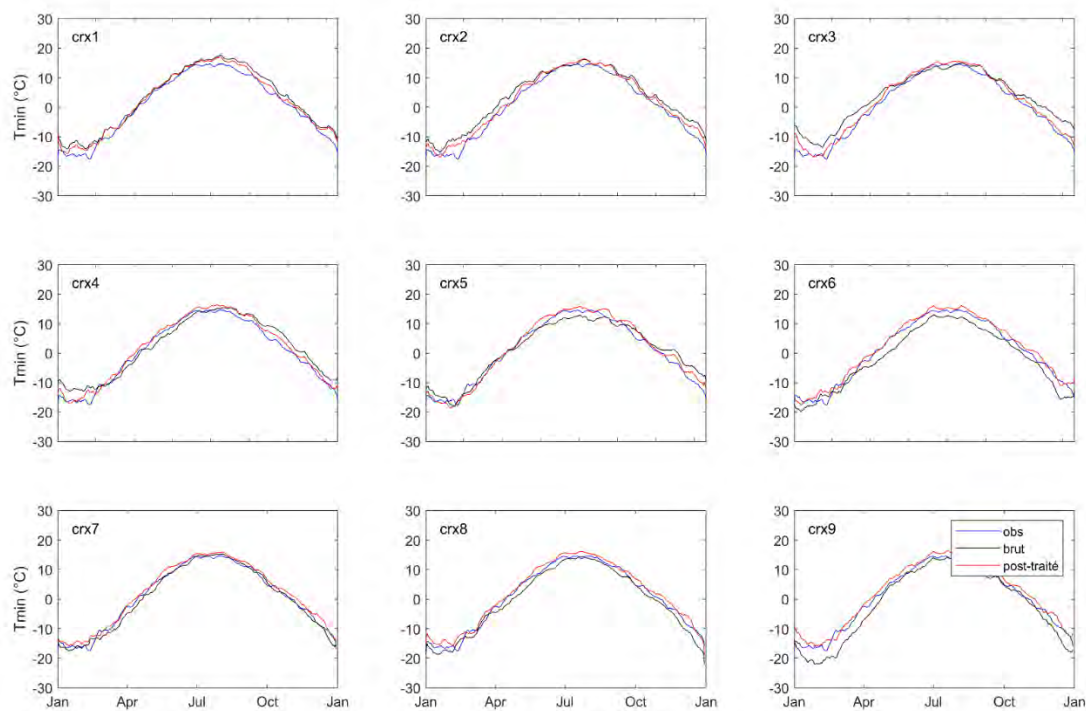


Figure E1 : Température minimale journalière brute et post-traitée de l'ensemble NA-CORDEX, cycle annuel sur la période 1995 à 2004.

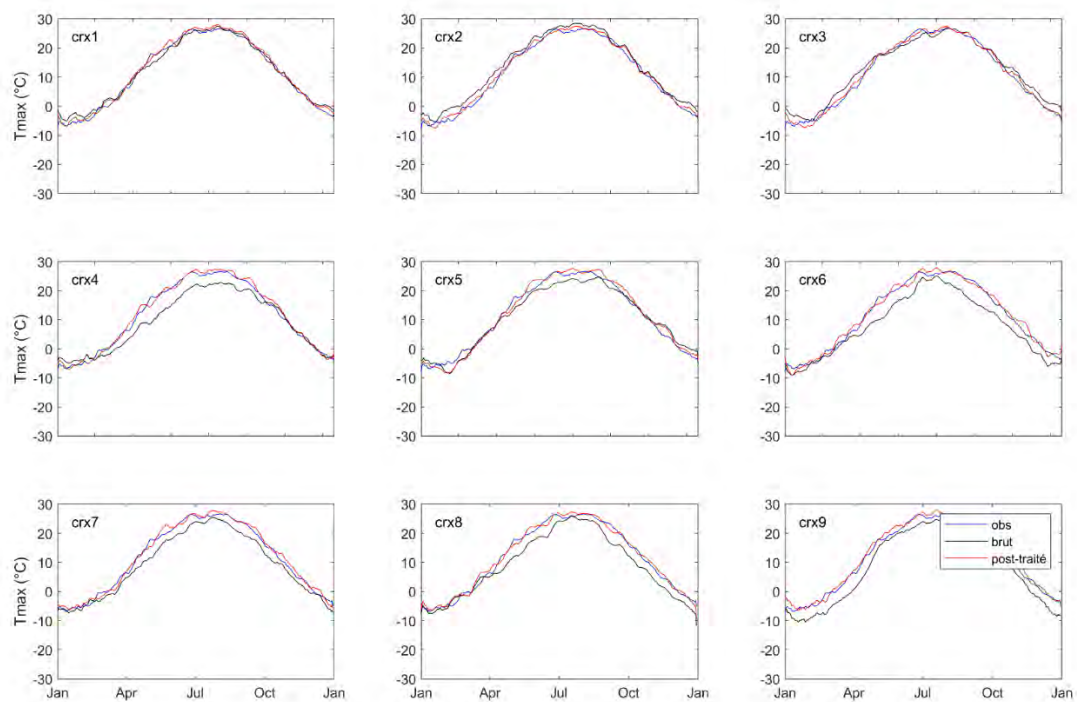


Figure E2 : Température maximale journalière brute et post-traitée de l'ensemble NA-CORDEX, cycle annuel sur la période 1995 à 2004.

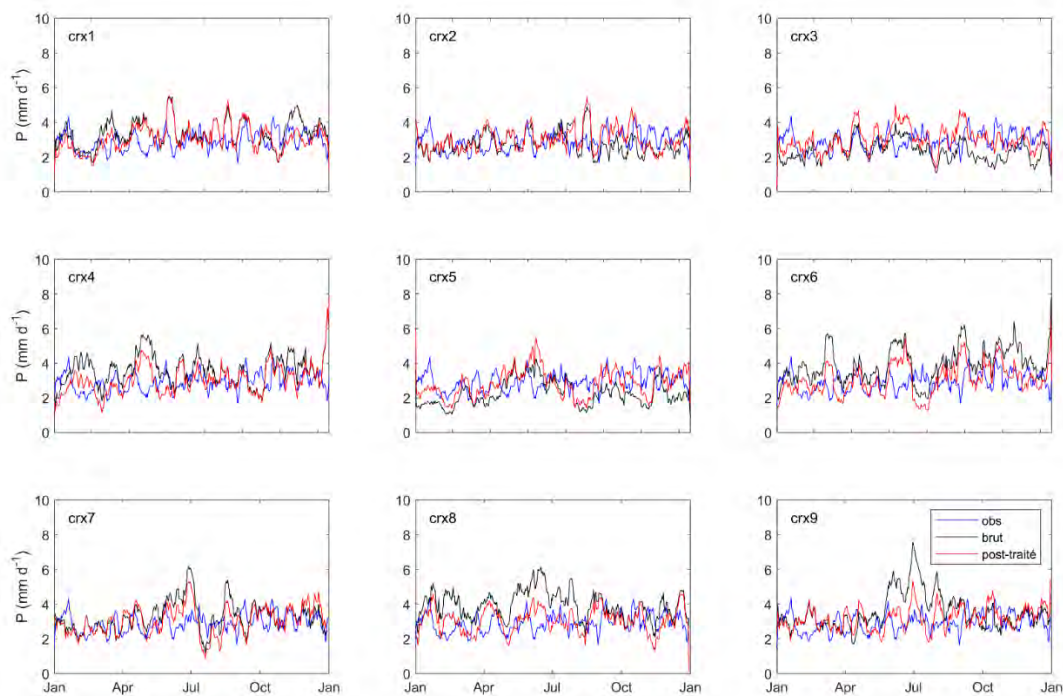


Figure E3 : Précipitations totales journalière brutes et post-traitées de l'ensemble NA-CORDEX, cycle annuel sur la période 1995 à 2004.

ANNEXE 2 - Rapport final de l'UQAM

Évaluation des scénarios de gestion intégrée et soutenable de l'eau dans le complexe tourbeux de Lanoraie – Eau souterraine

Rapport final

**Marie Larocque
Julien Chéné
Jonathan Chabot-Grégoire**

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

Département des sciences de la Terre et de l'atmosphère

28 mars 2024

Équipe de réalisation

Auteurs du rapport

Marie Larocque Responsable du projet, professeure, UQAM

Julien Chéné Étudiant à la maîtrise, UQAM

Jonathan Chabot-Grégoire Agent de recherche, UQAM

Référence à citer

Larocque, M., Chéné, J., Chabot-Grégoire, J. 2024. Évaluation des scénarios de gestion intégrée et soutenable de l'eau dans le complexe tourbeux de Lanoraie (SCELANEAU) – Eau souterraine. Rapport final. Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec, 42 p.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	v
1 INTRODUCTION.....	1
2 MÉTHODOLOGIE.....	2
2.1 Secteur étudié.....	2
2.2 Instrumentation	4
2.3 Conductivité hydraulique du sable	6
2.4 Modèle géologique conceptuel.....	6
2.5 Estimation de la recharge	7
2.6 Modèle d'écoulement souterrain.....	8
2.7 Analyse par scénarios	10
3 RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	12
3.1 Contexte hydrogéologique.....	12
3.2 Directions d'écoulement.....	14
3.3 Recharge de la nappe	17
3.4 Variations de niveaux	18
3.5 Facteurs qui influencent l'effet des pompages sur la nappe.....	23
4 SYNTHÈSE ET CONCLUSION.....	29
5 RÉFÉRENCES.....	31
6 ANNEXE 1 – Chroniques de niveaux de juin 2021 à octobre 2023.....	34

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Complexe tourbeux de Lanoraie avec le secteur du coteau Saint-Henri (encadré jaune)	3
Figure 2. Précipitation, évapotranspiration potentielle et température (2021, 2022, 2023 et moyennes) dans la zone d'étude.....	4
Figure 3. Secteur instrumenté	5
Figure 4. Dispositif pour mesurer le niveau de l'eau dans les étangs (Chéné, 2024).....	6
Figure 5. Méthode de fluctuation des niveaux de nappe (Chéné, 2024).....	7
Figure 6. Zone modélisée (Chéné, 2024)	9
Figure 7. Schématisation des flux d'eau souterraine à proximité des étangs (modifié de Chéné, 2024)	11
Figure 8. Localisation des coupes géologiques pour les transects 1 à 4 à l'échelle du complexe tourbeux (Chéné, 2024).....	12
Figure 9. Coupes géologiques à l'échelle du complexe tourbeux a) transect 1, b) transect 2, c) transect 3, d) transect 4 (Chéné, 2024).....	13
Figure 10. Conductivités hydrauliques a) essais de perméabilité <i>in situ</i> et b) valeurs dérivées des analyses granulométriques (Chéné, 2024)	14
Figure 11. Localisation des coupes hydrostratigraphiques pour les transects 5 à 8 à l'échelle du coteau Saint-Henri (Chéné, 2024).....	15
Figure 12. Coupes hydrostratigraphiques à l'échelle du coteau Saint-Henri a) transect 5, b) transect 6, c) transect 7, d) transect 8 (Chéné, 2024)	16
Figure 13 : Position des puits orientés dans le sens d'écoulement de l'eau autour de l'étang E1 (transect 5).....	20
Figure 14 : Rabattements observés à E1, S1, S2, T1 et T2 lors de l'été 2021.	21
Figure 15. Rabattements observés en réaction aux pompages dans les étangs a) en 2021 b) en 2022 et c) en 2023 (Chéné, 2024)	22
Figure 16. Différences de niveaux aux stations dans le sable, la tourbe et les étangs en fonction des saisons de 2021 à 2023 (Chéné, 2024)	23

Figure 17. Scattergramme des charges simulées en régime permanent en fonction des charges mesurées (Chéné, 2024)	24
Figure 18. Effet sur les charges de changements a) de la recharge et b) de la conductivité hydraulique (SC et A1 à A8) (Chéné, 2024)	25
Figure 19. Effet des pompages sur les charges simulées pour les scénarios faisant varier le débit pompé dans les étangs (SC, 2P, 2P2x, 2P3x) a) sur le transect 5 et b) sur le transect 7 (Chéné, 2024)	27
Figure 20. Effet des pompages sur les charges simulées pour les scénarios faisant varier le nombre et la position des pompages (SC, 2P, 5P, 10P, 20P) a) sur le transect 5 et b) sur le transect 7 (Chéné, 2024)	27
Figure 21 : Niveaux dans les piézomètres situés dans le sable, de juin 2021 à octobre 2023	34
Figure 22 : Niveaux dans les piézomètres situés dans la tourbe, de juin 2021 à octobre 2023	35
Figure 23 : Niveaux dans les piézomètres situés dans les étangs, de juin 2021 à octobre 2023	36

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Description des scénarios d'analyse de sensibilité et de pompages.....	11
Tableau 2. Recharge calculée avec la méthode de fluctuations des niveaux de nappe	17
Tableau 3. Changements dans les flux du sable vers l'étang (ΔV_{se}) et du flux de l'étang vers le sable (ΔV_{es}) des étangs, entre les scénarios de pompage (2P, 2P2x, 2P3x, 5P, 10P et 20P) et le scénario calibré (SC) (Chéné, 2024)	28

1 INTRODUCTION

Au printemps 2021, le MAPAQ a accordé une subvention à la Fédération de l'UPA de Lanaudière (FUPAL) dans le cadre du *Programme d'appui à la lutte contre les changements climatiques en agriculture* pour réaliser le projet intitulé « Évaluation de scénarios de gestion intégrée et soutenable de l'eau dans le complexe tourbeux de Lanoraie (SCELANEAU) ». La FUPAL, l'université McGill, l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) et l'UQAM étaient partenaires de ce projet.

La disponibilité de l'eau pour tous les usagers (population, agriculture et écosystèmes) est un enjeu majeur dans cette région productrice de pommes de terre. Un certain nombre de travaux ont été réalisés dans la région au cours des dernières décennies pour caractériser l'hydrogéologie de la région. Ces travaux ont permis de définir l'aquifère de surface, de définir l'épaisseur de matière organique (Rosa et al., 2009), de quantifier la recharge de la nappe (Charron et al., 2009), de modéliser les écoulements régionaux (Bourgault et al., 2014), et de comprendre l'évolution de la couverture végétale dans la tourbière (Pellerin et al., 2016).

Le volet « Eau souterraine » du projet SCELANEAU avait pour objectif de mieux comprendre les échanges entre l'eau souterraine et la tourbière dans la région du complexe tourbeux de Lanoraie, en présence de pompages dans les étangs d'irrigation situés à proximité de l'interface sable-tourbe. Il visait plus particulièrement à répondre aux questions suivantes :

- 1) Quel est le contexte hydrogéologique dans la zone d'étude ?
- 2) Quelles sont les directions d'écoulement dans l'aquifère sableux et dans la tourbe ?
- 3) Quel renouvellement l'aquifère sableux reçoit-il sous forme de recharge ?
- 4) Quelles sont les variations des niveaux d'eau souterraine dans le sable et dans la tourbe, et dans les étangs ?
- 5) Quels sont les facteurs qui influencent l'effet des pompages ?

L'équipe de l'UQAM est formée de la Pre Marie Larocque et de l'étudiant de maîtrise Julien Chéné, avec le soutien technique et scientifique des agents de recherche Sylvain Gagné et Jonathan Chabot-Grégoire. Ce rapport présente une synthèse des résultats obtenus dans le projet de maîtrise de Julien Chéné (Chéné, 2024, présentement en évaluation). Les détails des résultats et des interprétations présentés dans ce mémoire seront disponibles dans les prochains mois.

2 MÉTHODOLOGIE

2.1 Secteur étudié

Le complexe de Lanoraie se situe à 40 km au nord-est de Montréal et couvre 76 km². La zone étudiée dans le projet SCELANEAU s'étend cependant au-delà du complexe tourbeux sur une superficie de 364 km². Le volet « Eau souterraine » du projet SCELANEAU a focalisé sur le coteau Saint-Henri (Figure 1).

Dans la zone d'étude, la géologie du socle est représentée par la formation de Nicolet, formée majoritairement de shale et de mudstone. Cette roche typique de la Plate-forme du Saint-Laurent est recouverte de dépôts quaternaires dans la zone d'étude. Ces dépôts sont principalement d'origine marine (mer de Champlain) et sont représentés par des argiles et des silts pouvant atteindre des épaisseurs très importantes (LaSalle, 1973). À certains endroits, d'anciennes alluvions sableuses associées au delta de Sorel forment aujourd'hui les coteaux (MRNF, 2021).

L'aquifère superficiel connecté aux dépôts tourbeux est situé dans les sables du delta de Sorel. Cette nappe reçoit une recharge annuelle et s'écoule dans le sens général de la topographie, soit du sable vers la tourbière, du sable vers les petits cours d'eau de la région, ou du sable vers le fleuve Saint-Laurent (Bourgault et al., 2014).

Le complexe tourbeux s'est développé dans les dépressions topographiques du delta de Sorel. La tourbière est majoritairement minérotrophe, mais comporte également des portions ombrotrophes. L'épaisseur moyenne de la tourbe est de 2.6 m, mais les dépôts organiques peuvent atteindre 8 m par endroits (Rosa et al., 2009).

Cinq bassins versants interceptent le complexe tourbeux, soit ceux de la rivière Saint-Joseph, du ruisseau Point-du-Jour, du ruisseau Bras du Sud-Ouest, de la rivière Saint-Antoine et de la rivière Saint-Jean. Le complexe tourbeux est également sillonné de fossés mis en place au fil des décennies pour abaisser le niveau de la nappe et faciliter la croissance des arbres et l'agriculture.

Une agriculture maraîchère intensive nécessitant de l'irrigation est pratiquée sur les coteaux sableux, incluant pommes de terre, légumineuses, canneberges, courges et petits fruits. Selon Kilmartin et Madramootoo (2024), les pommes de terre représentent les deux tiers de la superficie irriguée dans la région. Des cultures de maïs, des champs de vignes et de pelouse, ainsi qu'une pépinière sont également présents. L'eau pour l'irrigation est prélevée dans des étangs agricoles, dont la majorité est située près du contact aquifère – tourbière, et dans les cours d'eau.

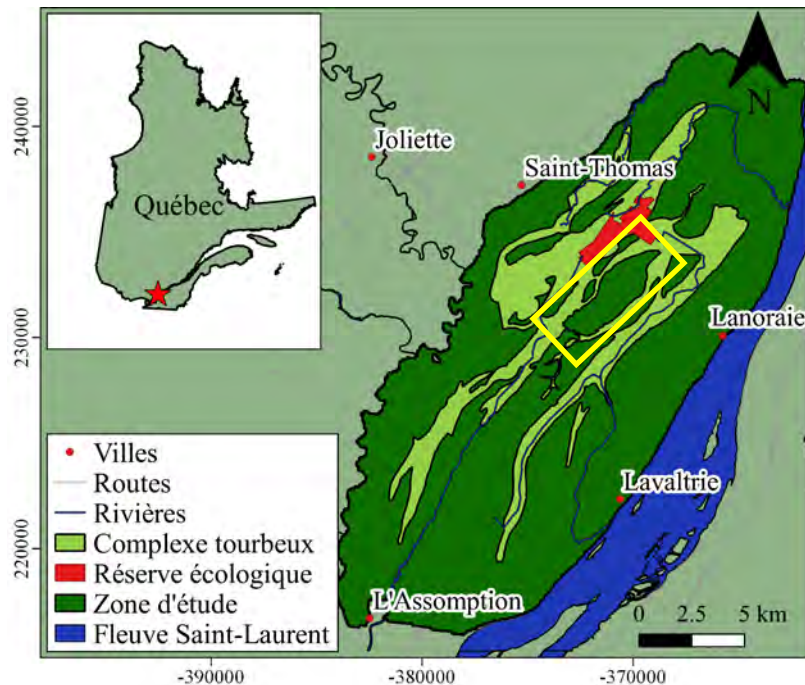


Figure 1. Complexe tourbeux de Lanoraie avec le secteur du coteau Saint-Henri (encadré jaune)

Les précipitations moyennes à long terme (1990-2020) sont de 1013 mm/an. Les températures mensuelles moyennes à long terme varient de -10.4°C en janvier à 19.9°C en juillet. Pour la même période, la température moyenne annuelle est de 5.6°C (ECCC, 2023). Les précipitations se font sous forme de neige du mois de décembre au mois de mars. L'évapotranspiration potentielle moyenne à long terme calculée avec la méthode de Oudin et al. (2005) est de 630 mm/an.

Au cours du projet, l'année hydrologique 2021 a été particulièrement chaude et sèche avec des précipitations de 868 mm/an, une température moyenne de 7.7°C, et une évapotranspiration potentielle de 682 mm/an. L'année hydrologique 2022 a été plus fraîche et humide, avec des précipitations de 1179 mm/an, une température moyenne de 6.6°C et une évapotranspiration de 651 mm/an. Malgré des pics de précipitation très importants en juillet et octobre 2023 (182 et 179 mm/mois) et des creux prononcés en septembre et novembre (21 et 54 mm/mois), la précipitation totale en 2023 (1117 mm/an) est similaire à celle de 2022. La température moyenne de 6.1°C en 2023 est également similaire à celle de 2022 (6.6°C), mais l'évapotranspiration totale annuelle est inférieure en 2023 (579 mm/an) comparativement à 2022 (651 mm/an). Les données météorologiques proviennent de la station d'Environnement Canada située à l'Assomption (ECCC, 2023) (Figure 2).

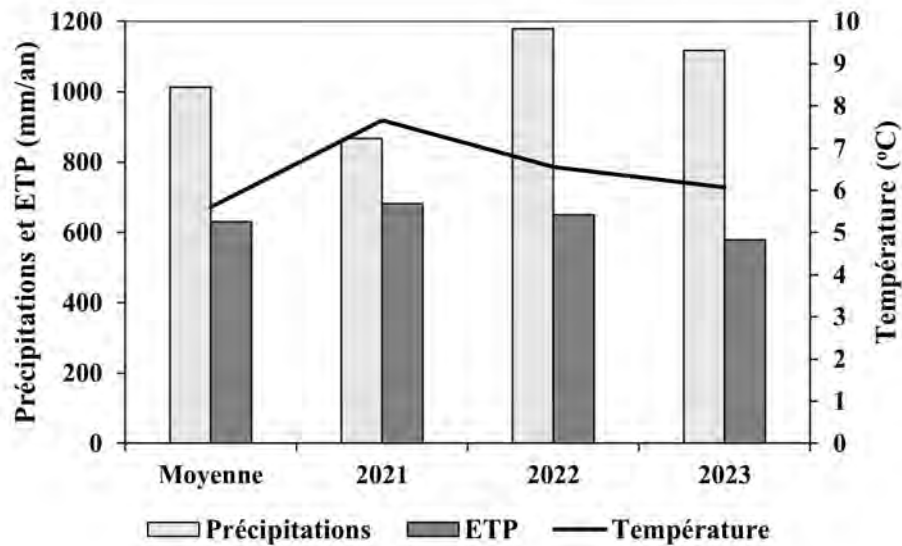


Figure 2. Précipitation, évapotranspiration potentielle et température (2021, 2022, 2023 et moyennes) dans la zone d'étude

2.2 Instrumentation

La zone instrumentée se situe sur le coteau Saint-Henri et à proximité de celui-ci (Figure 3). Neuf piézomètres (tubes PVC 2.5 cm de diamètre) ont été mis en place dans le sable à l'aide d'une foreuse de type Geoprobe en mai 2021. Leurs profondeurs varient entre 9 et 10 m. L'espace annulaire entre le forage et le PVC s'est rempli naturellement par le sable en place en profondeur et de la bentonite a été utilisée pour sceller la partie supérieure des forages. Une crépine de 3 m a été installée à la base des tubages. Les piézomètres ont été purgés pour retirer le matériel qui aurait pu s'infiltrer dans la crépine ainsi que dans l'extrémité ouverte du piézomètre à la suite de leurs installations. Des sondes de pressions *Solinst* junior ont été installées dans les piézomètres pour enregistrer les niveaux d'eau toutes les heures.

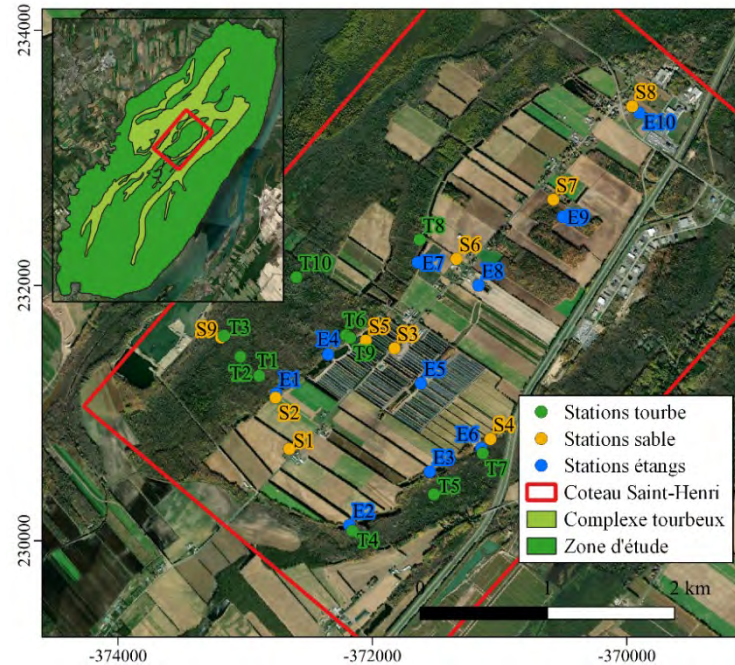


Figure 3. Secteur instrumenté

Dix piézomètres (tubes PVC 2.5 cm de diamètre) ont été mis en place dans la tourbière avec une tarière manuelle. Leurs profondeurs varient de 1.27 à 3.20 m. Les crépines sont installées à 0.30 m sous la surface et ont une longueur uniforme de 1.5 m. Sous la crépine, le piézomètre est composé de PVC plein en contact avec le minéral sous-jacent. Des sondes de pressions *Solinst* junior ont été installées dans les piézomètres pour enregistrer les niveaux d'eau toutes les heures.

Dix étangs utilisés pour l'irrigation ont été instrumentés. Des sondes *Solinst* junior ont été installées dans les étangs pour enregistrer les niveaux d'eau toutes les heures. Les sondes ont été placées dans une crépine attachée à un poids et un flotteur (Figure 4). Les distances entre l'emplacement où la sonde prend sa mesure, le fond de l'étang ainsi que le bouchon de la crépine, ont été mesurées. Toutes les installations ont été nivelées à l'aide d'un GPS différentiel (SXblue) et des données LiDAR (Données Québec, 2023).

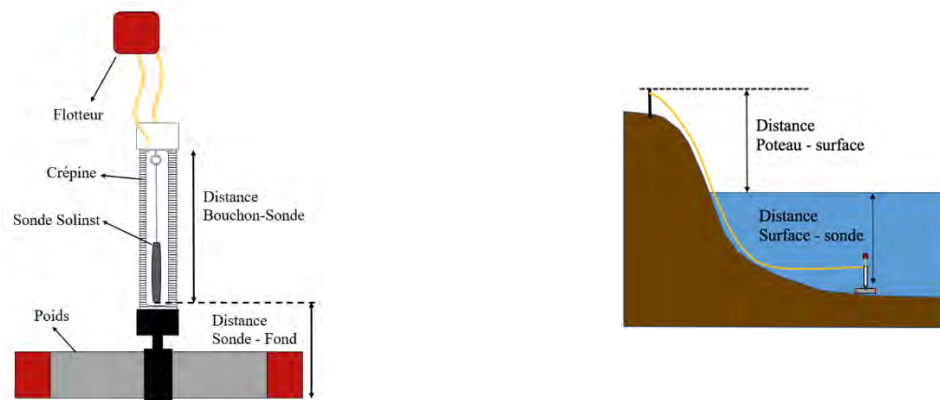


Figure 4. Dispositif pour mesurer le niveau de l'eau dans les étangs (Chéné, 2024)

2.3 Conductivité hydraulique du sable

Des essais de perméabilité à charge variable (*slugs tests*) ont été réalisés dans huit des neuf piézomètres dans le sable dans le but de déterminer la conductivité hydraulique du sable. La méthode pneumatique utilisée consiste en l'ajout de pression d'air dans le piézomètre à l'aide d'une pompe, dans le but de faire baisser le niveau d'eau. La pression est par la suite relâchée et des mesures sont prises lors de la remontée de l'eau dans le piézomètre. Les niveaux de nappe sont mesurés à l'aide d'une sonde *Solinst Levelogger modèle 3001*, qui enregistre les données chaque seconde. Dix essais hydrauliques pneumatiques ont été effectués à chaque piézomètre et les données ont été interprétées à l'aide de la méthode de Hvorslev (1951) pour quantifier la conductivité hydraulique du sable.

Quatre échantillons de matériel provenant de la profondeur où la crépine a été installée ont été récoltés pour chaque forage. Ils ont par la suite été analysés à l'aide d'un granulomètre laser au Laboratoire de géomorphologie de l'UQAM, dans le but d'obtenir leur granulométrie. L'outil HydroGeoSieveXL (Devlin, 2015) a permis de calculer la conductivité hydraulique à l'aide de différentes méthodes et de calculer la moyenne géométrique.

2.4 Modèle géologique conceptuel

Toutes les données disponibles de profondeur d'argile et du roc ont été compilées à partir des données récoltées sur le terrain au moment de la mise en place des piézomètres dans le sable, des données de forage d'un projet réalisé en parallèle par l'équipe de l'UQAM (Larocque et al., 2022) et des autres données disponibles (SNC-Lavalin Environnement inc., 2005 ; MELCCFP, 2023 ; Données Québec, 2023). Les données ont par la suite été interpolées spatialement pour créer des rasters d'élévation du roc et de l'argile. Les profondeurs de l'interface sous la tourbe,

mesurées dans ce projet et rapportées par Rosa et Larocque (2009), ont permis d’interpoler les profondeurs de tourbe autour du coteau Saint-Henri. Aux endroits où aucune information n’était disponible, les profondeurs ont été interpolées en ajoutant des points de contrôle ayant une profondeur de 2.6 m (valeur moyenne dans le complexe tourbeux) au centre de la tourbière et des points ayant une profondeur de 0.01 m aux limites latérales.

2.5 Estimation de la recharge

La recharge dans le sable a été calculée avec la méthode WTF (*Water table fluctuation*) (Healy et Cook, 2002). Cette méthode permet d’estimer la recharge à partir de la variation des niveaux d’eau dans les piézomètres pendant une période déterminée. Pour chaque chronique de niveaux, une courbe de récession maîtresse (*master recession curve - MRC*) a été calculée à l’aide du logiciel GWHAT (Gosselin, 2018) afin de prendre en compte l’écoulement de l’eau souterraine (Figure 5). Une moyenne mobile de 20 jours a été utilisée sur les niveaux mesurés pour réduire la variabilité à très court terme. Le calcul a été fait pour chaque station dans le sable, du 1^{er} octobre au 30 septembre pour les années hydrologiques 2022 et 2023 (les suivis ayant débuté en juin 2021, l’année hydrologique 2021 est incomplète et la recharge n’est pas calculée).

$$R = S_y * \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad \text{éq. 1}$$

R = recharge (mm/jour)

S_y = coefficient d’emmagasinement (-)

Δh = hausse de niveau de nappe résultant de l’événement (m)

Δt = durée de la hausse (jour)

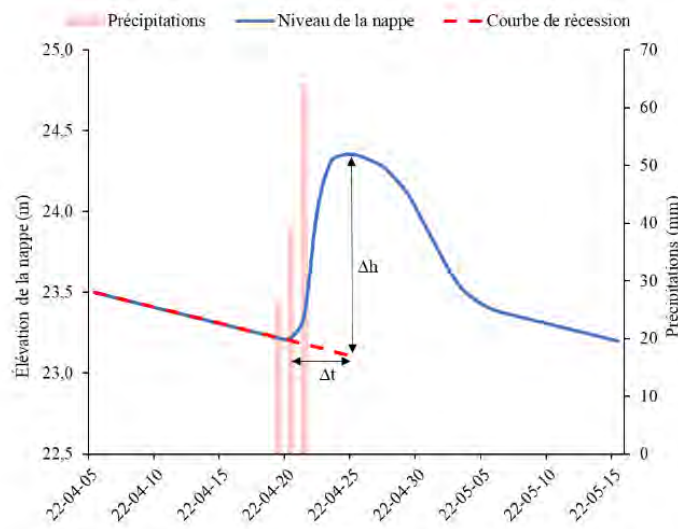


Figure 5. Méthode de fluctuation des niveaux de nappe (Chéné, 2024)

2.6 Modèle d'écoulement souterrain

Un modèle MODFLOW (Harbaugh, 2005) a été développé et calibré en régime permanent pour reproduire les conditions d'écoulement souterrain dans la zone d'étude. Le modèle a aussi été utilisé pour quantifier les flux échangés entre le sable, les étangs et la tourbière avec des scénarios de recharge et de conductivité hydraulique variables, et avec des scénarios de pompages différents. Ces scénarios ont pour but de mieux comprendre les facteurs qui influencent les niveaux de nappe.

Le modèle numérique comporte quatre couches dotées de paramètres hydrogéologiques distincts correspondant à la tourbe (acrotelme et catotelme ; deux couches), au sable et à l'argile. La zone modélisée a été sélectionnée en fonction de la topographie du coteau Saint-Henri et en fonction de l'emplacement des stations de mesure (Figure 6). Elle couvre une zone allant du début du coteau au sud-ouest jusqu'à sa limite au nord-est (5 511 600 m²). La limite sud-est de la zone modélisée suit la crête longitudinale du coteau. Du côté nord-ouest, la limite suit celle de la tourbière au nord, puis suit par la suite les tributaires de la rivière Point-du-Jour. Des cellules de 10 x 10 m sont utilisées (55 116 cellules par couche). L'épaisseur des couches stratigraphiques est variable dans l'espace et a été déterminée en suivant les matériaux et les couches du modèle conceptuel. Les simulations sont faites en régime permanent avec le solveur NWT de MODFLOW.

La bordure sud-est du modèle est une limite à flux nul positionnée sur la ligne de partage des eaux au centre du coteau Saint-Henri. La bordure nord-est du modèle est également une limite à flux nul, correspondant à une ligne d'écoulement souterrain. Une partie de la bordure nord-ouest est à flux nul et l'autre partie est une limite de drainage. Une partie de la limite sud-ouest est également une limite de drainage et une autre est une limite à flux nul positionnée sur une ligne d'écoulement. Des drains sont utilisés pour représenter le drainage naturel dans la tourbière et les 30 étangs de la zone modélisée sont représentés comme étant des lacs.

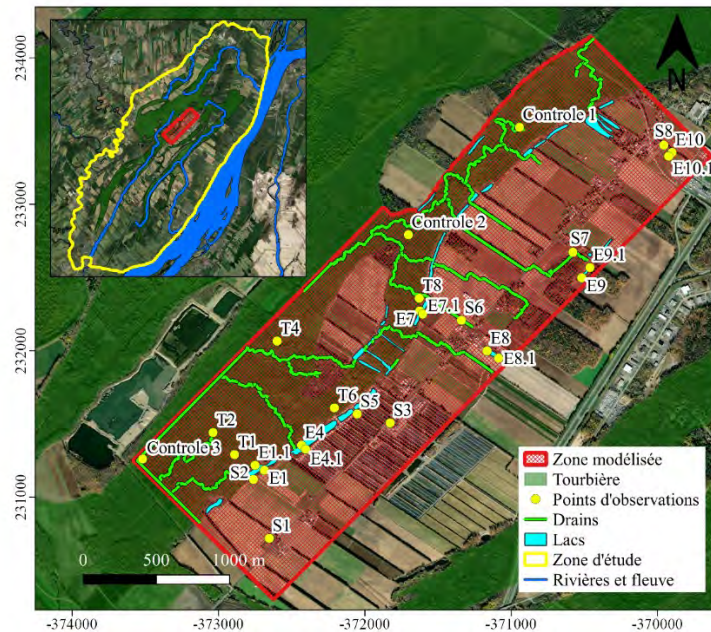


Figure 6. Zone modélisée (Chéné, 2024)

Les conductivités hydrauliques du sable et de la tourbe ont été calibrées automatiquement (logiciel PEST ; White et al., 2020) dans la gamme des conductivités hydrauliques obtenues dans le projet et de celles rapportées par Rosa et Larocque (2008) pour les dépôts tourbeux. Les autres paramètres (conductivité hydraulique de l'argile, anisotropies verticales des matériaux et conductance des drains) proviennent de la littérature (Johnson, 1967 ; Domenico et al., 1997 ; Rivera, 2014 ; Meizhao, 2021). La recharge du sable a été imposée dans le modèle basé sur les résultats de la méthode WTF pour l'année 2022 qui représente une année de conditions météorologiques moyennes. Les charges hydrauliques mesurées à 19 stations (sable, tourbe et étangs), ainsi que trois charges supplémentaires dans la tourbière (points de contrôle) ont été utilisées pour calibrer le modèle. La recharge de la tourbe a été calibrée manuellement à 221 mm/an pour représenter adéquatement les niveaux de nappe dans la tourbière. Cette valeur est similaire à celle d'autres études réalisées dans la région et au Québec (Bourgault et al., 2014 ; Levison et al., 2014 ; Lambert et al., 2022 ; Charron, 2019).

Le modèle a été calibré en régime permanent pour des conditions moyennes considérées représentatives des écoulements naturels. Aucun pompage dans les étangs n'a été utilisé pour la calibration.

2.7 Analyse par scénarios

Pour estimer l'effet d'une erreur sur la conductivité hydraulique et sur la recharge dans les résultats du modèle, une analyse de sensibilité a été réalisée. La gamme des conductivités hydrauliques du sable qui a été testée est basée sur les données obtenues dans le projet. La gamme des valeurs utilisées pour la recharge du sable correspond aux recharges maximale et minimale de l'année 2022, année considérée représentative des conditions météorologiques moyennes dans la région.

Puisque le modèle représente l'écoulement en régime permanent, il ne permet pas de reproduire l'évolution temporelle des baisses et des remontées qui se produisent en réaction au début et à la fin des pompages. Néanmoins, le modèle calibré a été utilisé pour simuler des scénarios avec pompage qui permettent d'illustrer l'effet de ceux-ci sur les niveaux dans les étangs, dans le sable et dans la tourbe. Cet exercice ne tient pas compte de l'effet de l'emmagasinement sur les niveaux de nappe et est basé sur une représentation très simplifiée de la dynamique réelle de l'écoulement souterrain. Même si les résultats ne peuvent pas être utilisés pour guider directement l'exploitation des étangs, ils apportent néanmoins des données nouvelles sur les rabattements qui peuvent résulter des pompages, permettant de pousser plus loin la discussion. Le débit utilisé pour représenter l'effet des pompages à court terme sur les étangs (débit de référence) a été ajusté de manière à reproduire les baisses de niveau observées dans les étangs E1 et E7 en 2021. C'est donc l'effet des pompages sur les niveaux dans les étangs plutôt que le débit pompé qui fait l'objet de l'analyse des résultats (les débits réellement pompés ne sont pas connus et ne peuvent pas être estimés à partir des variations de niveaux, car la bathymétrie des étangs n'a pas été mesurée).

Plusieurs scénarios ont été utilisés pour approfondir la compréhension du modèle (Tableau 1). Ces scénarios incluent le modèle calibré (SC), deux scénarios de variation de la recharge seule qui représentent des conditions météorologiques plus sèches (A1) et plus humides (A2), deux scénarios de variation de la conductivité hydraulique du sable qui représentent des conditions moins perméables (A4) et plus perméables (A7), ainsi que des scénarios combinant des variations à la fois de la recharge et de la conductivité hydraulique (A3, A5, A6 et A8). Trois scénarios avec pompage aux étangs E1 et E7 seulement ont été testés avec le pompage de référence qui produit les rabattements observés dans ces étangs (2P), avec un débit deux fois plus grand (2P2x) et avec un débit trois fois plus grand (2P3x). Trois autres scénarios avec le pompage de référence ont été testés à cinq étangs situés sur la crête du coteau sans pompage à E1 et E7 (5P), dix étangs dont cinq sur la crête (E8, E9 et E10, incluant deux autres étangs non instrumentés près

du E9) et cinq étangs près de la tourbière incluant E1 et E7 (10P), et vingt étangs dont cinq sur la crête et quinze près de la tourbière incluant E1 et E7 (20P).

Les scénarios ont été analysés pour quantifier les flux d'eau souterraine qui alimentent les étangs, les flux provenant des étangs qui alimentent le sable, de même que les flux du sable en aval des étangs qui alimentent la tourbière (Figure 7). R_t et R_s représentent la recharge de la tourbe et du sable ; h_t , h_e et h_s représentent les charges dans la tourbe, les étangs et le sable ; P et ET représentent la précipitation et l'évapotranspiration sur les étangs ; V_{se} , V_{es} et V_{st} représentent respectivement les volumes d'eau souterraine du sable vers les étangs, des étangs vers le sable en aval et du sable en aval vers la tourbe.

Tableau 1. Description des scénarios d'analyse de sensibilité et de pompages

Scénario	Description
SC	Scénario calibré
A1	Diminution de la recharge
A2	Augmentation de la recharge
A3	Diminution de la recharge + diminution de la conductivité hydraulique du sable
A4	Recharge calibrée + diminution de la conductivité hydraulique du sable
A5	Augmentation de la recharge + diminution de la conductivité hydraulique du sable
A6	Diminution de la recharge + augmentation des conductivités hydrauliques du sable
A7	Recharge calibrée + augmentation de la conductivité hydraulique du sable
A8	Augmentation de la recharge + augmentation de la conductivité hydraulique du sable
2P	Pompages dans les étangs E1 et E7 avec débit de référence
2P2x	Pompages dans les étangs E1 et E7 avec débit de référence doublé
2P3x	Pompages dans les étangs E1 et E7 avec débit de référence triplé
5P	Pompages dans 5 étangs sur la crête du coteau avec débit de référence (sans E1 et E7)
10P	Pompages dans 5 étangs sur la crête du coteau et 5 étangs près de la tourbière (incluant E1 et E7) avec débit de référence
20P	Pompages dans 5 étangs sur la crête du coteau et 15 étangs près de la tourbière (incluant E1 et E7) avec débit de référence

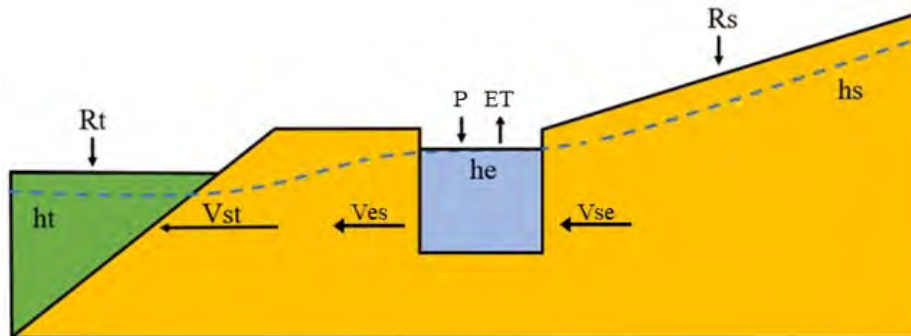


Figure 7. Schématisation des flux d'eau souterraine à proximité des étangs (modifié de Chéné, 2024)

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Contexte hydrogéologique

Les résultats montrent que la transition d'un sable fin avec des horizons de sable fin à moyen vers les argiles de la mer de Champlain est présente sur toute la zone d'étude, mais varie en termes d'épaisseur et de granulométrie, comme suggéré par Hardy (2007) et Technorem (2008). Par exemple, sur le coteau Saint-Henri, la transition se situe entre 7-10 m et 12-16 m, tandis que Larocque et al. (2022) ont montré qu'ailleurs sur la zone d'étude, la profondeur de l'argile varie de 4 à 25 m. L'ensemble des données disponibles (Figure 8) montre que l'épaisseur d'argile dans la région varie de quelques mètres dans le nord-ouest jusqu'à 32 m vers le sud-est, avec une épaisseur moyenne de 20 m. Dans la section nord-ouest du transect, le roc s'élève jusqu'à une altitude d'environ 15 m. L'épaisseur du sable atteint jusqu'à 25 m par endroits (Figure 9).

La cinquantaine de sondages effectués dans la tourbe autour du coteau Saint-Henri montrent que les matériaux sous la tourbe sont la plupart du temps du sable fin. La tourbière reposerait donc sur des matériaux relativement perméables dans ce secteur. Des horizons de sable silteux ont par ailleurs été observés dans certains des échantillons récoltés dans les secteurs où la tourbe est plus profonde, ce qui correspond aux résultats de Rosa et Larocque (2008). Ces auteurs avaient également observé que la tourbe reposait sur l'argile localement.

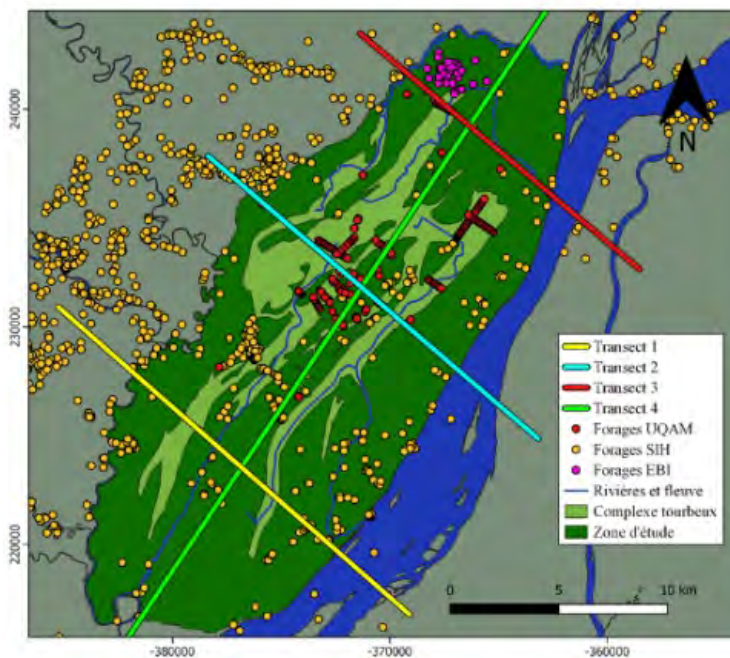


Figure 8. Localisation des coupes géologiques pour les transects 1 à 4 à l'échelle du complexe tourbeux (Chéné, 2024)

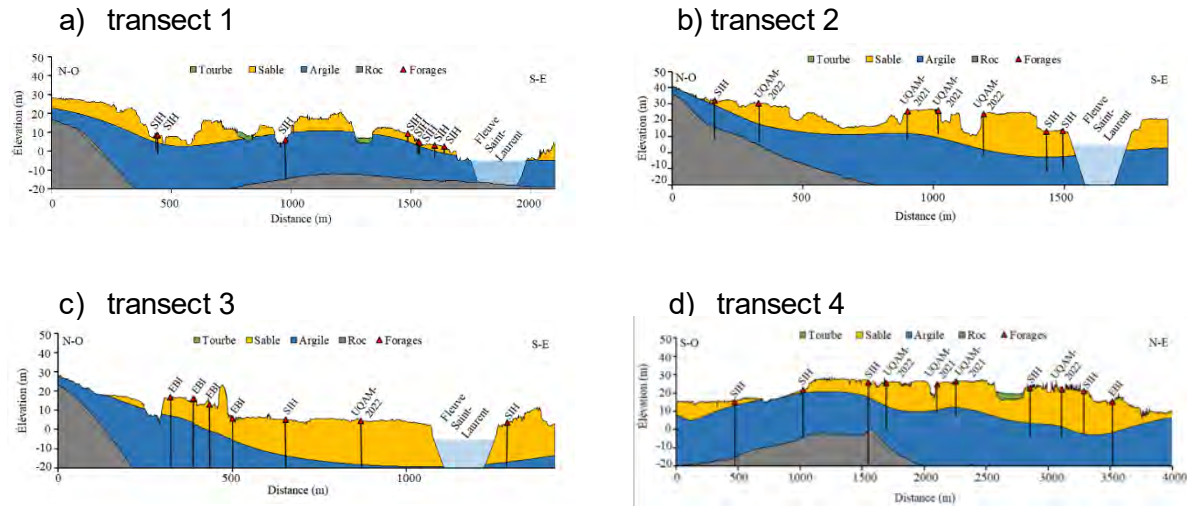


Figure 9. Coupes géologiques à l'échelle du complexe tourbeux a) transect 1, b) transect 2, c) transect 3, d) transect 4 (Chéné, 2024)

Les résultats des essais de perméabilité à charge variable montrent des conductivités hydrauliques entre 5.9×10^{-5} et 1.9×10^{-4} m/s pour le sable du coteau Saint-Henri (Figure 10a). Ces résultats représentent les conditions autour de la crépine et pourraient ne pas être représentatifs des conditions de tout le massif sableux (Chapuis, 1989). Les analyses granulométriques effectuées sur les échantillons de sable prélevés à la profondeur de la crépine ont quant à elles permis d'estimer des conductivités hydrauliques entre 2.1×10^{-4} et 1.8×10^{-7} m/s (Figure 10b). Les valeurs les plus faibles de conductivités hydrauliques provenant des analyses granulométriques proviennent des piézomètres S2 et S4, ce qui peut traduire la présence d'horizons de sable plus fin ou silteux par endroits. Il est important de rappeler que ces résultats proviennent d'échantillons remaniés qui peuvent ne pas être représentatifs des conditions *in situ*. De manière générale, les deux méthodes donnent des résultats relativement similaires et comparables à celles décrites par Tecslut (2005) et Technorem (2008). Les résultats confirment la présence de sable fin à moyen sur le coteau Saint-Henri.

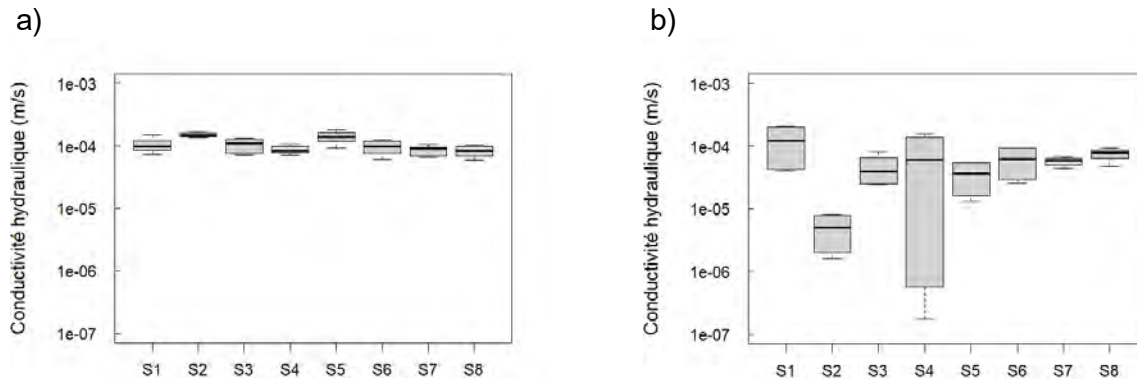


Figure 10. Conductivités hydrauliques a) essais de perméabilité *in situ* et b) valeurs dérivées des analyses granulométriques (Chéné, 2024)

3.2 Directions d'écoulement

Sur tous les transects (Figure 11), les niveaux ont été généralement plus bas en 2021 qu'en 2022 et plus bas en 2022 qu'en 2023. Ceci s'explique entre autres par les précipitations plus faibles et les températures plus élevées en 2021 et par les précipitations importantes de la deuxième moitié de l'été en 2023. Sur le transect 5 (Figure 12a), les différences sont surtout marquées entre 0 et 500 m (dans le secteur influencé par la carrière). Elles s'atténuent au S1, situé près de la crête du coteau Saint-Henri, et vers le E2 et le T4. Sur le transect 6 (Figure 12b), les différences de niveaux entre 2021 et 2022 sont faibles, mais les niveaux de 2023 sont plus élevés dans le sable en 2023. L'étang entre le T6 et le S5 n'a pas été instrumenté, mais des pompages importants pour creusage en 2021 et 2022 ont entraîné une baisse des niveaux dans les chroniques des stations dans la tourbe et dans le sable à proximité (T9, T6, S5 et S3). Dans ces conditions de pompage à cet étang, la direction de l'écoulement est de la tourbière vers l'étang. Le transect 7 (Figure 12c) montre des différences de niveaux similaires entre les trois années à l'étang E8, mais ces différences s'atténuent à l'étang E7 et dans la tourbe. Sur le transect 8 (Figure 12d), les différences entre les trois années sont similaires aux extrémités du coteau, mais aux piézomètres S6 et S7, les niveaux sont similaires en 2022 et en 2023. La ligne de partage des eaux dans le sens longitudinal du coteau Saint-Henri est bien visible sur le transect 8, dans le secteur de la station S7. Sur tous les transects, les directions d'écoulement sont les mêmes pour les deux années, i.e. du sable, vers les étangs et vers la tourbe des deux côtés du coteau Saint-Henri, à l'exception du transect 6 où la tourbe semble alimenter l'étang.

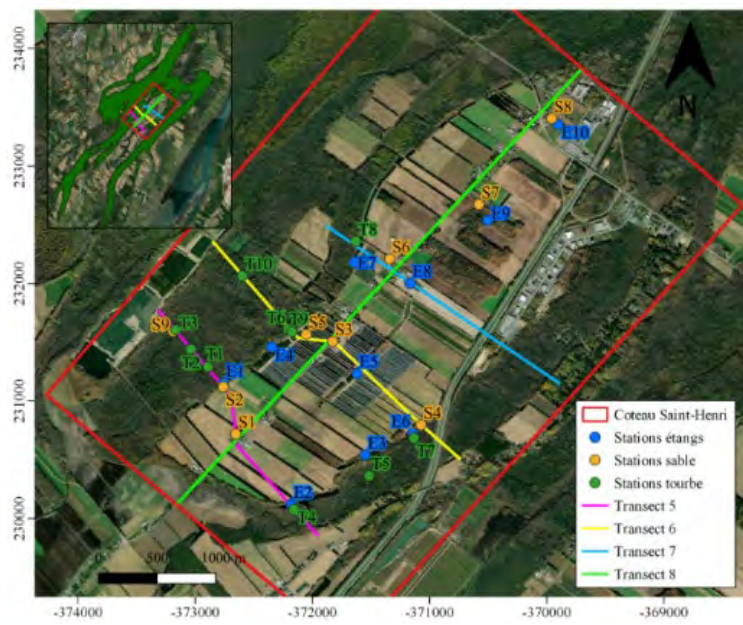


Figure 11. Localisation des coupes hydrostratigraphiques pour les transects 5 à 8 à l'échelle du coteau Saint-Henri (Chéné, 2024)

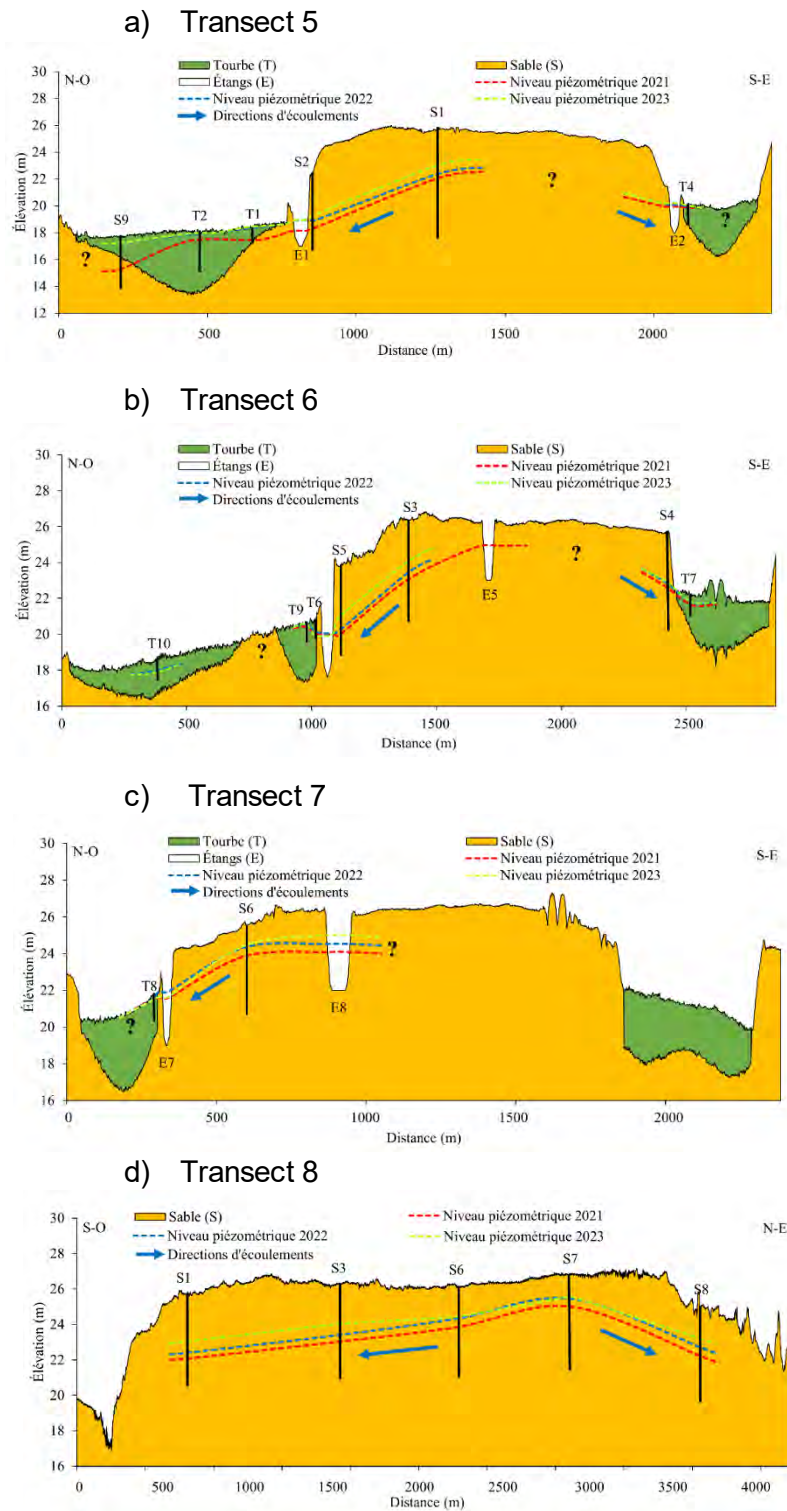


Figure 12. Coupes hydrostratigraphiques à l'échelle du coteau Saint-Henri a) transect 5, b) transect 6, c) transect 7, d) transect 8 (Chéné, 2024)

3.3 Recharge de la nappe

Les niveaux des piézomètres S1, S4, S6, S7 et S8 ont été utilisés pour calculer la recharge à l'aide de la méthode des fluctuations de niveaux de nappe (Healy et Cook, 2002) pour les années 2022 et 2023 (l'année 2021 n'a pas été analysée, car les piézomètres ont été mis en place après la fin de la recharge printanière). Les piézomètres S2, S3 et S5 ont été exclus du calcul, car ils ont été influencés par des pompages dans les étangs à proximité. Pour un sable fin à moyen comme celui du coteau Saint-Henri, la littérature scientifique suggère un S_y entre 0.10 et 0.28 (Johnson, 1967 ; Domenico et Schwartz, 1997 ; Meizhao et al., 2021). Les résultats obtenus avec cette gamme de valeurs varient de 88 mm/an (S4) à 571 mm/an (S6 et S3) (Tableau 2). La recharge moyenne pour tous les piézomètres varie de 152 mm/an avec un S_y minimum, à 426 mm/an avec un S_y maximum. Les conditions humides et généralement fraîches de l'été 2023 ont entraîné une recharge plus élevée qu'en 2022. La gamme de valeurs obtenues reflète 1) la variabilité spatiale et temporelle de la recharge, 2) la méconnaissance du S_y et 3) l'imprécision de la méthode de fluctuation des niveaux de nappe. Néanmoins, la moyenne de la recharge calculée avec un S_y moyen pour les années 2022 et 2023 est du même ordre de grandeur que la recharge rapportée par Bourgault et al. (2014) et Charron et al. (2019).

Tableau 2. Recharge calculée avec la méthode de fluctuations des niveaux de nappe

Station	Année hydrologique	Recharge S_y min. (mm/an)	Recharge S_y max. (mm/an)	Recharge avec S_y moyen (mm/an)
S1	2022	121	341	231
S1	2023	125	349	237
S3	2022	139	391	265
S3	2023	204	571	387
S4	2022	88	249	169
S4	2023	88	247	168
S6	2022	186	521	353
S6	2023	146	409	277
S7	2022	186	521	353
S7	2023	185	517	351
S8	2022	150	422	286
S8	2023	204	570	387
Moyenne	2022	145	408	276
Moyenne	2023	159	444	301
Moyenne	2022 et 2023	152	426	289

Il est intéressant de comparer ces résultats avec les données obtenues par (Kilmartin et Madramootoo, 2024) dans le volet du projet SCELANEAU portant sur l'estimation des besoins actuels et futurs en irrigation pour le complexe agricole de Lanoraie. Les résultats du modèle AquaCrop de Kilmartin et Madramootoo (2024) montrent que l'eau utilisée pour l'irrigation sur le coteau Saint-Henri (toutes cultures confondues) est équivalente à 79 mm en 2021 et à 45 mm en 2023 (volume total simulé divisé par la superficie du coteau). La recharge n'a pas pu être estimée en 2021 puisque les piézomètres ont été installés en juin seulement, mais le volume simulé pour l'irrigation est cohérent avec les conditions plus chaudes et sèches de 2021. Pour 2023, l'irrigation représente 15% de la recharge annuelle sur le coteau Saint-Henri (années hydrologiques du 1^{er} octobre à la fin septembre). Ce pourcentage d'utilisation est relativement faible et n'indique pas une surutilisation de l'eau souterraine sur le coteau Saint-Henri. Certains auteurs (p.ex., Zhou, 2009) montrent toutefois que la fraction de la recharge pompée ne représente pas toujours la meilleure estimation des volumes qui peuvent être pompés sans avoir un impact sur le milieu environnant.

Charron et al. (2019) ont estimé que 90% de l'eau utilisée pour l'irrigation de la pomme de terre est prélevée par les plantes et 10% de cette eau percole vers la nappe sous la forme d'un retour d'irrigation. Dans le présent projet, l'analyse des chroniques de niveaux de nappe n'a pas permis d'identifier une remontée de la nappe résultant d'une irrigation excédentaire percolant jusqu'à la zone saturée. Il est possible qu'un retour d'irrigation se produise dans certaines conditions, mais que celui-ci soit très faible et décalé dans le temps, donc difficile à distinguer des variations naturelles de niveaux de nappe et difficile à relier aux événements d'irrigation.

3.4 Variations de niveaux

Les variations de niveaux analysées couvrent la période entre juin 2021 et octobre 2023 (Chéné, 2024) (voir chroniques Annexe 1). De manière générale, les piézomètres dans le sable montrent une baisse graduelle des niveaux de nappe entre juin et novembre 2021, suivie d'une légère remontée entre novembre et fin décembre (Figure 20). Une baisse continue est observée jusqu'au printemps 2022, suivie d'une remontée entre la mi-mars et la fin mai. Les variations mensuelles de niveaux sur plusieurs mois sont moins visibles en 2022, mais une remontée est observée à plusieurs stations du début d'avril et à la mi-mai 2023. Les niveaux suivent une légère tendance à la baisse à l'automne 2023, mais ponctuée d'une remontée causée par un événement important de précipitations en octobre. Certaines chroniques (S2, S5 et S9) font exception à cette cyclicité, au cours des années 2021 et 2022. De manière générale, les niveaux de 2021 sont plus bas que

ceux de 2022 et de 2023, traduisant les conditions météorologiques particulières de ces trois années.

Les niveaux dans la tourbe (Figure 21) varient beaucoup moins que ceux du sable ou des étangs. Ceci s'explique probablement par le coefficient d'emménagement élevé de la tourbe (comparativement à celui du sable) qui fait en sorte que les variations de niveaux peuvent être très atténuées et fortement décalées dans le temps à la suite d'un changement dans les flux entrants et sortants des dépôts organiques. Les niveaux de nappe sont particulièrement bas à certaines stations dans la tourbe situées à proximité des étangs pompés, notamment à l'été 2021, avec des baisses graduelles et soutenues tout au long de la saison pour atteindre des valeurs de près de 1 m à la station T1. Ces baisses importantes pourraient être causées par un effet cumulatif de l'interruption sporadique (pendant les pompages) de l'apport d'eau du coteau sableux à la tourbe en raison du pompage des étangs à proximité. La recharge printanière est visible à la majorité des stations en 2022, avec des remontées en mars. Au printemps 2023, la recharge est uniquement visible à certaines stations.

Les niveaux dans les étangs pompés (Figure 22) montrent très clairement l'effet des pompages, avec des baisses rapides de niveaux et des remontées dans les jours et semaines qui suivent. En 2021 et 2022, certaines remontées suivant des périodes de pompages ne sont pas terminées lorsque de nouveaux pompages débutent. Lors des pompages, les étangs ne sont pas complètement vidés. Outre ces variations ponctuelles dans le temps, une baisse graduelle et généralisée des niveaux dans les étangs est observée de juin à novembre 2021. Les niveaux remontent ensuite jusqu'à décembre 2021, puis rebaissent graduellement jusqu'au mois de mars 2022. Le niveau remonte de la mi-mars à la fin mai 2022, alors qu'une descente commence à la mi-avril. La descente se poursuit dans la plupart des étangs jusqu'à la mi-septembre, et par la suite, les niveaux varient peu jusqu'à la mi-mars 2023 où une remontée est observée. Les niveaux baissent au cours de l'été 2023. Ces variations des niveaux dans les étangs traduisent les apports d'eau souterraine après la fin des pompages et en cours de saison, des apports qui changent en fonction des niveaux de nappe.

Au cours de l'été 2021, le manque de précipitations et les pompages consécutifs dans l'étang E1 ont eu des effets variables sur les niveaux mesurés dans les piézomètres situés dans le sens d'écoulement de l'eau (Figure 13, zoom sur le transect 5 ; Figure 14). Au site T1 (150 m de l'étang), les niveaux diminuent de manière marquée au cours de l'été et la baisse totale atteint près de 1 m, ce qui est une baisse rarement rencontrée dans une tourbière. Les niveaux du T1 varient très légèrement suite à un pompage dans l'étang E1, sans doute en raison de l'important

emmagasinement dans la tourbe. Au site T2 (350 m de l'étang), les niveaux varient peu jusqu'à la fin juillet et diminuent ensuite d'une trentaine de cm jusqu'à la fin août, une variation considérée normale dans une tourbière. Le piézomètre S2 (environ 30 m de l'étang) réagit rapidement et de manière visible aux fluctuations de niveau dans l'étang. Au site S1 (environ 420 m de l'étang), les rabattements induits par les pompages sont à peu près indétectables, mais les niveaux baissent graduellement d'une trentaine de cm entre juin et la fin août (Figure 14). Ces résultats indiquent que la zone d'influence d'un pompage dans le E1 s'étend au-delà du S2 dans le coteau, et probablement au-delà du T1 du côté de la tourbière.

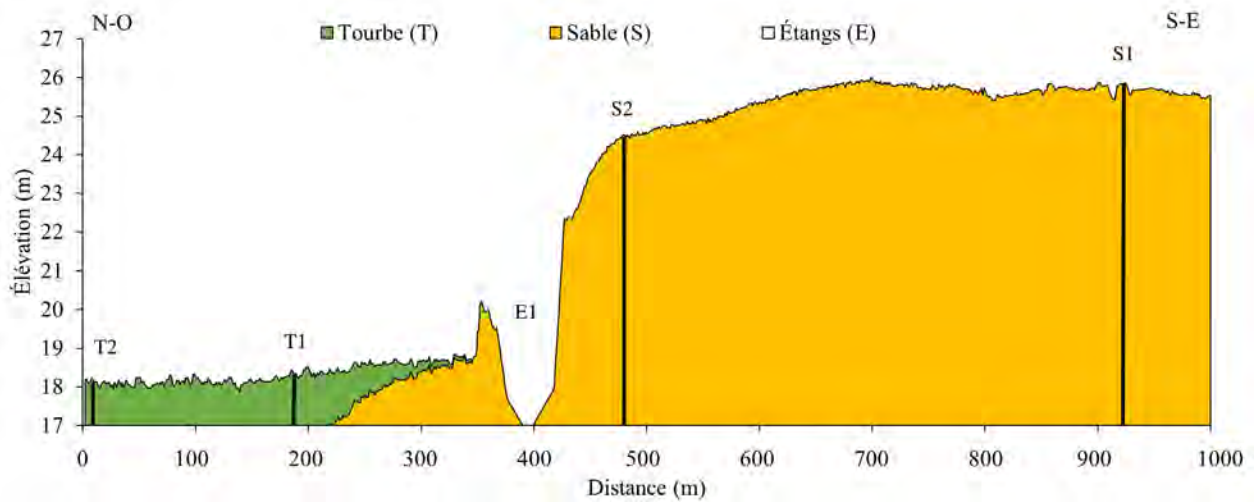


Figure 13 : Position des puits orientés dans le sens d'écoulement de l'eau autour de l'étang E1 (tranchée 5)

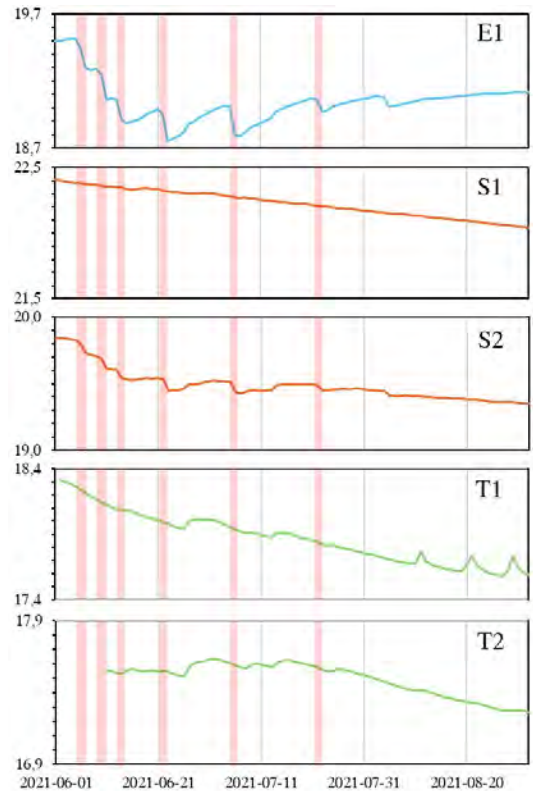


Figure 14 : Rabattements observés à E1, S1, S2, T1 et T2 lors de l'été 2021.

Il est intéressant d'examiner de plus près les rabattements induits dans les étangs par les pompages au cours des étés 2021 (étangs E1, E3, E5 et E7), 2022 (E2, E3, E8 et E9) et 2023 (E1, E3 et E7) (Figure 15). Il y a eu plus d'événements de pompages en 2021 qu'en 2022 et plus de pompages en 2022 qu'en 2023. La période pendant laquelle des pompages ont été réalisés a été plus longue en 2021 (de juin à octobre), en raison des conditions sèches et chaudes de l'été. Les pompages de 2022 ont eu lieu entre la fin juin et la mi-août seulement. En 2023, les étangs instrumentés ont été pompés entre mai et la mi-juillet, ce qui reflète les conditions très humides de la deuxième moitié de l'été. La durée des pompages varie de 3 à 22 h en 2021, de 5 à 31 h en 2022 et de 4 à 18 h en 2023. Le rabattement mesuré lors des pompages de 2021 varie de 0.06 m (E3, E5, E7) à 0.55 m (E5). Pour l'année 2022, les rabattements dans les étangs ont varié entre 0.16 (E2) et 0.84 m (E9) et en 2023, ils ont varié de 0.04 m (E7) à 0.24 m (E1). Les baisses de niveau dans les étangs E1 et E7 sont sensiblement les mêmes en 2021 et en 2023, mais la saison de 2023 a été beaucoup plus courte. Celles de l'étang E3 (seul étang pompé les trois années) sont similaires en 2022 et 2023, mais plus élevées en 2021.

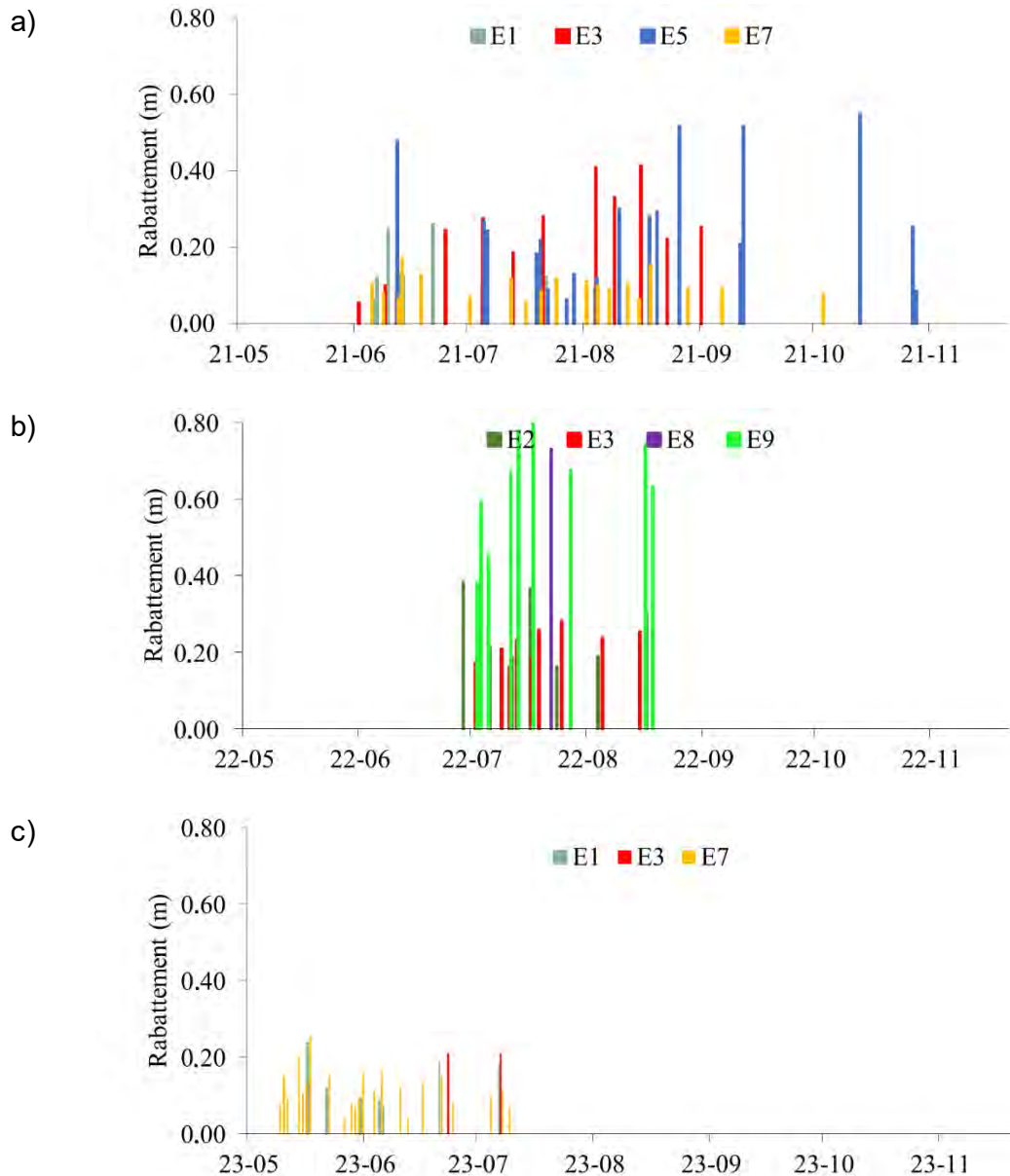


Figure 15. Rabattements observés en réaction aux pompages dans les étangs a) en 2021 b) en 2022 et c) en 2023 (Chéné, 2024)

Les différences de niveaux entre le début et la fin des saisons permettent de visualiser les variations temporelles de niveaux sur de plus longues périodes (Figure 16 ; été = juin à août, automne = septembre à novembre, hiver = décembre à février, printemps = mars à mai). Les différences entre le niveau du début et de la fin des saisons confirment qu'à l'exception de l'été 2021, les variations de niveaux dans le sable sont plus importantes que celles dans la tourbe. Les variations dans les étangs sont généralement supérieures (automne 2021, printemps 2022, été 2022, automne 2022 et hiver 2023), mais aussi parfois à peu près égales (été 2021, hiver 2022)

ou même inférieures (hiver 2023) à celles dans le sable. À l'été 2021 et à l'été 2022, les variations de niveau à la majorité des stations sont à la baisse. L'été 2023 est différent et montre des hausses pour la majorité des stations. À l'automne 2021, le niveau de la majorité des stations dans la tourbe et les étangs ont remonté et une diminution est observée dans les niveaux des stations du sable. À l'automne 2022, les niveaux dans le sable sont aussi à la hausse, mais ceux dans la tourbe ont un peu baissé. Au cours de l'hiver 2022, les niveaux dans les étangs et dans la tourbe ont augmenté, mais ceux dans le sable ont légèrement diminué, ce qui contraste avec l'hiver 2023 pendant lequel les niveaux ont été à peu près stables. Au printemps 2022, une remontée est observée dans tous les niveaux, tandis qu'au printemps 2023, la remontée n'est pas visible dans la tourbe.

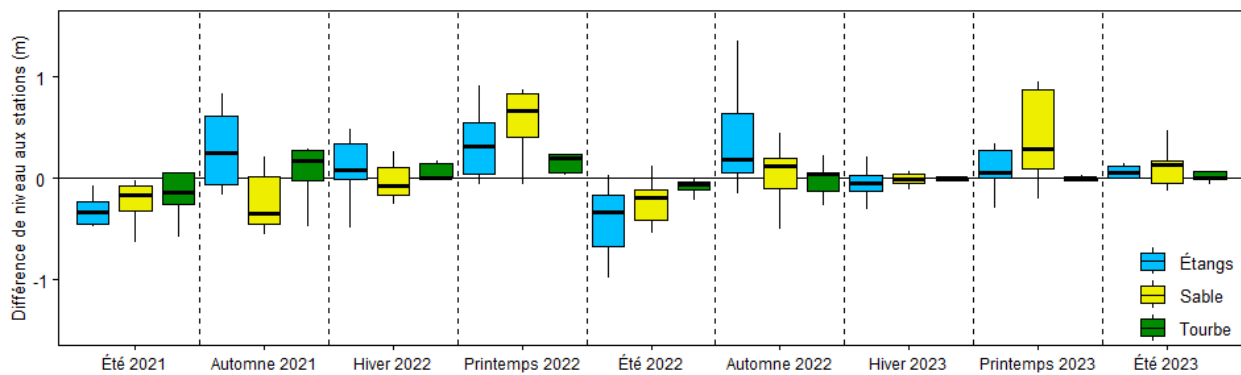


Figure 16. Différences de niveaux aux stations dans le sable, la tourbe et les étangs en fonction des saisons de 2021 à 2023 (Chéné, 2024)

3.5 Facteurs qui influencent l'effet des pompages sur la nappe

Le modèle calibré en régime permanent a permis de reproduire les charges moyennes mesurées de manière satisfaisante : $R^2 = 0.97$, $EM = 0.04$ m (erreur moyenne), $EMA = 0.26$ m (erreur moyenne absolue), $RMSE = 0.15$ m (erreur quadratique moyenne) (Figure 17). Le modèle parvient donc à représenter de manière générale et sans biais les charges moyennes mesurées dans le sable, dans la tourbe et dans les étangs. Ce modèle a servi de base à des analyses permettant de mieux comprendre l'effet des pompages sur la nappe.

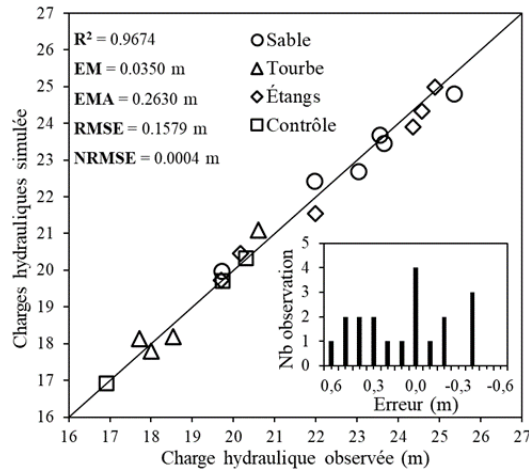


Figure 17. Scattergramme des charges simulées en régime permanent en fonction des charges mesurées (Chéné, 2024)

Sans surprise, une augmentation de la recharge (p.ex. pendant une année humide) fait augmenter les charges et vice-versa, et les résultats sont très similaires sur les deux transects (Figure 18). Ceci indique qu'avec une recharge plus élevée, les apports d'eau souterraine aux étangs et les flux alimentant la tourbière sont plus importants, entraînant un potentiel plus élevé de pompage dans les étangs. À l'inverse, une recharge plus faible réduit les niveaux et peut entraîner une réduction des débits qui peuvent être pompés. Les résultats montrent qu'une variation de la recharge a un effet beaucoup plus important sur les charges dans la tourbe que sur celles dans le sable, ce qui concorde avec les observations *in situ* dans les piézomètres. Si les conductivités hydrauliques sont plus faibles (p.ex. si elles ont été surestimées par les analyses réalisées dans le projet), les charges sont plus élevées et vice-versa.

Lorsque la conductivité hydraulique du sable varie, elle accentue ou diminue l'effet de la recharge, i.e. si la recharge augmente et que la conductivité diminue (A5), les niveaux augmentent plus que ceux observés au scénario A4 (conductivité hydraulique initiale) et ce scénario montre des niveaux de nappes qui sont au-dessus de la surface dans le sable, ce qui est improbable. L'effet inverse est simulé si à la fois la recharge et la conductivité hydraulique augmentent (A8), et il en résulte une baisse des niveaux. À l'inverse, lorsque la recharge et la conductivité hydraulique diminuent (A3), les niveaux simulés diminuent, mais moins que dans le scénario A1. Lorsque la recharge diminue et que la conductivité hydraulique augmente, l'effet de baisse de niveau observé au scénario A7 est accentué. Les scénarios qui font remonter les niveaux (A2, A4 et A5) augmentent les gradients hydrauliques entre le sable et les étangs et entre les étangs et la tourbe, ce qui entraîne des flux d'eau souterraine échangés plus grands, tandis que les scénarios qui font

baissier les niveaux (A1, A3, A6, A7 et A8) réduisent les gradients hydrauliques et réduisent les flux d'eau souterraine. Sur les deux transects, les directions d'écoulement demeurent dans tous les cas du sable vers les étangs et vers la tourbe, pour tous les scénarios analysés.

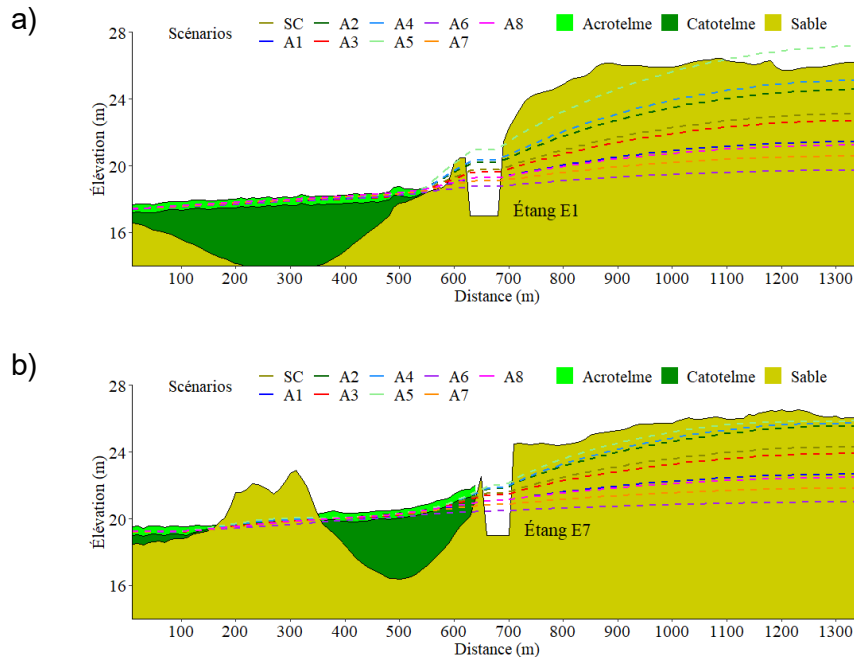


Figure 18. Effet sur les charges de changements a) de la recharge et b) de la conductivité hydraulique (SC et A1 à A8) (Chéné, 2024)

L'imposition d'un débit de référence (2P) et l'augmentation du débit pompé (2P2x et 2P3x) entraînent une diminution des niveaux dans le sable en amont et en aval des étangs (Figure 19a). En comparaison avec le scénario calibré (SC), les flux entrants du sable aux étangs augmentent lorsque le pompage est plus important, car le gradient hydraulique entre le sable et l'étang augmente, et les flux sortants de l'étang vers le sable diminuent de manière importante, car le gradient hydraulique entre l'étang et le sable en aval diminue. Pour les étangs E1 et E7 qui sont situés très près de la tourbière, ces flux sortants représentent aussi les flux entrants dans la tourbe (Tableau 3). Le débit extrait de l'étang provient donc en partie du sable sur le coteau Saint-Henri et d'une diminution de l'apport d'eau souterraine à la tourbière. Dans le scénario 2P3x, le ΔV_{es} atteint 100%, ce qui signifie que l'étang a atteint la même charge hydraulique que la tourbière et qu'il n'y a donc plus d'eau qui s'écoule de cet étang vers la tourbe. Lorsque le pompage est important (p.ex. 2P3x sur le transect 7), le niveau dans l'étang peut être inférieur à celui dans la tourbière et le flux se fait de la tourbière vers l'étang (Figure 19b), mais ceci n'est visible que lorsque le débit est important. Ces résultats montrent que le pompage dans un étang à proximité

de la tourbière réduit l'apport d'eau souterraine à la tourbière. Ils découlent du fait qu'un pompage d'eau souterraine entraîne toujours une baisse du niveau piézométrique, induit un nouvel apport d'eau de la nappe (ici de l'amont des bassins vers l'étang) et capte l'écoulement naturel (ici de l'étang vers la nappe) (Zhou, 2009). Les résultats sont donc probablement généralisables aux autres pompages dans les étangs situés à proximité de la tourbière. La baisse du volume d'eau s'écoulant des étangs vers la tourbe peut être considérée comme un effet secondaire du pompage, mais son impact sur la tourbière n'est pas connu.

Les transects montrent que les pompages sur la crête ont un impact moindre sur les flux entrants et sortants de la tourbière que ceux en bordure de la tourbière (2P contre 5P) (Figure 20a et b). L'étang E1 est moins affecté par les cinq pompages sur la crête que le E7, car les pompages sont plus loin de E1 que de E7. Il convient toutefois de rappeler que les étangs situés sur la crête sont positionnés très près de la limite du modèle et que, pour cette raison, les rabattements liés aux pompages qui y sont imposés pourraient ne pas être représentatifs de la réalité. Pour un même débit pompé (2P comparativement à 10P et 20P), une augmentation du nombre de pompages à proximité de l'étang a un effet accru sur les charges dans le système. Le fait d'alterner les pompages dans le temps et dans l'espace permettrait probablement de réduire leur effet sur les baisses de niveaux dans la tourbe. Les résultats obtenus avec le modèle en régime permanent ne permettent toutefois pas de faire des recommandations à ce sujet.

Il est intéressant de noter (Figure 19 et Figure 20) que l'effet du pompage dans l'étang s'atténue dans les premières dizaines de mètres dans la tourbe, du fait de la capacité d'emmagasinement importante des dépôts organiques. En pratique, les pompages ne sont pas nécessairement en opération simultanément et de manière continue dans tous les étangs, ce qui pourrait en réduire l'impact sur les charges dans la tourbe. Les effets de la mise en opération intermittente des pompages sur les charges ne peuvent être étudiés par le modèle en régime permanent qui ne prend pas en compte l'emmagasinement de l'eau souterraine dans l'aquifère. Également, les effets des baisses de flux entrants à la tourbière sur la végétation proche de l'interface tourbe-sable ne peuvent pas être quantifiés à partir des résultats du modèle. D'autres études ont toutefois montré que le complexe tourbeux de Lanoraie a vu une augmentation très marquée de la végétation ligneuse depuis les années 1950 (Pellerin et al., 2016). Il a été suggéré que la baisse des niveaux de nappe dans le sable au fil des décennies pourrait être une cause possible de ces changements. Des études complémentaires devront être menées pour identifier les seuils de rabattement à ne pas dépasser dans le sable, dans les étangs et dans la nappe, pour minimiser les impacts sur la végétation dans la tourbière.

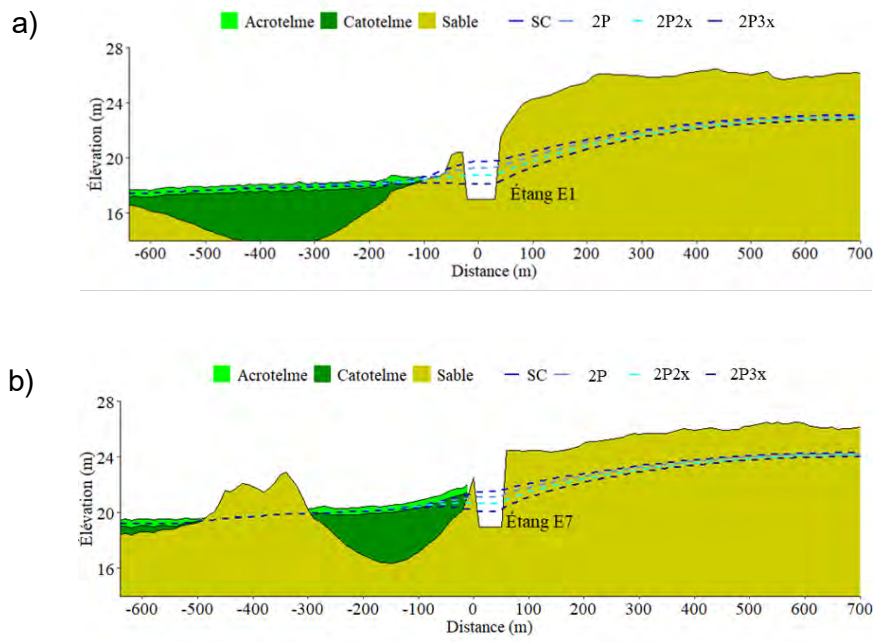


Figure 19. Effet des pompages sur les charges simulées pour les scénarios faisant varier le débit pompé dans les étangs (SC, 2P, 2P2x, 2P3x) a) sur le transect 5 et b) sur le transect 7 (Chéné, 2024)

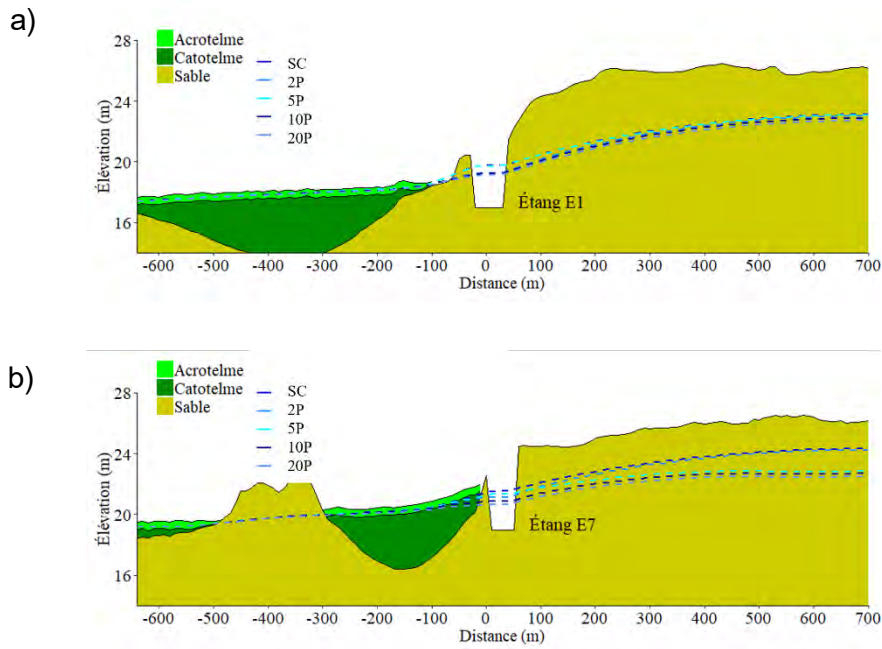


Figure 20. Effet des pompages sur les charges simulées pour les scénarios faisant varier le nombre et la position des pompages (SC, 2P, 5P, 10P, 20P) a) sur le transect 5 et b) sur le transect 7 (Chéné, 2024)

Tableau 3. Changements dans les flux du sable vers l'étang (ΔV_{se}) et du flux de l'étang vers le sable (ΔV_{es}) des étangs, entre les scénarios de pompage (2P, 2P2x, 2P3x, 5P, 10P et 20P) et le scénario calibré (SC) (Chéné, 2024)

	E1		E7	
	ΔV_{se}	ΔV_{es}	ΔV_{se}	ΔV_{es}
SC	0%	0%	0%	0%
2P	32%	-45%	12%	-67%
2P2x	74%	-85%	62%	-98%
2P3x	141%	-100%	143%	-100%
5P	-1%	4%	-42%	-38%
10P	28%	-49%	-7%	-86%
20P	20%	-57%	-12%	-90%

4 SYNTHÈSE ET CONCLUSION

L'objectif du volet « Eau souterraine » du projet SCELANEAU était de mieux comprendre les échanges entre l'eau souterraine et la tourbière dans la région du complexe tourbeux de Lanoraie, en présence de pompages dans les étangs d'irrigation situés à proximité de l'interface sable-tourbe. Les différentes approches ont permis de répondre aux questions de recherche posées en introduction.

- Contexte hydrogéologique

L'argile est présente en épaisseurs importantes dans toute la région étudiée. L'aquifère sableux atteint 25 m par endroits. Dans le secteur du coteau Saint-Henri, le sable est classé comme un sable fin à moyen et la tourbe repose généralement sur ce sable.

- Directions d'écoulement

Les conditions météorologiques ont entraîné des niveaux de nappe plus bas en 2021 qu'en 2022, mais les directions de l'écoulement dans le sable et dans la nappe ont été les mêmes les deux années. De manière générale, le sable du coteau Saint-Henri alimente les étangs qui alimentent à leur tour la tourbière.

- Recharge de la nappe

La recharge de la nappe estimée à tous les piézomètres montre un intervalle de valeurs relativement grand qui reflète les incertitudes associées au calcul. Les conditions humides et plus fraîches de 2023 ont entraîné une recharge supérieure à celle de 2022. L'irrigation simulée dans un autre volet du projet SCELANEAU correspond à 15% (2023) de la recharge annuelle moyenne estimée, ce sont des pourcentages relativement faibles. Il ne semble pas y avoir de retour d'irrigation sur le coteau Saint-Henri.

- Niveaux d'eau

Les niveaux d'eau varient suivant les saisons et selon les années. Les niveaux sont généralement plus élevés au printemps et plus bas l'été. Ils ont été en moyenne plus bas en 2021 qu'en 2022 et plus bas en 2022 qu'en 2023, ce qui reflète les conditions météo des trois années. Les variations de niveaux d'eau sont relativement similaires dans les étangs et dans le sable et sont nettement plus faibles dans la tourbe, à l'exception de l'été 2021 où elles ont été très élevées. Les niveaux dans les étangs reflètent les débits pompés avec des baisses rapides et des remontées dans les jours et les semaines qui suivent les pompages. Les piézomètres dans le sable situés à proximité des étangs reflètent ces variations tandis que ceux dans la tourbe montrent des variations beaucoup plus atténuées.

- Facteurs qui influencent l'effet des pompages

La modélisation a confirmé que pendant une année humide, la recharge peut être plus importante et les charges sont plus élevées, ce qui pourrait permettre de pomper des débits plus grands dans les étangs (et vice-versa). La modélisation a également confirmé qu'une augmentation des débits pompés entraîne des charges plus basses dans les étangs, dans le sable et dans la tourbe. La combinaison des effets sur les charges entraîne une augmentation des apports d'eau souterraine du sable vers les étangs et une baisse de l'apport d'eau souterraine des étangs à la tourbière. Au-delà d'un certain débit pompé, les rabattements dans les étangs peuvent induire une alimentation de l'étang par la tourbière. Le débit pompé provient donc à la fois du sable et d'un retranchement à l'alimentation de la tourbière par le sable. Le pompage des étangs situés au centre du coteau sableux semble avoir moins d'effet sur les volumes d'eau souterraine du sable vers la tourbière, mais ceci devra être confirmé avec un modèle régional, car ces étangs sont situés près de la limite du modèle. Des pompages intermittents n'ont pas pu être simulés, mais pourraient avoir des effets différents sur les niveaux et les volumes d'eau, en raison de l'emmagasinement dans l'aquifère sableux.

Ce projet a permis de mieux décrire l'aquifère sableux dans la région du complexe tourbeux de Lanoraie, de comprendre à l'aide d'un modèle simple la dynamique des niveaux de nappe et d'explorer les effets des pompages sur les niveaux d'eau et les volumes d'eau. D'autres travaux sont toutefois nécessaires pour développer davantage les connaissances et soutenir la gestion de l'eau dans la région. Par exemple, la mise en œuvre d'un modèle d'écoulement souterrain en régime transitoire sur toute la région du complexe tourbeux de Lanoraie permettrait 1) de comprendre l'effet de l'emmagasinement dans l'aquifère lors de pompages alternés entre les étangs et de pompages intermittents de courtes durées et 2) de minimiser les effets des limites du modèle sur les flux simulés. Également, un modèle couplant les flux de surface (cours d'eau) et les flux souterrains permettrait d'analyser simultanément les effets des pompages dans les cours d'eau et dans les étangs. Une analyse écohydrologique de l'effet des baisses d'apport d'eau des étangs vers la tourbière et des baisses de niveaux d'eau qui s'ensuivent dans la tourbière sur la croissance de la végétation ligneuse permettrait de comprendre les liens de causalité. Ceci pourrait mener à l'établissement de seuils de pompages et rabattements à ne pas dépasser pour protéger la tourbière.

5 RÉFÉRENCES

- Bourgault, M.-A., Larocque, M., Roy, M. (2014) Simulation of aquifer-peatland-river interactions under climate change. *Hydrology Research*, 45(3), 425-440.
- Chapuis, R.P. (1989) Shape Factors for Permeability Tests in Boreholes and Piezometers. *Ground Water*, 27(5), 647-654. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1989.tb00478.x>.
- Charron, I., Beauchemin, A., Blais-Gagnon, A., Delmotte, S., Ducruc, S., Dugré, D., Landry, F., Jégo, G., Michaud, A., Morissette, R., St-Arnaud, R.-M. (2019) *Recherche participative d'alternatives durables pour la gestion de l'eau en milieu agricole dans un contexte de changement climatique (RADEAU 1)*. Rapport rédigé pour le MAPAQ. Québec, Canada. 271 p.
- Chéné, J. 2024. Connexions aquifère-tourbière dans la région de Lanoraie. *Mémoire de maîtrise en sciences de la Terre (en évaluation)*. Département des sciences de la Terre et de l'atmosphère, UQAM, Montréal, Canada. 108 p.
- Devlin, J.F. 2015. HydrogeoSieveXL: An Excel-based tool to estimate hydraulic conductivity from grain size analysis. *Hydrogeology Journal*, doi 10.1007/s10040-015-1255-0.
- Domenico, P.A., Schwartz, W. (1997) *Physical and chemical hydrogeology*, 2nd ed. Wiley, 528 p.
- Données Québec. (2023) Cartes 31H14NO, 31H14NE, 31H14SO, 31I03SE, 31I03SO. *LiDAR - Modèles numériques (terrain, canopée, pente)*. Gouvernement du Québec. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/produits-derives-de-base-du-lidar>.
- ECCC (Environnement et Changement climatique Canada). (2023) *Données climatiques historiques*. https://climate.meteo.gc.ca/index_f.html.
- Gosselin, J.-S., Rivard, C. et Martel, R. (2016) *User manual for WHAT (Well Hydrograph Analysis Toolbox)*. Université du Québec, INRS-ETE. Québec, Canada, pp. 199-216.
- Hardy, F. (2007) *Contexte stratigraphique quaternaire de la MRC d'Autray (Lanaudière) et modèle stratigraphique 3D*. Rapport final présenté à TechnoRem inc par Poly-Géo inc. Montréal, Canada, 17 p.
- Harbaugh, A.W. (2005) *MODFLOW-2005, the USGS Modular Ground-Water Model: The Ground-Water Flow Process*. US Department of the Interior, USGS. Denver, Colorado, 253 p.
- Healy, R., Cook, P. (2002) Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, 91-109, <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0178-0>.
- Hvorslev, M.J. (1951) *Time lag and soil permeability in ground-water observations (Bulletin no. 36)*. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station U.S. Army, Vicksburg, Mississippi, pp. 1-50.
- Johnson, A.I. (1967). *Specific yield: compilation of specific yields for various materials*. Washington, États-Unis: US Government Printing Office, 74 p.
- Kilmartin, M., Madramootoo, C. (2024). *Simulation des besoins en irrigation à Lanoraie, QC. Optimiser les besoins en eau de l'agriculture dans un environnement écologiquement sensible*. Rapport final présenté au MAPAQ pour le projet SCELANEAU. Montréal, Canada, 61 p.
- Lambert, C., Larocque, M., Gagné, S., Garneau, M. (2022) Aquifer-peatland hydrological connectivity and controlling factors in boreal peatlands. *Frontiers in Earth Science*, <https://doi.org/10.3389/feart.2022.835817>.

- Larocque, M., Roux, M., Chéné, J. (2022) *Géométrie de l'aquifère du complexe tourbeux de Lanoraie – Rapport d'avancement*. Rapport déposé au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. Université du Québec à Montréal, Montréal, Canada, 28 p.
- LaSalle, P. (1973) *Géologie des sédiments meubles de la région de Joliette-Sorel : Rapport préliminaire*. Ministère des richesses naturelles, Gouvernement du Québec. Québec, Canada, 10 p.
- Levison J., Larocque, M., Fournier, V., Gagné, S., Pellerin, S., Ouellet, M.-A. (2014) Dynamics of a headwater system and peatland under current conditions and with climate change. *Hydrological Processes*, 28:4808-4822, <https://doi.org/10.1002/hyp.9978>.
- Meizhao, L., Zhongfeng, X., Yang, Z., Hui, L., Meixia, L. (2021) A comprehensive review of specific yield in land surface and groundwater studies. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13(2), e2020MS002270, <https://doi.org/10.1029/2020MS002270>.
- MELCCFP (ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs). (2023) *Système d'information hydrogéologique (SIH)*. Gouvernement du Québec. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/sih/index.htm>.
- MRNF (ministère des Ressources naturelles et des Forêts). (2021) *Carte géologique interactive*. Gouvernement du Québec. https://sigeom.mines.gouv.qc.ca/signet/classes/I1108_afchCarteIntr.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model? Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modeling. *Journal of Hydrology*, 303(1-4), 290-306, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>.
- Pellerin, S., Lavoie, M., Bouchery, A., Larocque, M. Garneau, M. (2016) Recent vegetation dynamics and hydrological changes in bogs located in an agricultural landscape. *Wetlands*, 36(159), doi:10.1007/s13157-015-0726-3.
- Rivera, A. (2014) Groundwater Basics. In *Canada's Groundwater Resources*, Fitzhenny and Whiteside. Markham, Ontario, Canada, pp. 24-61.
- Rosa, E., Larocque, M. (2008) Investigating peat hydrological properties using field and laboratory methods: application to the Lanoraie peatland complex (southern Quebec, Canada). *Hydrological Processes*, 22(12), 1866-1875, <https://doi.org/10.1002/hyp.6771>.
- Rosa, E., Larocque, M., Pellerin, S., Gagné, S., Fournier, V. (2009) Determining the number of manual measurements required to improve peat thickness estimations by ground penetrating radar. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 377-383.
- SNC Lavalin. (2005) *Évaluation de la qualité des eaux souterraines et de surface au lieu d'enfouissement sanitaire de Dépôt Rive-Nord inc., à Saint-Thomas*. Rapport final no. 016932. Québec, Canada, 311 p.
- Technorem. (2008) *Acquisition de connaissances sur l'hydrologie, l'approvisionnement en eau et les écosystèmes de la rivière Saint-Jean – Lanaudière*. Laval, Canada, 270 p..
- Tecsult inc. (2005) *Aménagement d'une cellule d'enfouissement technique à Saint-Thomas : Évaluation du potentiel aquifère, note technique 05-12951-0500*. Montréal, Canada, 17 p.
- White, J.T., Hunt, R.J., Fienen, M.N., Doherty, J.E. (2020) Approaches to highly parameterized inversion: PEST++ Version 5, a software suite for parameter estimation, uncertainty

analysis, management optimization and sensitivity analysis. USGS Techniques and Methods 7C26. <https://doi.org/10.3133/tm7C26>. Reston, Virginie, 64 p.

Zhou, Y. (2009). A critical review of groundwater budget myth, safe yield and sustainability. *Journal of Hydrology*, 370, 207-213.

6 ANNEXE 1 – CHRONIQUES DE NIVEAUX DE JUIN 2021 A OCTOBRE 2023

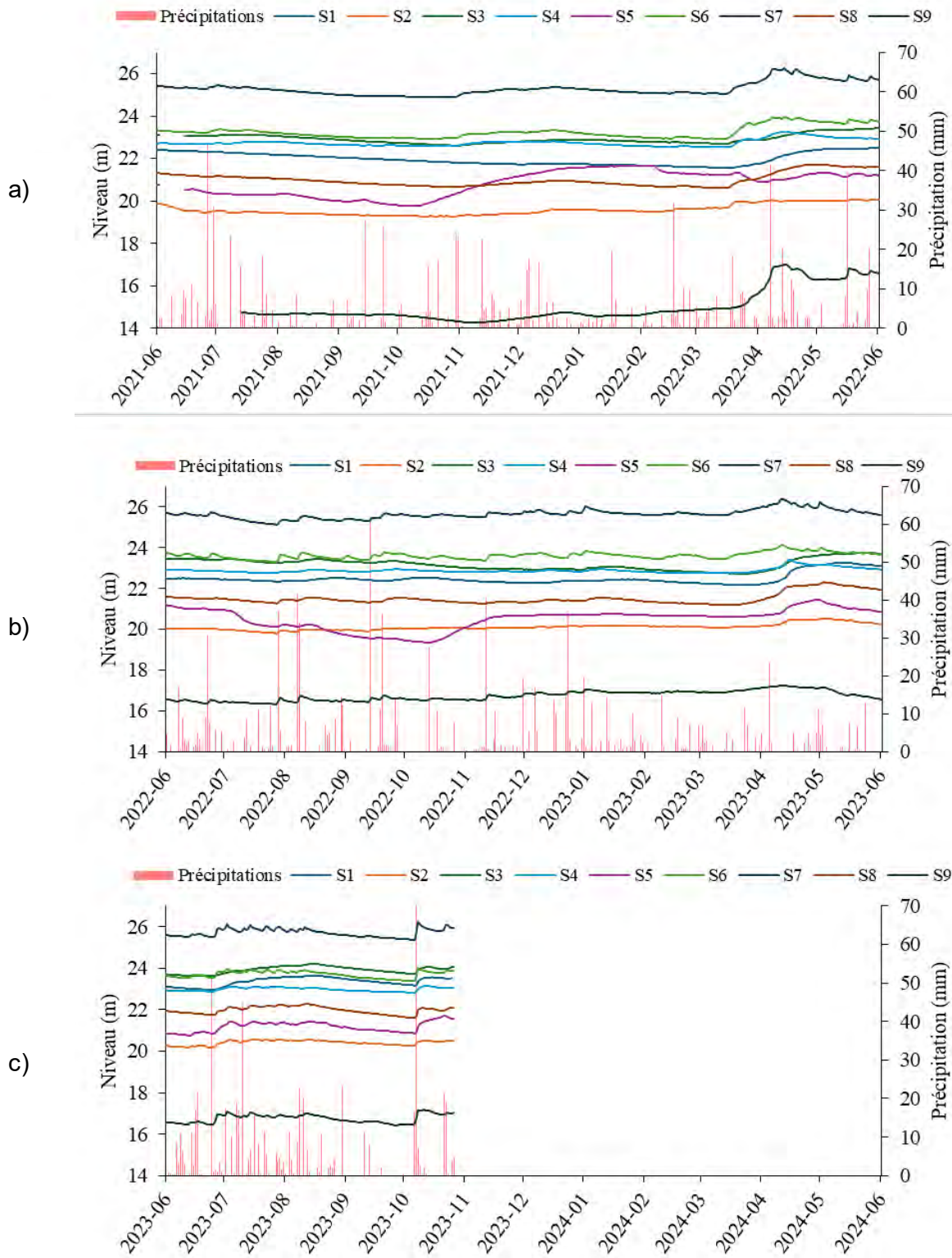


Figure 21 : Niveaux dans les piézomètres situés dans le sable, de juin 2021 à octobre 2023

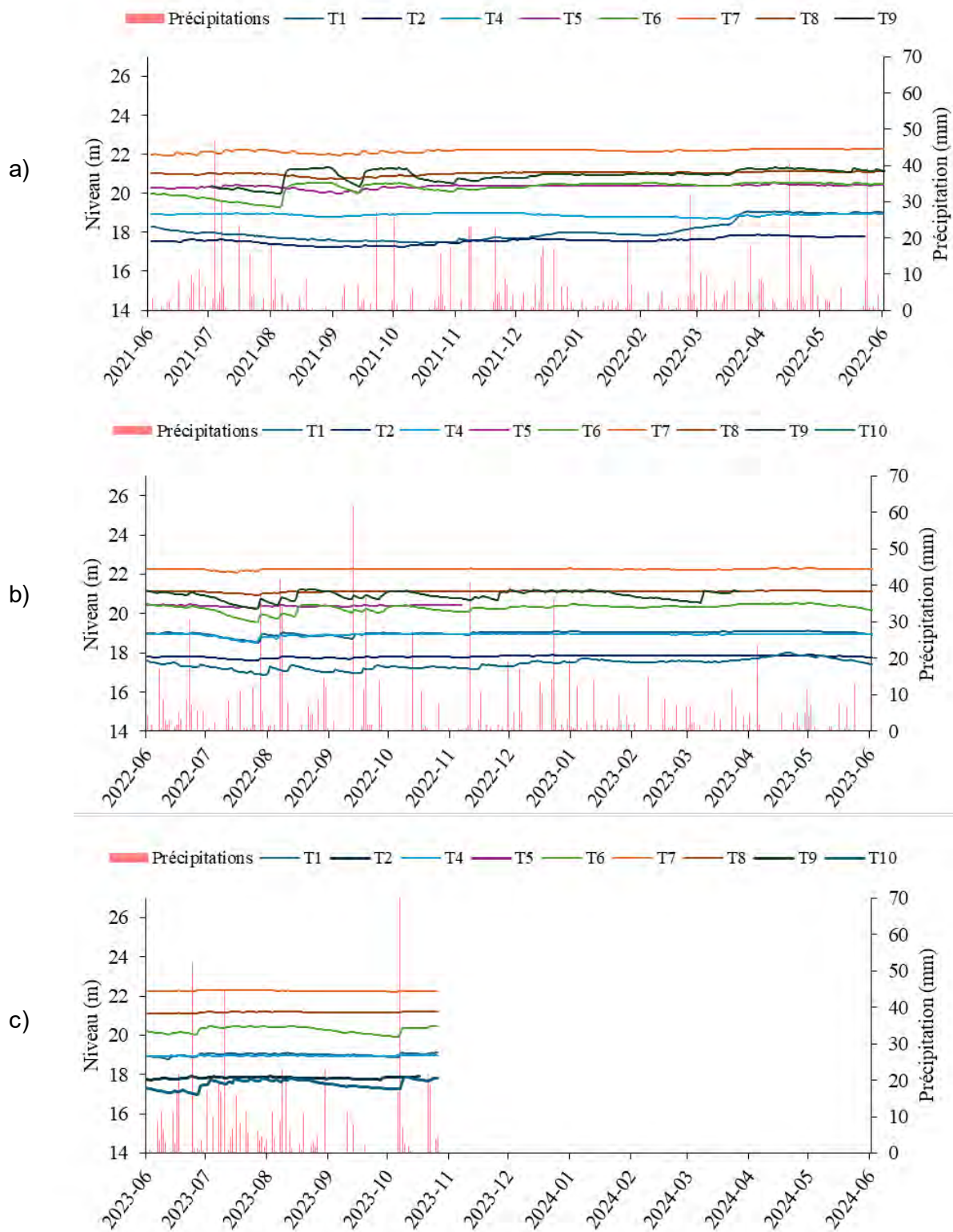


Figure 22 : Niveaux dans les piézomètres situés dans la tourbe, de juin 2021 à octobre 2023

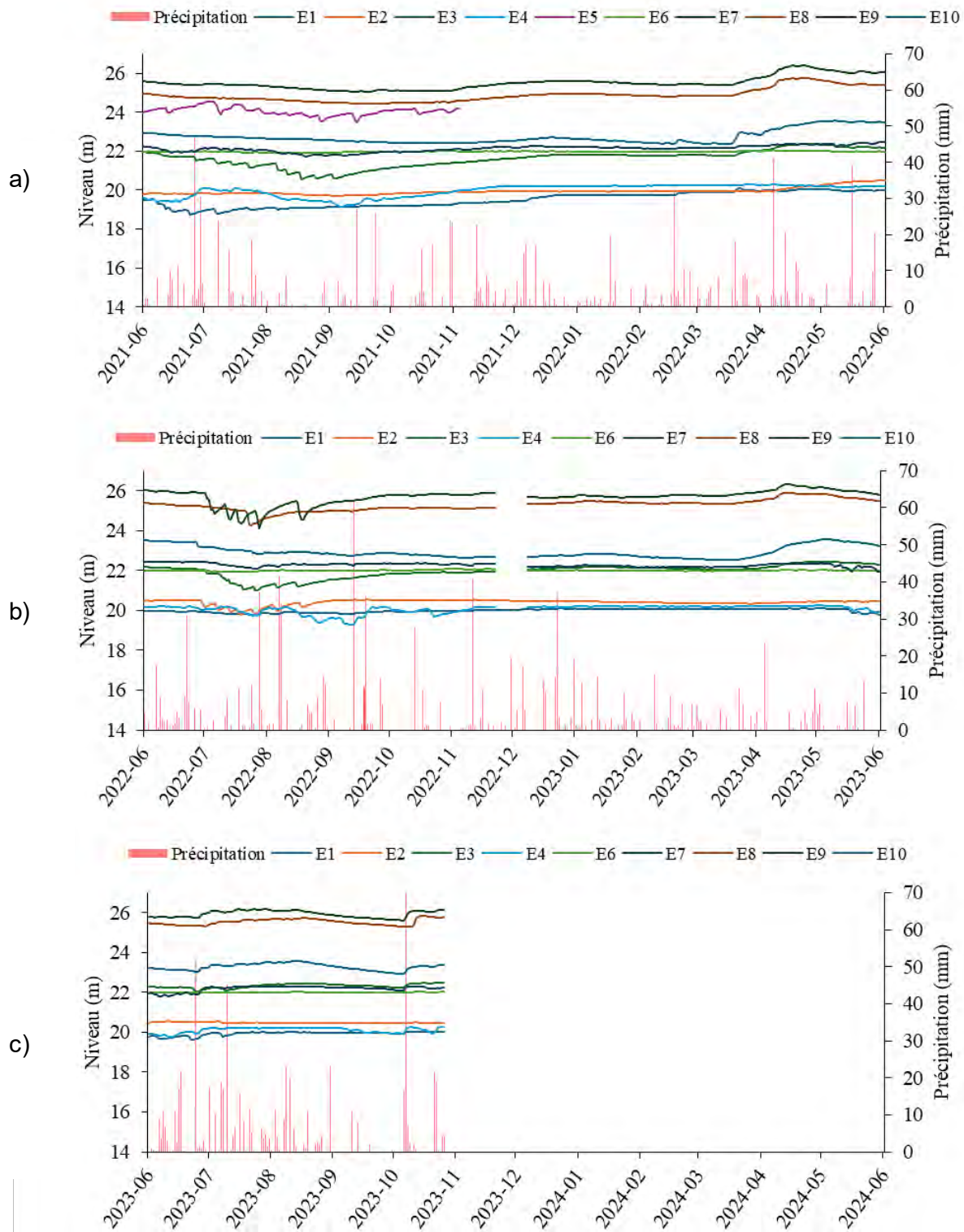


Figure 23 : Niveaux dans les piézomètres situés dans les étangs, de juin 2021 à octobre 2023

Réponse aux commentaires du MAPAQ – Rapport final SCÉLANEAU – Eau souterraine

Nous avons considéré tous les commentaires et y avons répondu autant que possible. Des explications sont apportées dans les paragraphes qui suivent.

Par ailleurs, nous avons également revu le texte du dernier paragraphe de la section 3.3 (p. 18) pour comparer la recharge estimée pendant l'année hydrologique 2023 à celle calculée par Kilmartin et Madramootoo (2024) sur le coteau Saint-Henri.

Commentaire 1 - Rapport utile pour établir des relations entre la tourbière et la nappe des coteaux sableux. Cependant, il y a peu de données chiffrées ou d'étude de scénarios adaptés au contexte agricole local, ni de recommandation de gestion des eaux souterraines.

Les résultats de cette étude ne permettent pas de pousser plus loin la quantification des effets des pompages dans les étangs sur l'eau souterraine et la tourbière. D'autres études seront nécessaires pour être en mesure de simuler les variations de niveaux de nappe en régime transitoire et proposer des avenues pour la gestion intégrée de l'eau dans la région.

Commentaire 2 - P13 : les valeurs faibles de conductivité hydrauliques ont été mesurées à quelle profondeur ? Est-ce qu'elles concernent le sable fin situé sous la tourbe ou le sable au sommet du coteau ?

Les échantillons de sable ont été prélevés à l'endroit où la crépine a été installée dans chaque piézomètre. Le sommet des crépines des forages S2 et S4 (ceux dont les conductivités hydrauliques sont les plus basses à la Figure 10) sont situés à 7,5 m (S2) et 7,25 m (S4) sous la surface du sable (ces forages n'atteignent pas l'argile). Les crépines sont donc positionnées au-dessus de l'interface sable-argile. Nous avons modifié le texte (paragraphe sous la Figure 9, p.13) pour inclure que les plus faibles conductivités hydrauliques obtenues pour ces deux sites peuvent traduire la présence d'horizons de sable plus fin ou silteux localement.

Commentaire 3 - P18 : quel est le rayon d'influence des pompages en étangs et pour quel débit de pompage ?

Le rayon d'influence n'a pas été calculé directement. Toutefois, l'influence des pompages à E1 aux sites T1, T2, S1 et S2 a été documentée à l'aide des figures 12 et 13 (3^{ième} par., p.19 à p.21). La réponse au commentaire 6 concerne les débits pompés utilisés dans le modèle.

Commentaire 4 - P19 : texte non détaillé. Il manque un graphique ou des valeurs pour documenter ces fluctuations de niveau de nappe.

Les figures 21, 22 et 23 présentées en annexe présentent toutes les chroniques pour 2021, 2022 et 2023. Pour rendre les figures plus facilement lisibles, elles ont été présentées sur des pages différentes.

Commentaire 5 - P19 : les rabattements dans les étangs sont-ils suivis de remontées ou les rabattements successifs conduisent à leur mise à sec en fin de saison ?

Les rabattements dans les étangs sont généralement suivis de remontées, mais à certains moments, les remontées ne sont pas terminées lorsque de nouveaux pompages débutent. Entre 2021 et 2023, les pompages n'ont à aucun moment vidé complètement les étangs étudiés. Le texte a été modifié pour expliquer ceci (2^{ième} par., p. 19).

Commentaire 6 - P23 : à quoi correspondent les débits 2P, 2P2x et 2P3X ? Correspondent-ils aux débits de pompage des producteurs agricoles pour l'irrigation ?

Comme mentionné dans le rapport (2^{ème} par., p. 10), le modèle représente l'écoulement en régime permanent. Ce modèle ne permet pas de reproduire l'évolution temporelle des baisses et des remontées qui se produisent en réaction au début et à la fin des pompages. Néanmoins, le modèle calibré (sans pompage) a été utilisé pour simuler des scénarios avec pompage qui permettent d'illustrer l'effet de ceux-ci sur les niveaux dans les étangs, dans le sable et dans la tourbe. Cet exercice ne tient pas compte de l'effet de l'emmagasinement sur les niveaux de nappe et est basé sur une représentation très simplifiée de la dynamique réelle de l'écoulement souterrain. Le débit utilisé pour représenter l'effet des pompages à court terme sur les étangs (débit de référence) a été ajusté de manière à reproduire les baisses de niveau observées dans les étangs E1 et E7 en 2021. C'est donc l'effet des pompages sur les niveaux dans les étangs plutôt que le débit pompé qui fait l'objet de l'analyse des résultats (les débits réellement pompés ne sont pas connus et ne peuvent pas être estimés à partir des variations de niveaux, car la bathymétrie des étangs n'a pas été mesurée).

Le Tableau 1 (p.11) décrit ce que représentent 2P (débit *de référence* qui reproduit les baisses de niveau dans les étangs), 2P2x (débit pompé deux fois plus grand que le débit *de référence*), 2P3x (débit pompé trois fois plus grand que le débit *de référence*). Ces scénarios représentent l'effet d'une augmentation des débits pompés sur les niveaux dans le sable, dans les étangs et dans la nappe.

Commentaire 7 - P24 : en fonction du débit de pompage en étang, quel est le rayon d'influence et quel est l'abaissement de la nappe dans la tourbière ?

Voir réponse commentaire 3.

Commentaire 8 - P24 : établir un calendrier de pompage pour décaler les moments de prélèvement serait une option envisageable ?

Ceci est un très bon point. Répartir les pompages dans le temps et dans l'espace pourrait permettre de réduire l'effet des pompages sur les niveaux d'eau dans la tourbière. Ceci a été ajouté dans le texte (p.26). Cette idée était déjà mentionnée dans la conclusion du rapport (dernier par., p.30).

Commentaire 9 - P28 : Observations utiles, mais peu de bilans chiffrés des scénarios ou de recommandations de gestion durable de la nappe phréatique

Voir réponse commentaire 1.

ANNEXE 3 - Rapport final de McGill

**RAPPORT FINAL: ÉVALUATION DE SCÉNARIOS DE GESTION INTÉGRÉE ET
SOUTENABLE DE L'EAU DANS LE COMPLEXE TOURBEUX DE LANORAIE
(SCELANEAU)**

Meaghan Kilmartin M.Sc.

Chandra Madramootoo Ph.D., ing.

Université McGill

Département génie des bioressources

Simulation des besoins en irrigation à Lanoraie, Qc

Optimiser les besoins en eau de l'agriculture dans un environnement écologiquement sensible

Mars 2024

Table of Contents

1. Introduction.....	1
1.1 Projet Scelaneau.....	1
1.2 Objectifs de recherche	1
1.3 Portée	1
2. Zone d'étude et sites de terrain.....	2
2.1 Sélection des sites de terrain.....	2
2.2 Gestion des cultures, des champs et de l'irrigation sur les sites de terrain	4
3. Mesures sur le terrain.....	8
3.1 Caractéristiques physiques du sol.....	8
3.2 Dynamique de l'humidité du sol	9
3.2.1. Humidité du sol sur le terrain L1	9
3.2.2. Humidité du sol sur le terrain L2	11
3.2.3. Humidité du sol sur le terrain L3	12
3.2.4. Humidité du sol sur le terrain L4	13
4. Données météorologiques	14
4.1.1. Données climatiques historiques	14
4.1.2. Données climatiques futures.....	17
5. Modélisation et simulation	20
5.1 Calibration du modèle AquaCrop.....	20
5.1.1. Pomme de terre cultivée dans le Lanoraie sable fin.....	20
5.1.2. Courges cultivées dans le Saint-Thomas sable fin	22
5.1.3. Fraise cultivée dans le Lanoraie sable fin.....	23
5.1.4. Canneberge cultivée sur le sable Saint-Jude.....	23
5.1.5. Résumé des performances du modèle.....	24
5.2 Simulation des besoins en irrigation historiques	25
5.2.1. Simulation des besoins historiques en irrigation des pommes de terre.....	27
5.2.2. Simulation des besoins historiques en irrigation des courges.....	31
5.2.3. Simulation des besoins historiques en irrigation des fraises.....	32
5.2.4. Simulation des besoins historiques d'irrigation des canneberges.....	34
5.3 Impact du changement climatique sur les besoins en irrigation	36
6. Conception du système d'approvisionnement en eau d'irrigation	43
6.1 Cartographie des besoins régionaux en eau d'irrigation	43
6.2 Demande en eau des secteurs d'irrigation.....	44
6.3 Diamètre de pipeline dérivé de Manning.....	46

6.4	Diamètre du pipeline calculé par Hazen-Williams	48
7.	Conclusions and recommandations.....	50
7.1	Conclusion	50
7.2	Recommandations pour les recherches futures.....	51
8.	Références.....	53
9.	APPENDIX.....	58

1. Introduction

1.1 Projet Scelaneau

La recherche présentée dans ce rapport a été financée dans le cadre du programme d'accélération Mitacs et fait partie du projet " Évaluation de scénarios de gestion intégrée et soutenable de l'eau dans le complexe tourbeux de Lanoraie " (SCELANEAU), financé par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) dans le cadre du Programme d'appui à la lutte contre les changements climatiques en agriculture (PALCCA). D'une durée de trois ans (2021 à 2024), le projet SCELANEAU est coordonné par la Fédération de l'Union des Producteurs Agricoles de Lanaudière (Dominic Brochu, agr. et Charles Bergeron, agr.) et implique la participation de Sylvestre Delmotte (agr. Ph.D., consultant), Marie Laroque (Prof. à l'UQAM, spécialiste des eaux souterraines), Simon Ricard (ing., Ph.D., chercheur à l'IRDA, spécialiste des eaux de surface), et Chandra Madramootoo (ing., Prof. à l'Université McGill, spécialiste de l'irrigation et du drainage).

Le projet SCELANEAU vise à évaluer des scénarios de gestion intégrée et durable des ressources en eau dans le complexe de tourbières de Lanoraie. L'objectif du projet est de développer des solutions de gestion de l'approvisionnement en eau d'irrigation pour répondre à la demande agricole dans la région, sans dégrader les fonctions hydrologiques du complexe de la tourbière de Lanoraie.

1.2 Objectifs de recherche

L'objectif principal de cette étude était d'estimer les besoins actuels et futurs en eau d'irrigation pour le complexe agricole de Lanoraie et de proposer un scénario d'approvisionnement en eau.

Les objectifs spécifiques étaient de :

- a) Estimer les besoins nets en irrigation pour les années historiques sèches, moyennes et humides de la zone d'étude, pour les principales cultures irriguées, les types de sol et les méthodes d'irrigation utilisées.
- b) Prévoir l'impact du changement climatique sur les besoins futurs en irrigation des principales cultures irriguées.
- c) Cartographier les besoins bruts en irrigation pour proposer des diamètres de canalisation possibles pour un système d'approvisionnement en eau d'irrigation.

1.3 Portée

Cette étude se concentre sur les champs irrigués de quatre groupes de cultures principaux: les pommes de terre, les légumes et les courges, les canneberges, et les autres baies et petits fruits. Les données recueillies sur le terrain se limitent à quatre fermes de la zone d'étude représentant les principaux groupes de cultures et types de sols de la région. Les résultats simulés de la recherche sont extrapolés à l'ensemble de la zone d'étude afin d'estimer les besoins totaux en irrigation et de soutenir la gestion des ressources en eau dans le complexe agriculture-tourbière de Lanoraie.

2. Zone d'étude et sites de terrain

La zone d'étude est située entre 45,82° et 46,09°N et 73,44° et 73,17°W, et englobe le complexe tourbeux de Lanoraie et l'agriculture environnante. Elle s'étend sur sept municipalités : Lanoraie, Lavaltrie, Saint-Geneviève-de-Berthier, Saint-Paul, Saint-Sulpice, Saint-Thomas et L'Assomption, et comprend cinq bassins versants principaux : Bras-sud-ouest, Saint-Antoine, Saint-Jean, Saint-Joseph et Point-du-jour. Il est bordé par le fleuve Saint-Laurent et cinq rivières traversent le territoire à l'étude. L'étendue de la zone d'étude couvre un total de 32 400 ha, dont 12 000 ha de terres cultivées et 7 600 ha de milieux humides. La température et les précipitations moyennes pendant la saison de croissance, de mai à septembre, sont de 17,7 °C et de 480 mm. Les principales cultures irriguées sont les pommes de terre, les autres légumes et les petits fruits. L'eau d'irrigation provient principalement de réservoirs creusés et d'étangs adjacents aux cours d'eau, ainsi que de 12 petits barrages exploités par les municipalités.

2.1 Sélection des sites de terrain

Pour estimer les besoins régionaux en irrigation de la zone d'étude, des sites représentatifs ont été sélectionnés à l'échelle du terrain dans l'environnement SIG ArcMap (version 10.8 ; ESRI, 2023). Les données géospatiales sur les sols de la région étudiée ont été fournies par l'IRDA (2022) à partir de la base de données de la carte des sols du Québec. Le type de culture et les données connexes pour les champs agricoles de la région ont été fournis par l'UPA de Lanaudière (2022), modifiés à partir de la Financière Agricole du Québec (FADQ, 2020) représentative des rotations de cultures de 2021. Les couches cartographiques des données sur les sols et les types de cultures ont été superposées et traitées afin d'identifier les cultures irriguées et les types de sols les plus importants. Par conséquent, seules les cultures nécessitant une irrigation supplémentaire ont été incluses dans l'analyse. En outre, les cultures de moindre superficie ont été regroupées dans des catégories similaires afin de condenser le champ d'application.

La principale culture irriguée est la pomme de terre, suivie par les légumes et les courges, puis les canneberges et enfin les autres baies et petits fruits (Figure 1a). Ces quatre catégories représentent 93 % des terres cultivées irriguées et constitueront la base des analyses ultérieures. Les pommes de terre représentent près des deux tiers de la superficie irriguée nette. Le type de sol cultivé est largement homogène, avec des sols à texture sableuse couvrant 76 % des terres cultivées irriguées. La superficie cultivée la plus importante se trouve sur le type de sol Lanoraie sable fin. Le Tableau 1 résume les principales cultures et les types de sol par superficie. Selon les cultures assurées à la FADQ pour l'année 2020, la superficie irriguée pourrait être d'environ 3033 ha, dont environ 1912 ha en pomme de terre. Cependant, la FUPAL estime la superficie irriguée annuellement à 4000 ha pour tenir compte des superficies non assurées à la FADQ.

Les sites de terrain ont été sélectionnés pour représenter les principaux groupes de cultures irriguées et les types de sol en coopération avec les producteurs locaux. Les cartes des principaux groupes de cultures et des sites de terrain représentatifs sont présentées dans la Figure 1 ci-dessous. Les sites sont les suivants L1) Pommes de terre cultivées sur Lanoraie sable fin; L2) Courges

cultivées sur Saint-Thomas sable fin; L3) Fraises cultivées sur Lanoraie sable fin, et L4) Canneberges cultivées sur le sable Saint-Jude (Figure 1b).

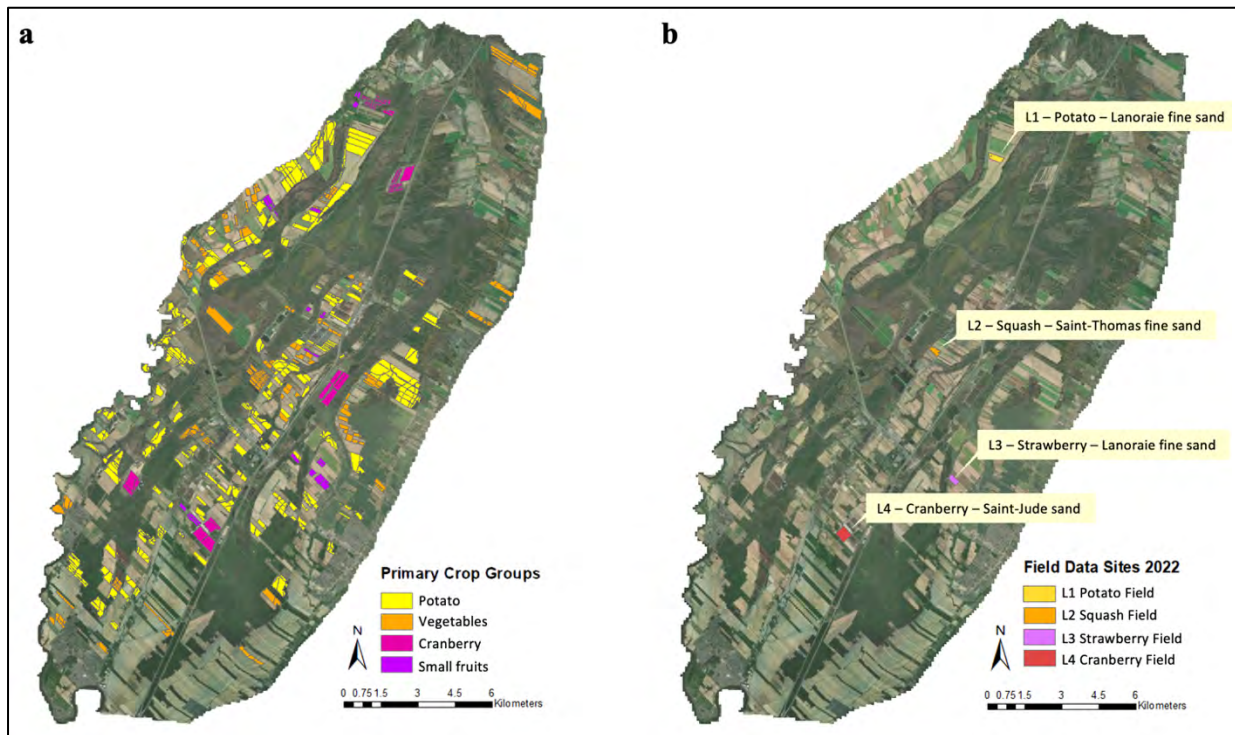


Figure 1. Zone d'étude montrant a) les principaux groupes de cultures irriguées, et b) les sites de données de terrain sélectionnés.

Tableau 1. Principales cultures irriguées et types de sol dans la zone d'étude de Lanoraie.

Catégorie de culture	Type de sol	Superficie des cultures irriguées (ha)	
Pommes de terre	Lanoraie sable fin	620	
	Saint-Thomas sable fin	318	1912
	Achigan sable	150	
Légumes et gourdes	Lanoraie sable fin	144	
	Saint-Thomas sable fin	102	778
	Chaloupe loam sableux	100	
Canneberges	Saint-Jude sable	57	
	Saint-Thomas sable fin	53	256
	Dunes	45	
Petits fruits et baies	Lanoraie sable fin	52	
	Dunes	17	98
	Saint-Jude sable	12	

2.2 Gestion des cultures, des champs et de l'irrigation sur les sites de terrain

L'agriculture de chaque site est résumée dans le Tableau 2. Les techniques culturales ont suivi les pratiques agricoles traditionnelles de la région afin de maximiser le rendement et la qualité des cultures selon l'expertise du cultivateur. En particulier, les agriculteurs ont suivi leurs propres régimes d'irrigation. Ils n'ont pas enregistré de données sur l'humidité du sol à partager, à l'exception des producteurs de canneberges qui ont partagé leurs données de tensiomètre.

Tableau 2. Culture, type de sol et système d'irrigation des sites de données de terrain sélectionnés 2022

Site	Culture	Type de sol	Système d'irrigation
L1	Pommes de terre	Lanoraie sable fin	Pivot basse pression, tube baissé et buse rotative
L2	Courges	Saint-Thomas sable fin	Asperseurs fixes
L3	Fraises	Lanoraie sable fin	Asperseurs fixes
L4	Canneberges	Saint-Jude sable	Asperseurs fixes

Sur le site L1 (Figure 2a), des tubercules de pomme de terre (cultivar *Solanum tuberosum* FL-2137) ont été semés le 11 mai 2022 et les plantules ont émergé le 5 juin. Comme le montre la Figure 2b, la floraison a commencé le 2 juillet et a duré 28 jours. La sénescence des plantes s'est produite le 15 août et la récolte a eu lieu le 22 septembre, lorsque les tubercules ont atteint leur maturité. Les pommes de terre ont été cultivées selon un schéma de sillons en colline avec un espacement de 0,9 m entre les rangs et de 0,3 m entre les plantes. Le couvert végétal a atteint un maximum de 90 %. La gestion des mauvaises herbes a été très bonne, les mauvaises herbes ne représentant que 5 % du couvert végétal au cours de la saison. L'irrigation a été appliquée via un système à pivot central avec une pression d'application de 103 kPa. Il y a eu quatre événements d'irrigation en 2022 : le 8 juillet (18 mm), le 14 juillet (18 mm), le 21 juillet (22 mm) et le 1er août (25 mm).

Le site L2 peut être observé sur la Figure 3. Des plants de courges d'hiver (*cucurbita maxima*) ont été transplantés le 13 juin 2022, avec un espacement de 1,2 m entre les rangs et de 0,45 m entre les plantes. La floraison a commencé le 13 juillet et a duré environ 35 jours. Le champ était presque entièrement couvert au maximum et la sénescence a commencé le 20 août. Les courges ont été coupées de leurs vignes le 25 août et laissées à sécher dans le champ. La gestion des mauvaises herbes a été très bonne, c'est-à-dire 5 % de couverture relative des mauvaises herbes. Une profondeur de 25 mm d'eau a été appliquée au champ par irrigation par aspersion à trois reprises au cours de la saison de croissance.



Figure 2. Champ L1 de pommes de terre cultivées sur Lanoraie sable fin, montrant a) l'emplacement géographique et les prises d'eau à proximité ; b) photo de la culture en fleur et du pivot central le 7 juillet 2022.



Figure 3. Site de la courge L2 cultivée sur Saint-Thomas sable fin, montrant a) la position géographique et les prises d'eau à proximité ; b) la capture photo des rangées de cultures et le placement des capteurs le 7 juillet 2022.

Sur le site L3 (Figure 4), des plants de fraisiers (*Fragaria ananassa*) ont été transplantés à 0,35 m les uns des autres le 27 avril, dans des rangées espacées de 1,3 m. La floraison a commencé le 10 mai et s'est poursuivie jusqu'au 5 juin. La floraison a commencé le 10 mai et a duré jusqu'au 5 juin. Plutôt que de produire des baies fraîches, le producteur cultivait des plants de fraises pour les distribuer en gros à d'autres entreprises. L'irrigation a donc été plus fréquente pour maintenir

l'humidité du sol en surface afin de favoriser l'enracinement des jeunes stolons et d'empêcher la formation de rendement. Des sondes d'humidité du sol ont été installées dans les rangs d'un cultivar de fraise du Québec (Jewel). L'irrigation par aspersion a été amorcée environ tous les deux ou trois jours, lorsqu'il n'y avait pas de précipitations supérieures à 5 mm la profondeur totale d'irrigation était d'environ 215 mm. La gestion des mauvaises herbes était parfaite (c.-à-d. 0 % de couverture de mauvaises herbes) et le couvert végétal atteignait un maximum de 75 %.



Figure 4. Site du champ L3 de fraises cultivées sur Lanoraie sable fin, montrant a) la position géographique et les prises d'eau à proximité ; b) photo des rangs de culture et du système d'arrosage le 7 juillet 2022.

Le site de terrain L4 est illustré à la Figure 5. La repousse dans la tourbière de canneberges a commencé à la mi-mai et la floraison a débuté à la mi-juin. La gestion des mauvaises herbes a été très bonne et la tourbière était presque entièrement couverte. La tension du sol a été activement surveillée par les producteurs à l'aide de tensiomètres dans le champ. De l'eau a été appliquée par aspersion pour la protection contre le gel au début du printemps et pour l'irrigation et la protection contre la chaleur, selon les besoins, en juillet, août et septembre. Au total, environ 55 mm ont été appliqués pour l'irrigation. La récolte a été inondée à l'automne. L'eau provient des réservoirs de l'exploitation et circule dans un système en circuit fermé.

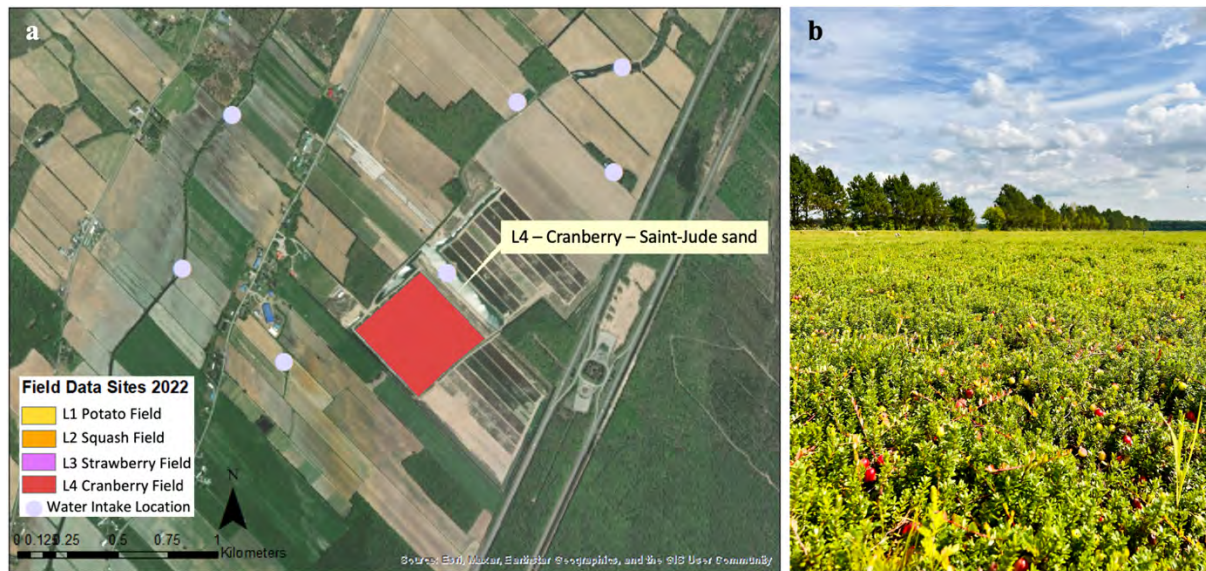


Figure 5. Site du champ L4 de canneberges cultivées sur le sable Saint-Jude, montrant a) la position géographique et les prises d'eau à proximité ; b) une photo de canneberges en train de mûrir le 25 août 2022.

La densité apparente des échantillons de terrain et la texture du sol rapportées par les données pédologiques du Québec de l'IRDA ont été utilisées pour obtenir les attributs physiques du sol avec la fonction de pédotransfert du modèle SWCC développée par Saxton et al. (2006). Le FC et le WP ont ensuite été calibrés en fonction des conditions de terrain, dans une fourchette raisonnable pour la classe de sol.

3.2 Dynamique de l'humidité du sol

La teneur en eau du sol, ou humidité du sol, est une mesure de la quantité d'eau contenue dans le sol. Il s'agit d'un facteur important de la qualité du sol, car il affecte la disponibilité de l'eau et des nutriments pour les plantes, ainsi que les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol (Hillel, 2003). La teneur en eau du sol joue un rôle majeur dans la croissance des plantes et dicte essentiellement le calendrier et l'application de l'irrigation pour une production végétale optimale (Pan, 2012 ; Sussha Lekshmi et al., 2014). L'humidité du sol est généralement exprimée sous la forme d'un pourcentage sur la base de la masse ou du volume du sol, un sol sec ayant une faible teneur en eau et un sol humide une forte teneur en eau. Étant donné que l'eau appliquée à un champ sous forme de pluie ou d'irrigation est souvent rapportée comme une profondeur d'eau, la teneur en eau volumétrique (VWC) peut être convertie en une profondeur (par exemple, en mm ou cm) de la teneur en eau du sol (SWC) en supposant une unité de surface.

La quantité d'eau dans le sol qui est accessible à l'absorption par les racines des plantes est l'eau disponible (AW). La capacité au champ (FC) est définie comme la quantité résiduelle d'eau retenue par le sol après que l'excès a été drainé à la suite d'une pluie saturante ou d'un épisode d'irrigation. Elle représente la limite supérieure de l'eau disponible pour les plantes. La limite inférieure de l'eau disponible pour les plantes est le point de flétrissement permanent (WP).

Les niveaux d'humidité du sol ont été mesurés sur quatre sites. Aux sites L1, L2 et L3, les relevés continus de la teneur en eau volumétrique effectués par des sondes capacitatives ont été calibrés à l'aide de mesures gravimétriques de référence. Le potentiel matriciel du sol mesuré par les tensiomètres du site L4 a été converti en teneur en eau volumétrique à l'aide du modèle van Genuchten-Mualem, afin d'assurer la compatibilité avec le modèle AquaCrop.

3.2.1. *Humidité du sol sur le terrain L1*

La Figure 7 présente l'humidité du sol moyenne par jour, ainsi que les précipitations quotidiennes et les profondeurs d'irrigation. Dans l'ensemble, la teneur en eau volumétrique à une profondeur de 5 cm (représentée en vert) montre une réponse plus prononcée aux événements pluvieux qu'à une profondeur de 30 cm (représentée en orange). L'impact moindre des précipitations sur l'humidité du sol à des profondeurs plus importantes peut être attribué au système racinaire superficiel de la culture de pommes de terre. La densité racinaire maximale est concentrée dans les 30 cm supérieurs du sol (Djaman et al., 2022 ; King et al. 2020 ; Opena et Porter, 1999 ; Paredes et al., 2018), qui est l'endroit où l'absorption d'eau est la plus rapide (Fulton, 1969). Ainsi, la disparité observée entre les relevés des capteurs en surface et en profondeur reflète l'absorption d'eau par la plante. Par conséquent, seuls les effets d'événements pluvieux importants sont observés

dans les relevés de l'humidité volumique à 30 cm, au cours desquels le taux d'infiltration de l'eau a dépassé le taux d'absorption de l'eau par la plante.

Au cours de la période de collecte des données (du 23 juin au 24 août 2022), l'humidité volumique à 5 cm et 30 cm était d'environ 0,087 (moyenne) \pm 0,034 (écart-type) cm^3/cm^3 et 0,067 \pm 0,015 cm^3/cm^3 , respectivement. Le minimum de l'humidité dans la zone racinaire s'est produit en juillet et en août. Cela coïncide avec le taux d'absorption le plus élevé pendant l'initiation et le grossissement des tubercules. Pendant ces phases critiques, les tubercules croissent rapidement et sont constitués de 72 à 86 % d'eau (Curwen, 1994 ; Pavlista, 1995). L'humidité du sol a dépassé la capacité du champ (FC) après des précipitations et des épisodes d'irrigation notables. Ces pics n'ont généralement persisté que pendant de courtes périodes (1 à 2 jours), ce qui reflète la faible capacité de rétention d'eau du sol sablonneux. En accord avec les observations de terrain, l'humidité du sol est restée bien en dessous du point de saturation tout au long de la saison et n'a pas atteint le point de flétrissement permanent (WP). Cependant, la faible capacité de rétention d'eau observée au début de juillet et au milieu d'août, corrélée à l'absence de précipitations ou d'irrigation, suggère que la culture a connu des périodes de déficit hydrique du sol. En général, la dynamique temporelle et en profondeur de l'humidité du sol sur le site L1 s'est alignée sur les régimes pluviométriques observés, les pratiques d'irrigation et les stades de développement de la culture de pommes de terre.

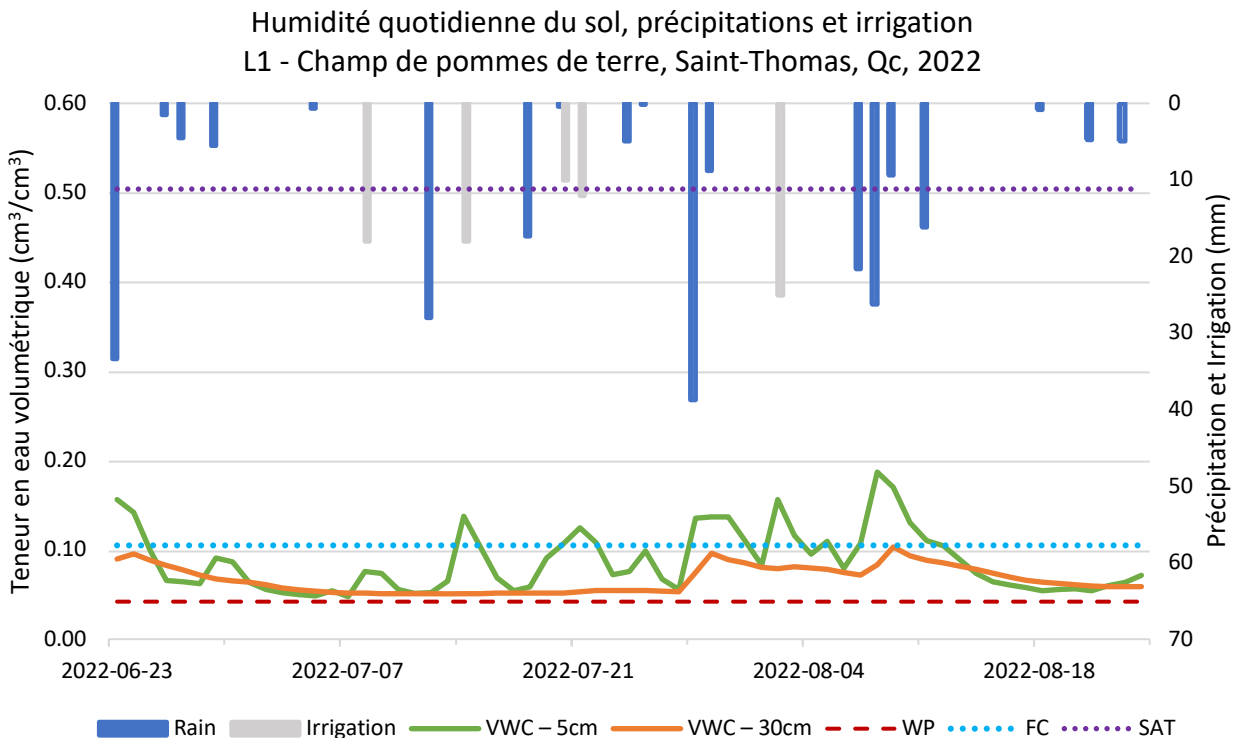


Figure 7. Humidité du sol volumétrique quotidienne à 5 cm et 30 cm de profondeur pendant la saison 2022 sur le site de terrain L1. Comprend les observations quotidiennes moyennes des sondes, les précipitations, l'irrigation et les principaux points de référence.

3.2.2. Humidité du sol sur le terrain L2

La Figure 8 présente la teneur en eau volumétrique moyenne par jour à L2, y compris les précipitations quotidiennes et les applications d'irrigation. En général, la teneur en eau volumétrique à une profondeur de 5 cm (représentée en vert) et à une profondeur de 20 cm (représentée en orange) suit un schéma similaire tout au long de la saison de croissance. La teneur en eau volumétrique dans la zone racinaire était généralement plus élevée qu'à la surface du sol, en particulier après des périodes sans précipitations. Ceci est probablement dû à la combinaison de l'évaporation à la surface du sol et des taux d'absorption plus élevés par les racines des plantes près de la surface. Les pics d'humidité du sol dus aux précipitations sont suivis d'une diminution progressive de l'indice d'humidité du sol, ce qui indique que les capacités de rétention d'eau sont plus élevées que sur le site L1.

Tout au long de la saison de croissance, du 17 juin au 24 août 2022, la teneur en eau volumétrique moyen à 5 cm était de $0,136 \pm 0,049 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, tandis qu'à 20 cm, il était de $0,164 \pm 0,026 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Les pics de l'humidité du sol ont été corrélés avec des précipitations importantes, à l'exception de la précipitation de 28 mm du 12 juillet. L'humidité relativement stable du sol ce jour-là peut indiquer des conditions météorologiques différentes entre la station météorologique et le site de terrain. Cela pourrait également suggérer une absorption accrue d'eau par les racines en développement. En outre, l'impact de l'épisode d'irrigation du 8 juillet sur l'humidité a probablement été atténué par l'absorption accrue d'eau lors de la floraison et la formation des fruits.

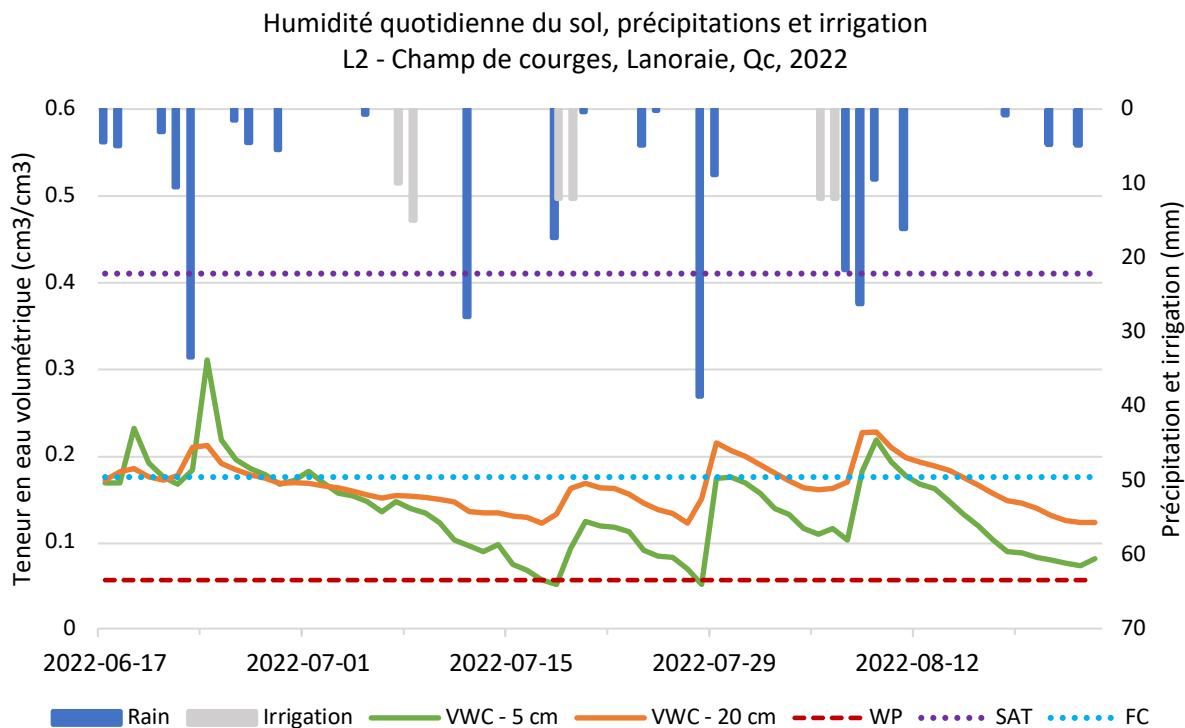


Figure 8. Humidité du sol volumique à 5 cm et 20 cm de profondeur pendant la saison 2022 sur le site L2. Comprend les observations quotidiennes moyennes des sondes, les précipitations, l'irrigation et les principaux points de référence.

3.2.3. Humidité du sol sur le terrain L3

La moyenne quotidienne de l'humidité volumétrique du sol au site L3, les précipitations totales et l'irrigation appliquée sont présentées dans la Figure 9. L'impact des précipitations et de l'irrigation sur l'humidité du sol est évident. Comme sur le site L1, on observe une réaction plus prononcée de la teneur en eau volumétrique près de la surface (5 cm) par rapport à la zone racinaire (15 cm). Entre le 16 juin et le 29 septembre 2022, l'humidité volumétrique moyenne à une profondeur de 5 cm était de $0,186 \pm 0,027 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. À 20 cm, l'humidité moyenne était de $0,171 \pm 0,014 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Cette disparité est attribuée à la faible profondeur des systèmes racinaires des fraisiers, généralement concentrés dans les 15 cm supérieurs du sol (AAC, 2021 ; Morillo et al., 2015). Le sol est bien drainé, ce qui est perceptible après les précipitations.

La dynamique temporelle de l'humidité du sol au cours de la saison de croissance reflète le programme d'irrigation régimenté fourni par l'agronome. Étant donné que la culture de fraises de ce champ était destinée à produire des plants pour la distribution, l'humidité du sol a fait l'objet d'un suivi méticuleux. Pour favoriser une croissance optimale des racines et empêcher une floraison et une formation prématurées des fruits, l'approche a consisté à appliquer des profondeurs d'irrigation faibles et fréquentes. Le calendrier d'irrigation a donc permis d'éviter tout déficit hydrique du sol.

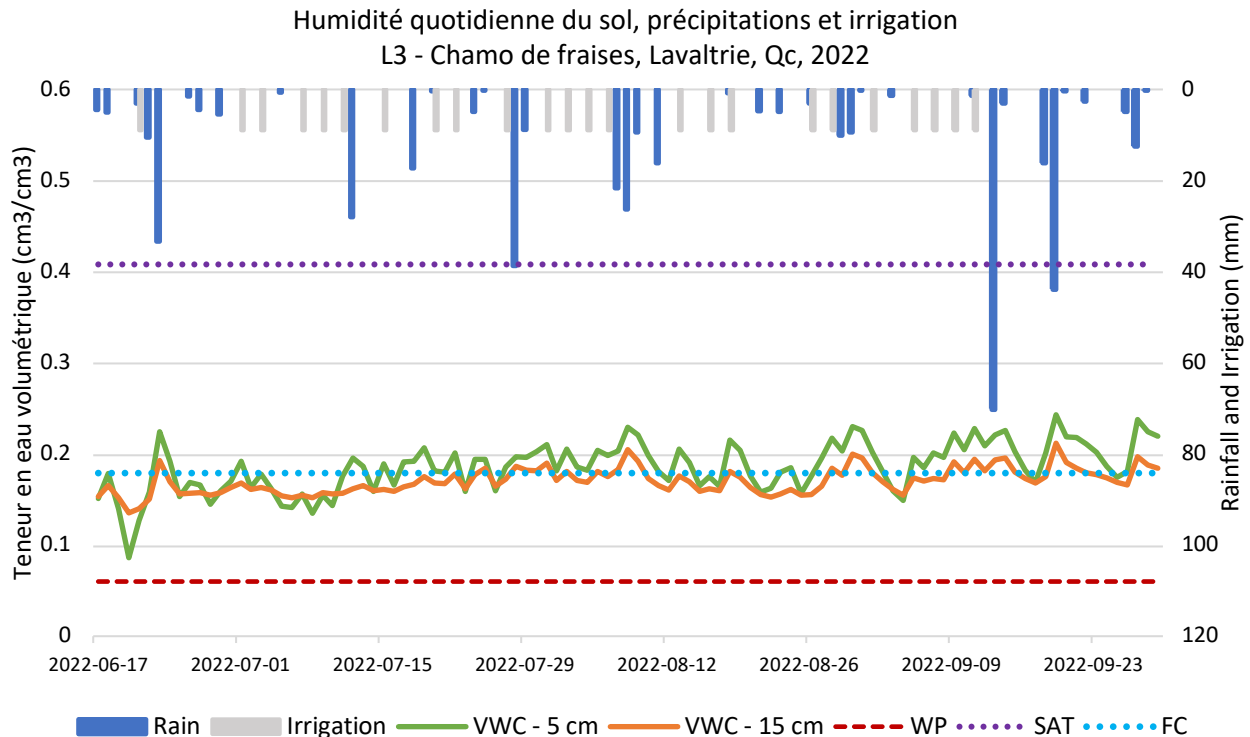


Figure 9. Humidité du sol volumétrique à 5 cm et 15 cm de profondeur pendant la saison 2022 sur le site du champ L3. Comprend les observations quotidiennes moyennes des sondes, les précipitations, l'irrigation et les principaux points de référence.

3.2.4. Humidité du sol sur le terrain L4

La teneur en eau volumétrique moyenne quotidienne qui en résulte, à une profondeur de 10 cm, est illustré à la Figure 10. Si la croissance des cultures de canneberge est sensible au stress hydrique pendant le développement des fruits, de mi-juin à début septembre (Pelletier et al., 2015a, 2015b), les mois de juillet et août sont les plus critiques, correspondant à la floraison et à la formation des fruits (Jeranyama et al., 2017).

Les pics observés dans l'humidité quotidienne du sol sont en corrélation avec les précipitations et les épisodes d'irrigation (Figure 10). Entre le 1er mai et le 30 septembre 2022, la teneur en eau volumétrique moyenne était de $0,245 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ avec un écart-type de $0,052 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Les racines fines et fibreuses du plant de canneberge s'étendent généralement à des profondeurs de 7 à 15 cm sous la surface du sol (Sandler et DeMoranville 2008). Ainsi, le placement du tensiomètre à une profondeur de 10 cm suggère qu'il peut être situé sous la couche de sol où l'absorption d'eau par les racines est la plus importante. Ainsi, en plus de l'abondance des précipitations pendant la saison de croissance, l'humidité élevée du sol peut être attribuée à l'influence des pratiques de sous-irrigation dans la tourbière à canneberges. Le rendement optimal des canneberges et la réduction de l'utilisation de l'irrigation pour la production de canneberges au Québec ont été obtenus en contrôlant la nappe phréatique à une profondeur de 60 cm (Pelletier et al., 2015b). Par conséquent, en supposant un contrôle idéal de la nappe phréatique sur le terrain, la remontée capillaire contribue de manière significative à la l'humidité du sol.

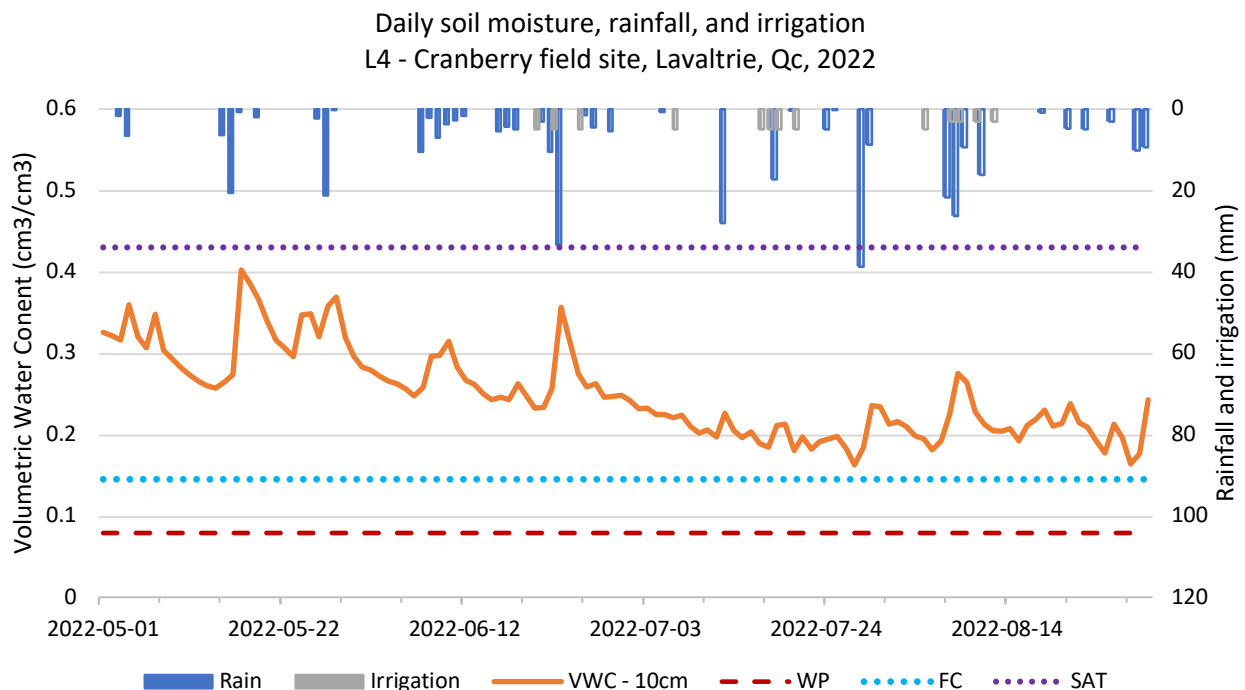


Figure 10. Humidité du sol volumique à 10 cm de profondeur pendant la saison 2022 sur le site du champ L4. Comprend les observations quotidiennes moyennes des sondes, les précipitations, l'irrigation et les principaux points de référence.

4. Données météorologiques

Le modèle AquaCrop nécessite des valeurs quotidiennes de précipitations, de température minimale et maximale de l'air, d'évapotranspiration de la culture de référence et de concentration moyenne annuelle de dioxyde de carbone (CO₂). Le calculateur ETo de la FAO a été utilisé pour calculer l'ETo quotidien en utilisant les températures maximale et minimale, la vitesse du vent à 2 m au-dessus de la surface du sol, le rayonnement solaire et l'humidité relative minimale et maximale.

4.1.1. Données climatiques historiques

Pour l'analyse historique, les données météorologiques, y compris les précipitations (mm), la température de l'air (°C), l'humidité relative (%) et la vitesse du vent (m/s), ont été extraites de la station météorologique de L'Assomption d'ECCC sur une base horaire pour les années 1997-2022 (ECCC L'Assomption, 2022). Les points de données manquants ont été comblés par les mesures de la station météorologique de Montréal St-Hubert, située à 25 km (ECCC Montréal St-Hubert, 2022). Les données horaires ont été traitées pour calculer les valeurs maximales et minimales quotidiennes de la température et de l'humidité relative, ainsi que les précipitations totales quotidiennes et la vitesse moyenne du vent. Le rayonnement solaire net a été obtenu à partir du *National Aeronautics and Space Administration Langley Research Center Prediction of Worldwide Energy Resource Project* (NASA POWER, 2022). L'humidité relative, la vitesse du vent et le rayonnement solaire ont été utilisés pour calculer l'ETo, puis pour déterminer l'ETc des principales cultures au cours des 25 dernières années. Les concentrations annuelles moyennes de CO₂ dans l'atmosphère sont fournies par AquaCrop de l'observatoire de Mauna Loa.

Dans cette étude, les données météorologiques historiques (1997-2021) de la station météorologique la plus proche ont été explorées, analysées et introduites dans les modèles AquaCrop pour l'estimation des besoins historiques en irrigation. Les données météorologiques de 2022 ont été utilisées en tandem avec les données de terrain collectées pour l'étalonnage du modèle.

L'analyse des données météorologiques historiques pour la saison de croissance (du 1er mai au 30 septembre) a révélé une saison sèche de 1 sur 25 en 2021, une saison moyenne en 1998 et une saison humide en 2015, correspondant à 280 mm, 478 mm et 602 mm de précipitations, respectivement. La Figure 11 illustre les fluctuations importantes, d'une année sur l'autre, des précipitations totales pendant la période de croissance, avec une tendance à la baisse de 2015 à 2021. Parallèlement, on observe une tendance générale à la hausse de la température moyenne. La période de croissance en 2021 a été la plus sèche et la deuxième plus chaude avec un total de 280 mm de précipitations et une température moyenne de 18,9°C. Cela correspond aux préoccupations des producteurs concernant les pressions accrues sur les ressources d'irrigation et les difficultés qu'ils ont rencontrées pendant les périodes de sécheresse de 2021. Il est intéressant de noter que l'ETo de la période de croissance varie moins d'une année à l'autre, entre 525 mm et 612 mm, et ne semble pas corrélé aux précipitations. Par conséquent, les précipitations, ainsi que leur répartition tout au long de la période de croissance, devraient exercer une influence importante sur

le bilan hydrique du sol. L'année de référence au cours de laquelle les données de terrain ont été collectées est 2022.

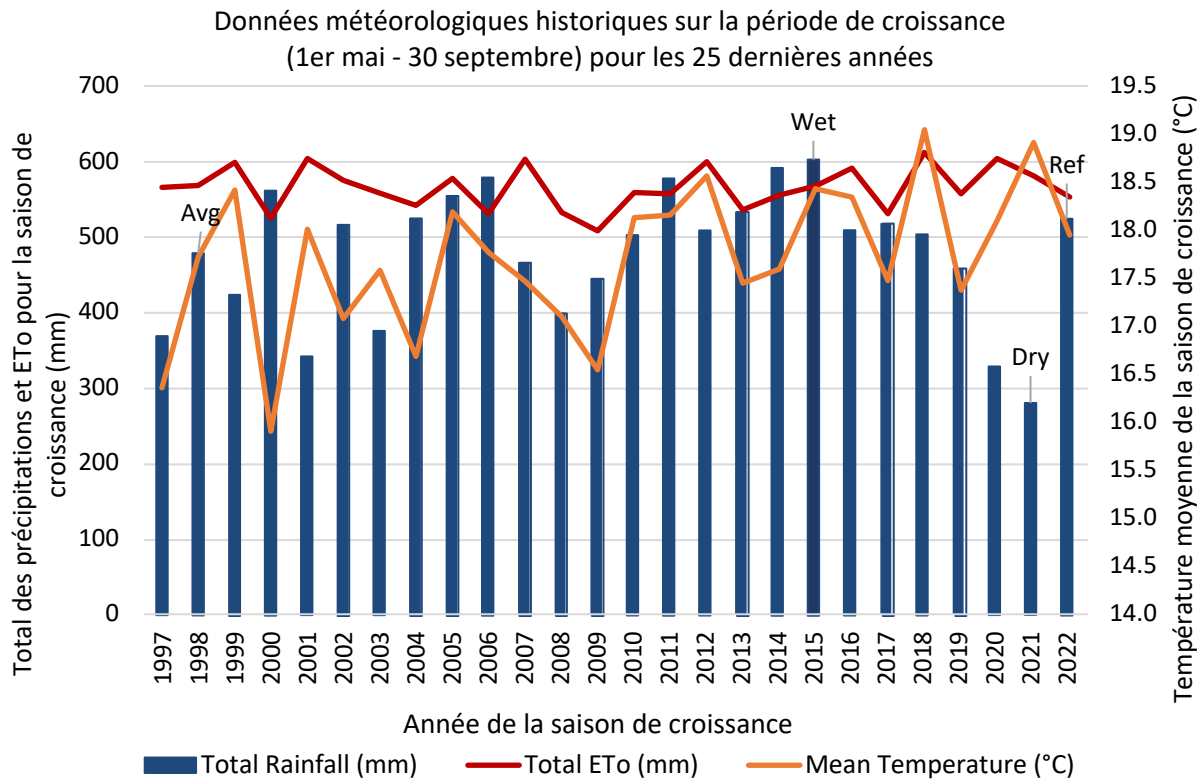


Figure 11. Données météorologiques historiques sur la période de croissance provenant de la station météorologique de L'Assomption.

Le tableau 3 classe les données météorologiques historiques de la saison de croissance de la plus faible à la plus forte pluviométrie, en mettant en évidence les années sèches, moyennes et humides en jaune, vert et bleu respectivement. L'année de référence 2022, cruciale pour la calibration du modèle, est surlignée en gris. Si l'on considère les 25 années précédentes, la saison de croissance 2022 a présenté une pluviométrie totale supérieure à la moyenne (524 mm), une température moyenne typique (17,9°C) et une ETo standard (553 mm). La Figure 12 présente les données quotidiennes relatives aux précipitations, à l'ETo et aux températures maximales et minimales pendant la période de végétation de 2022. Malgré une période de sécheresse de 10 jours au début du mois de mai, les précipitations ont été réparties tout au long de la saison. La température de l'air a atteint un maximum de 33,1°C le 7 août et a été accompagnée d'un épisode de pluie, ce qui a entraîné des températures plus basses par la suite. Par rapport à l'année sèche historique, on s'attend à un besoin d'irrigation inférieur pour 2022.

Tableau 3. Précipitations totales, température moyenne et évapotranspiration de référence totale, pour les saisons de croissance de mai à septembre, d'après les données météorologiques de L'Assomption (ECCC L'Assomption, 2022).

Année	Pluie totale (mm)	Temp moyenne (°C)	ETo totale (mm)	Année	Pluie totale (mm)	Temp moyenne (°C)	ETo totale (mm)
2021	280	18.9	581	2012	509	18.6	600
2020	328	18.1	604	2016	509	18.3	591
2001	342	18.0	604	2002	516	17.1	575
1997	369	16.4	566	2017	518	17.5	531
2003	375	17.6	558	2022	524	17.9	553
2008	400	17.1	532	2004	525	16.7	542
1999	424	18.4	599	2013	534	17.5	536
2009	445	16.6	508	2005	555	18.2	577
2019	459	17.4	557	2000	561	15.9	525
2007	466	17.5	603	2011	577	18.2	557
1998	478	17.7	568	2006	579	17.8	531
2010	502	18.1	559	2014	591	17.6	555
2018	503	19.0	612	2015	602	18.4	568

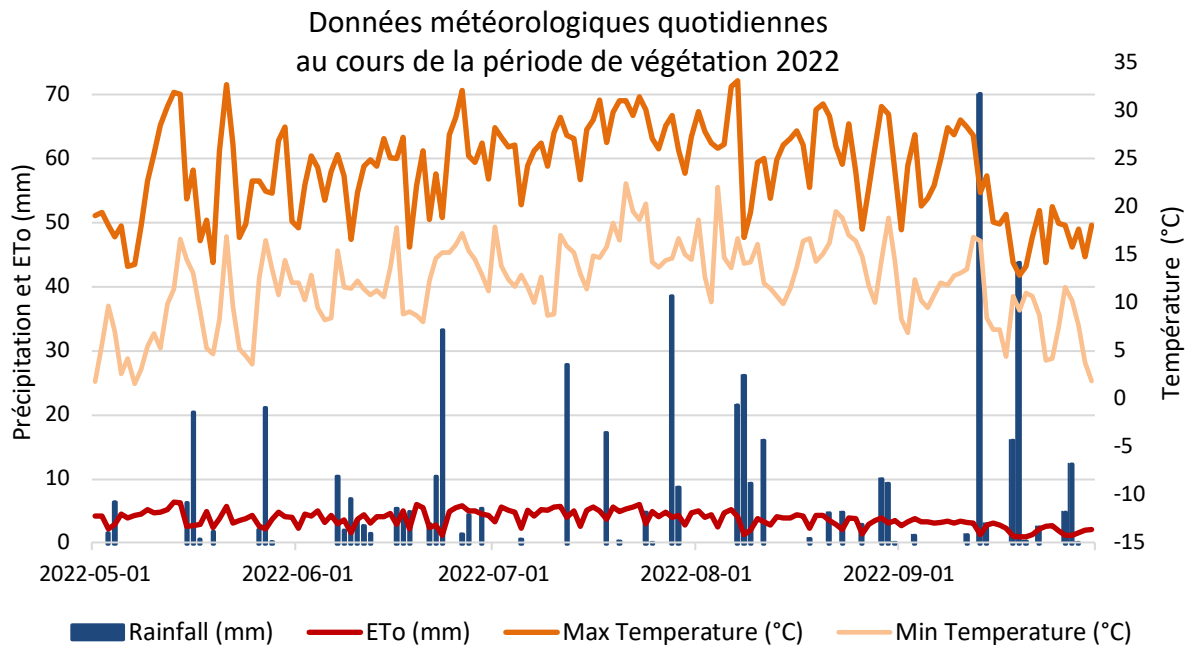


Figure 12. Précipitations, évapotranspiration potentielle, température maximale et température minimale par jour pour la période du 1er mai au 30 septembre 2022.

4.1.2. Données climatiques futures

Pour prédire l'impact d'un climat changeant, des données variables quotidiennes à échelle réduite et ajustées au biais ont été obtenues auprès de ClimateData.ca (2022). ClimateData.ca a été créé grâce à une collaboration entre le *Pacific Climate Impacts Consortium*, *Ouranos Inc*, le *Prairie Climate Centre*, le *CECC*, le *Centre de recherche informatique de Montréal* et *Habitat7*. La dernière phase de l'ensemble CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project*) a été sélectionnée puisqu'il s'agit des données les plus récentes des modèles climatiques mondiaux disponibles. L'ensemble est constitué de projections provenant de cinq modèles de changement climatique : IPSL-CM6A-LR, CNRM-CM6-1, MIROC6, MIROC-ES2L et CNRM-ESM2L, dans le cadre du scénario d'émission SSP5-8.5. Le scénario SSP5-8.5 (scénario à fortes émissions) a été choisi pour maintenir la cohérence entre les travaux de l'équipe de l'IRDA pour le projet SCELANEAU.

Chaque GCM a fait l'objet d'une réduction d'échelle statistique pour la zone d'étude à l'aide de la méthodologie BCCAQv2. BCCAQv2 est une méthode hybride combinant les résultats d'analogues construits corrigés des biais (BCCA ; Maurer et al. 2010) et de la cartographie delta-quantile (QDM ; Cannon et al. 2015). BCCA utilise l'agrégation spatiale via une combinaison linéaire d'analogues historiques pour les champs quotidiens à grande échelle. QDM utilise une méthode modifiée de cartographie des quantiles qui préserve les changements relatifs dans les quantiles des GCM afin d'éviter les effets inflationnistes. Les ensembles de données CMIP6 ont été réduits à une échelle d'environ $6 \times 10 \text{ m}$ ($0,0833^\circ$ de latitude \times $0,0833^\circ$ de longitude). Les concentrations annuelles moyennes de CO_2 correspondant au scénario SSP5-8.5 ont été sélectionnées dans AquaCrop.

Deux périodes futures ont été définies pour les résultats des simulations projetées afin de comparer les effets proches et lointains sur les besoins en irrigation par rapport à la période de référence (1997-2021). Les années 2050 représentent une moyenne de 30 ans sur la période 2036-2065, et les années 2080 représentent une moyenne de 30 ans sur la période 2066-2095. Conformément aux méthodes recommandées par l'Organisation météorologique mondiale (Arguez et Vose, 2011), les normales climatiques ont d'abord été calculées pour les températures et les précipitations sur la période de référence et les deux périodes futures. Une normale climatique standard est la moyenne d'une période climatique sur 30 ans (Govere et al., 2022). La normale climatique pour la période de référence a été comparée à la normale pour les années 2050 et 2080 dans le cadre du scénario SSP5-8.5 afin d'étudier les changements prévus en matière de température et de précipitations. Pour estimer les besoins futurs en irrigation, chaque année a été exécutée dans le modèle à l'aide de données climatiques quotidiennes. La moyenne de l'irrigation nette simulée a ensuite été calculée sur les périodes de 30 ans afin d'évaluer l'effet du changement climatique.

Les variables climatiques prévues par l'ensemble de modèles CMIP-6 étaient impératives pour examiner l'impact potentiel du changement climatique sur les demandes d'irrigation dans la région étudiée. Ces variables ont été étudiées dans un premier temps avant d'être intégrées dans le modèle de l'eau de culture. La température moyenne et les précipitations totales projetées au cours de la

saison de croissance dans le cadre du SSP5-8.5 sont illustrées à la Figure 13 (données climatiques fournies par *PCIC, Ouranos Inc., PCC, ECCC, CRIM* et *Habitat7*). La température moyenne présente une trajectoire ascendante perceptible, avec une amplification simultanée de la variabilité entre les prévisions des modèles à mesure que l'échelle temporelle s'étend vers l'avenir. Les précipitations pendant la saison de croissance présentent une variabilité croissante d'une année à l'autre, ainsi que des fluctuations au sein de l'ensemble. Ces fluctuations et anomalies à court terme soulignent l'importance d'établir une moyenne des données sur une période de 30 ans afin de fournir une représentation statistiquement stable des régimes climatiques sous-jacents.

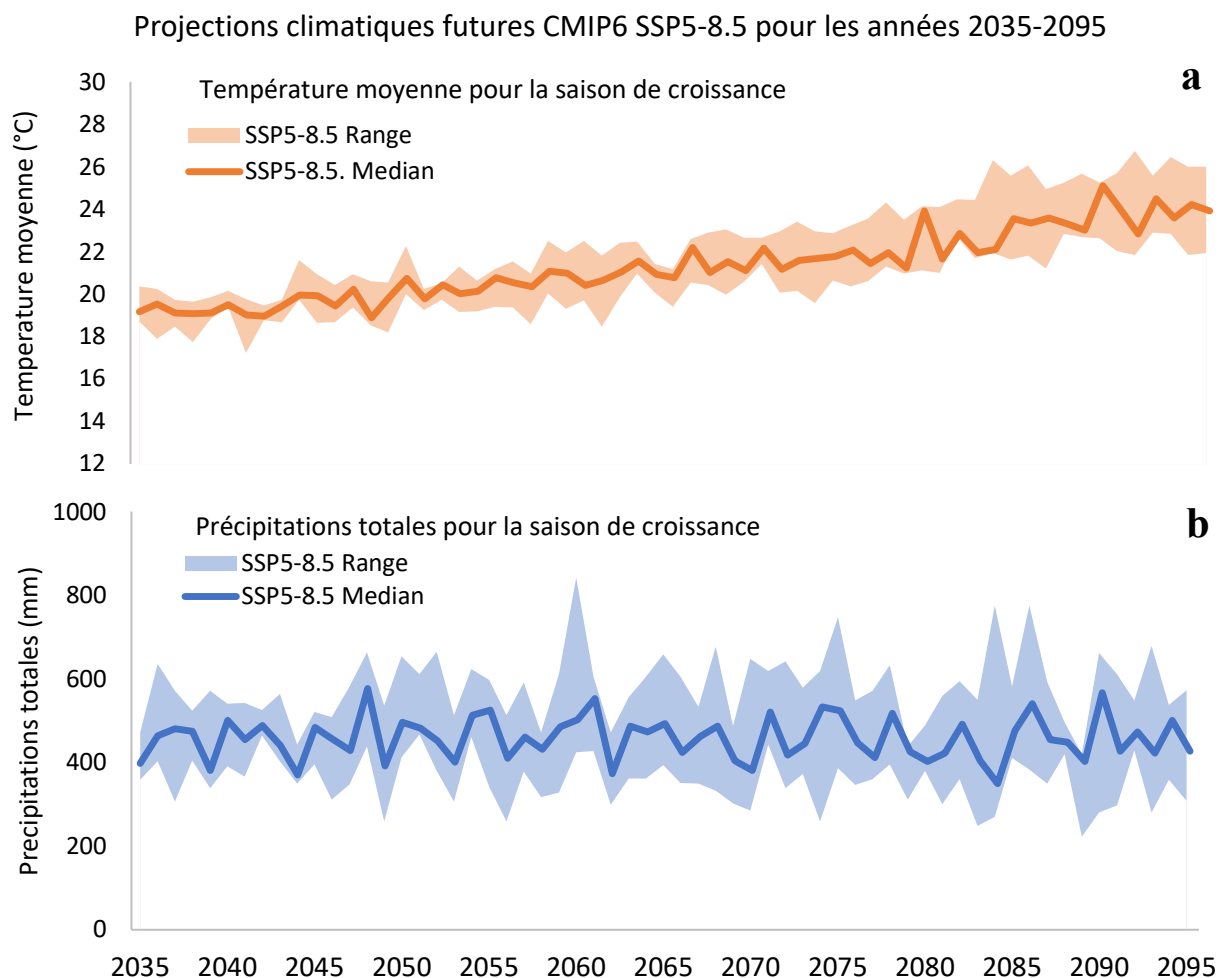


Figure 13. Projection de la température moyenne et des précipitations totales pendant la saison de croissance pour 5 GCM (IPSL-CM6A-LR, CNRM-CM6-1, MIROC6, MIROC-ES2L, et CNRM-ESM2L) dans le cadre du scénario d'émission SSP5-8.5.

Les changements futurs de la température moyenne et des précipitations au cours de la saison de croissance par rapport à la référence historique (1997-2021) sont présentés dans le Tableau 4, en considérant les moyennes sur 30 ans. Pour tous les modèles de l'ensemble, on observe une augmentation systématique de la température moyenne. D'après la médiane de l'ensemble, une

augmentation de 2,2°C et de 6,7°C est prévue d'ici 2050 et 2080, respectivement. L'augmentation la plus forte est logiquement associée à la période la plus lointaine compte tenu du scénario d'émission pessimiste. Les précipitations pendant la saison de croissance devraient diminuer de 6,5 mm d'ici 2050 et de 15,4 mm d'ici 2080 par rapport à la ligne de base, en considérant la médiane de l'ensemble. Cependant, il existe des désaccords au sein de l'ensemble en ce qui concerne la direction du changement des précipitations. En outre, cette évaluation ne tient pas compte de la distribution saisonnière des précipitations. Cela souligne l'importance de simuler les besoins d'irrigation sur une base annuelle et d'évaluer ensuite la moyenne sur 30 ans des besoins nets d'irrigation.

Tableau 4. Changement projeté de la température moyenne et des précipitations totales pendant la saison de croissance pour les années 2050 et 2080, pour chaque modèle climatique, par rapport à la période de référence historique. Calculé à partir des moyennes sur 30 ans.

Modèle climatique	2050s		2080s	
	$\Delta T_{\text{moyenne}}$ (°C)	ΔP_{totale} (mm)	$\Delta T_{\text{moyenne}}$ (°C)	ΔP_{totale} (mm)
IPSL-CM6A-LR	2.9	-11.6	6.7	-35.5
CNRM-CM6-1	2.5	-35.5	5.5	-56.7
MIROC6	2.2	-0.9	4.2	10.3
MIROC-ES2L	2.2	-6.5	4.3	-15.4
CNRM-ESM2L	2.2	28.8	4.8	5.1

5. Modélisation et simulation

Le modèle AquaCrop propose une approche actualisée pour estimer la productivité des cultures en fonction de l'approvisionnement en eau et de la gestion agronomique, sur la base des concepts actuels de la physiologie végétale et du bilan hydrique du sol (Raes et al., 2009). La vigueur du modèle et sa capacité à représenter les impacts du stress hydrique au cours de stades de croissance spécifiques le rend utile pour évaluer les stratégies d'irrigation et étudier des facteurs tels que le climat, le type de sol, la gestion des champs et les dates de semis sur la production des cultures et l'efficacité de l'utilisation de l'eau.

5.1 Calibration du modèle AquaCrop

Les modèles AquaCrop pour la pomme de terre, la courge, la fraise et la canneberge ont été calibrés avec les données de terrain de 2022 de chaque site. Pour faciliter l'évaluation précise des besoins en irrigation, les mesures d'humidité du sol décrites précédemment ont servi de données d'observation pour la calibration du modèle. Chaque modèle a ensuite été initialisé avec des paramètres correspondant aux conditions de terrain, englobant les variables de climat, de culture, de sol et de gestion. L'ET_o a été calculé à l'aide de l'équation de Penman-Monteith de la FAO-56.

Pour estimer les besoins en irrigation, le modèle AquaCrop simule le bilan hydrique du sol par pas de temps quotidien. Dans cette étude, la teneur en eau du sol observée dans la zone racinaire a été comparée à la teneur en eau du sol simulée par AquaCrop pour chaque culture pendant la saison de croissance 2022. Les sous-sections suivantes détaillent la performance des modèles de culture individuels après la calibration du modèle. La performance de calibration des quatre modèles est résumée dans le Tableau 5 dans la section 5.1.5.

La qualité de l'ajustement de chaque modèle de culture a été évaluée à l'aide des statistiques suivantes : le coefficient de corrélation de Pearson (r), l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur quadratique moyenne normalisée (NRMSE) et l'indice de concordance de Willmott (d).

5.1.1. Pomme de terre cultivée dans le Lanoraie sable fin

L'analyse de sensibilité, qui suit la méthodologie décrite par Geerts et al. (2009), a identifié la capacité au champ (FC) et le point de flétrissement (WP) comme des paramètres hautement et modérément sensibles, respectivement. À l'inverse, le couvert végétal maximal, la conductivité hydraulique saturée et le nombre de courbes étaient peu sensibles. Cela met en évidence la nécessité d'effectuer des mesures précises sur le terrain et de calibrer le modèle des paramètres de rétention d'eau du sol pour améliorer la précision de la simulation de la teneur en eau du sol.

Figure 14 présente la comparaison entre la teneur en eau du sol simulée et observée dans la zone racinaire effective de la culture de pommes de terre sur le site du champ L1. La teneur en eau du sol simulée par AquaCrop s'aligne bien sur les tendances observées, réagissant efficacement aux précipitations et aux apports d'irrigation. Dans l'ensemble, il y a eu une forte concordance entre les CES observés et simulés, indiquée par une corrélation de Pearson (r) de 0,88 et un indice de concordance de Willmott (d) de 0,91. Le modèle a estimé la teneur en eau du sol avec une précision satisfaisante pour les conditions de terrain de 2022, avec une erreur quadratique moyenne (RMSE)

de 5,3 mm, et une RMSE normalisée (NRMSE) de 21,8. Ces résultats sont similaires à ceux de Montoya et al. (2016), Razzaghi et al. (2017) et Wang et al. (2023), qui ont utilisé AquaCrop pour simuler la teneur en eau du sol dans des champs de pommes de terre soumis à différents traitements d'irrigation. Ils ont trouvé des valeurs r entre l'eau du sol simulée et observée pour différents niveaux d'irrigation variant entre 0,67 et 0,86, 0,58 et 0,96, et 0,63 et 0,95, respectivement. Des divergences mineures, avec de légères surestimations et sous-estimations, ont été observées pour les valeurs extrêmes de l'eau du sol (figure 15). Des tendances similaires ont été observées par Montoya et al. (2016) lorsque la teneur en eau du sol approchait ou dépassait la FC ou s'approchait du WP. Ces variations dans la dynamique de l'eau du sol pourraient provenir de la paramétrisation des caractéristiques de l'eau du sol ou de disparités dans les quantités de pluie sur le site de terrain par rapport aux données météorologiques. Compte tenu des résultats de ces autres études, le modèle de pomme de terre calibré a bien simulé la quantité d'eau dans le sol sur le site L1 et pourrait être amélioré avec des données de terrain provenant de sites et de saisons de croissance supplémentaires.

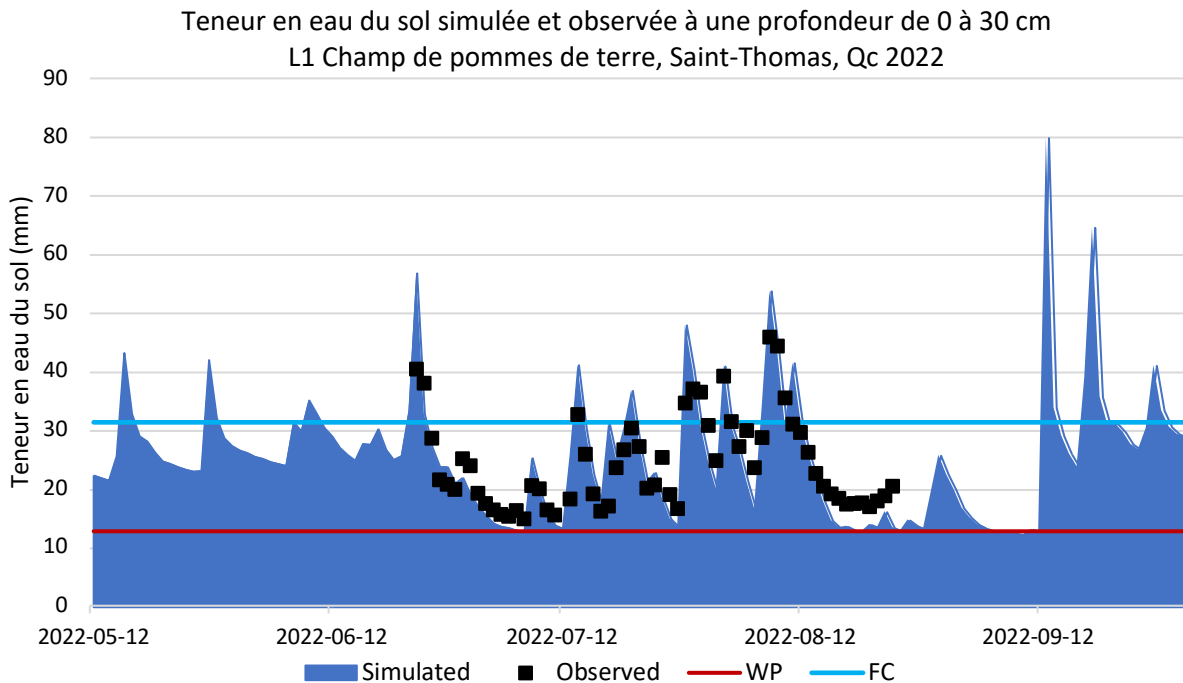


Figure 14. Teneur en eau du sol simulée et observée dans la zone racinaire effective de la pomme de terre (0-30 cm) à L1 au cours de la période de croissance 2022, y compris le point de flétrissement (WP) et la capacité au champ (FC).

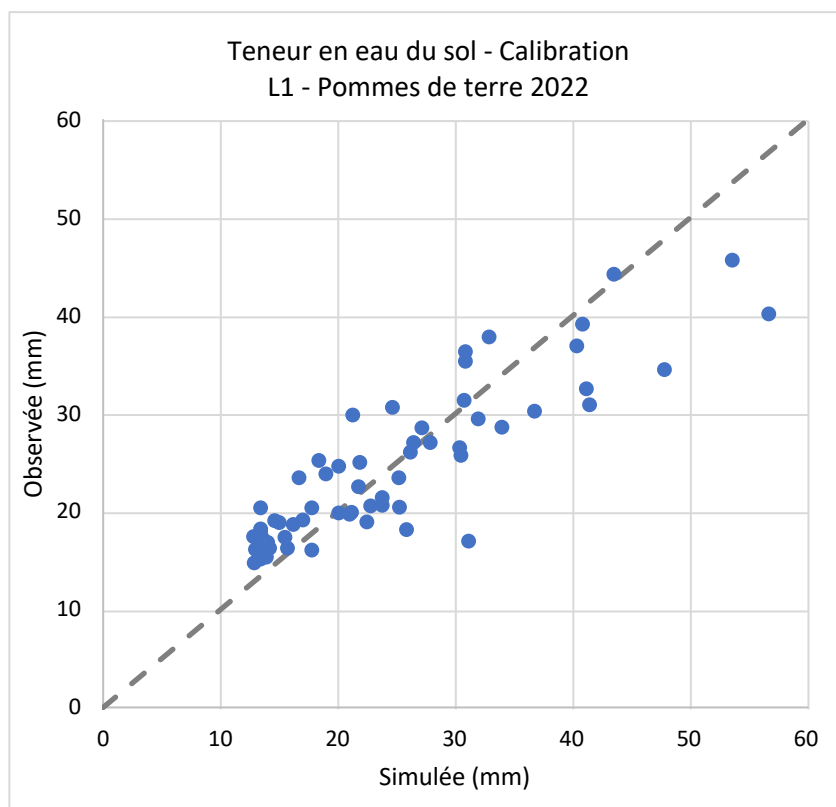


Figure 15. Teneur en eau du sol simulée et observée de 0 à 30 cm de profondeur à L1.

5.1.2. Courges cultivées dans le Saint-Thomas sable fin

Pour le modèle de la courge, la FC a également été identifiée comme un paramètre très sensible dans la simulation de la teneur en eau du sol, tandis que le coefficient de transpiration de la culture ($K_{c\ Tr}$) a montré une sensibilité modérée. En raison de l'absence d'un fichier de culture par défaut pour la courge dans AquaCrop, il a été initié avec un $K_{c\ Tr}$ à 0,90. Cette valeur se situe dans la marge de référence des valeurs de 0,90 à 0,95 pour les courges d'hiver (Allen et al., 1998 ; Pereira et al., 2021) ainsi que des valeurs calibrées de 0,85 à 0,98 pour les courgettes (Darouich et al., 2020). Les paramètres tels que la couverture initiale et maximale du couvert, le coefficient de déclin du couvert, le facteur pour l'expansion de la zone racinaire, le WP, la conductivité hydraulique saturée et le numéro de courbe ont montré une faible sensibilité. L'analyse de sensibilité du modèle pour les courges a renforcé la dépendance des procédures de calcul de l'eau du sol par rapport aux paramètres de rétention de l'eau du sol, tels que la FC.

La teneur en eau du sol simulée et observée dans la zone racinaire de la courge sur le site L2 se trouve en annexe. En général, le modèle a estimé la teneur en eau du sol pour les conditions de terrain de 2022 avec une précision acceptable, avec un r de 0,76, RMSE de 8,7 mm, NRMSE de 19,2%, et d de 0,84. L'eau du sol simulée par AquaCrop correspond à la réponse de l'eau du sol observée aux précipitations et aux événements d'irrigation, sauf dans le cas des précipitations du 12 juillet, qui ont été discutées précédemment dans la section 3.2.2. On suppose qu'il y avait des différences entre les données de la station météorologique de L'Assomption et les conditions

réelles sur le terrain. Aussi, il y a une légère tendance à sous-estimer l'eau du sol, en particulier au début de la saison. Les caractéristiques hydrauliques estimées du sol peuvent différer des valeurs réelles sur le terrain, ce qui pourrait être responsable du désaccord entre l'eau du sol simulée et observée. Il peut également y avoir des erreurs associées aux profondeurs d'irrigation estimées et au calendrier fourni par le producteur. Cependant, pour la planification et la gestion des besoins régionaux en irrigation, il est préférable de sous-estimer la teneur en eau du sol plutôt que de la surestimer afin de s'assurer que les besoins en eau sont satisfaits. Alors, bien que les performances du modèle soient acceptables, elles sont limitées à la précision des données acquises au site L2.

5.1.3. Fraise cultivée dans le Lanoraie sable fin

Conformément au modèle de la courge, l'analyse de sensibilité de la fraise a identifié la FC et le coefficient de transpiration de la culture comme des paramètres hautement et modérément sensibles, respectivement. Pour définir les paramètres de culture conservateurs pour la fraise, le $K_{c_{Tr}}$ de la culture a été initié et calibré à 0,75, ce qui est égal à la norme FAO mise à jour (Pereira et al., 2021). La couverture initiale et maximale du couvert, le coefficient de déclin du couvert, le facteur de forme pour l'expansion de la zone racinaire, le WP, la conductivité hydraulique saturée et le numéro de courbe étaient peu sensibles.

Pour le modèle de la fraise, la comparaison de la teneur en eau du sol simulée et observée dans les 20 premiers centimètres a révélé une corrélation de Pearson (r) de 0,54 et un indice de concordance de Willmott de 0,65. Les RMSE et NRMSE étaient respectivement de 6,6 mm et 18,6 %. Malgré une faible gamme de mesures de l'humidité du sol au cours de la saison de croissance, les paramètres statistiques indiquent qu'AquaCrop a été en mesure de simuler la teneur en eau du sol avec une bonne précision dans cette étude.

Il est essentiel de souligner que la ferme produit principalement des plants de fraises, alors qu'AquaCrop est configuré pour simuler un cycle de culture complet, y compris la floraison et la formation des fruits. Dans ce champ, la floraison et la production de fruits ont été intentionnellement supprimées pour donner la priorité à la croissance des racines et du couvert végétal. Cette disparité est évidente dans la teneur en eau plus faible de l'AquaCrop pendant les périodes où la culture demanderait normalement plus d'eau pour la floraison et la formation des fruits. Néanmoins, une concordance notable est observée autour des événements d'irrigation, ce qui correspond à la pratique de l'exploitation consistant à contrôler étroitement l'irrigation autour de la FC par le biais d'événements d'irrigation petits et fréquents. Le modèle a tendance à surestimer l'impact des précipitations importantes. Battilani et al. (2014) et Farahani et al. (2009) ont constaté une surestimation similaire des valeurs maximales de l'eau du sol pour les modèles de culture de tomates et de coton, respectivement. Les désaccords entre l'eau du sol estimée et observée peuvent être attribués au cycle de croissance non traditionnel des cultures et aux différences potentielles dans l'hydraulique du sol.

5.1.4. Canneberge cultivée sur le sable Saint-Jude

Pour le modèle de la canneberge, la FC a également été identifiée comme un paramètre très sensible dans la simulation de la teneur en eau du sol. La profondeur de la nappe phréatique et le

point de saturation du sol étaient modérément sensibles, tandis que le $K_{c\ TR}$ de la culture était peu sensible. La profondeur cible de la nappe phréatique de 0,6 m provenant d'études sur les canneberges au Québec (Caron et al., 2017 ; Pelletier et al., 2015b ; Vanderleest et al., 2017), a été calibrée en fonction des conditions sur le terrain. Une profondeur variable a été spécifiée dans AquaCrop pour représenter une nappe phréatique plus élevée (0,5 m) au printemps, une profondeur optimale (0,6 m) pendant la floraison et la formation des fruits, et une nappe phréatique plus basse (0,8 m) à l'automne. En l'absence d'un fichier de culture par défaut pour la canneberge dans AquaCrop, $K_{c\ TR}$ a été calibré à 0,60. Cette valeur est cohérente avec l'étude sur l'évapotranspiration de la canneberge de Hattendorf et Davenport (1996) et entre les valeurs de 0,5 (Bigah et al., 2019) et 0,83 (Vanderleest et Bland, 2017) trouvées dans la littérature.

L'eau du sol simulée par AquaCrop dans la zone racinaire de la culture de canneberges s'est bien alignée sur les tendances observées sur le site du champ L4, en réponse aux précipitations et aux apports d'irrigation. Dans l'ensemble, la concordance entre la teneur en eau du sol observée et simulée était acceptable, comme l'indiquent la corrélation de Pearson (r) de 0,68 et l'indice de concordance de Wilmott (d) de 0,80. La RMSE de 5,3 mm et la NRMSE de 11,8 % montrent que le modèle a simulé l'eau du sol avec une bonne précision par rapport aux conditions de terrain de 2022. Bien que ces résultats soient plus proches des bas intervalles des indicateurs de performance des modèles dans les études de calibration et validation des modèles de culture bien documentés, tels que la pomme de terre (Montoya et al., 2016 ; Razzaghi et al., 2017 ; Wang et al., 2023), ils sont en ligne avec ceux des cultures moins souvent modélisées. Par exemple, dans la calibration et la validation d'AquaCrop pour le ray-grass pérenne (Terán-Chaves et al., 2022), les indices statistiques pour la simulation de l'eau du sol ont été considérés comme raisonnables malgré les variations entre les traitements ($r = 0,83 - 0,86$, $d = 0,30 - 0,84$, $RMSE = 6,1 - 20,1$ mm, $NRMSE = 4,80 - 24,1$ %). En outre, les résultats d'une étude d'étalonnage sur six ans du safran pérenne ont montré qu'AquaCrop simulait bien l'eau du sol avec une NRMSE de 14 % (Mirsafi et al., 2016).

Les sous-estimations de l'eau du sol en juin, suivies de surestimations en juillet, peuvent être attribuées à l'influence du contrôle de la nappe phréatique, ainsi qu'à la disponibilité limitée de données sur les paramètres de culture régissant les cycles de culture de la canneberge. Bien que la performance du modèle soit considérée comme satisfaisante pour l'estimation des besoins régionaux en irrigation dans le cadre de cette étude, la rareté des études existantes dans le contexte de la modélisation des cultures de canneberges et de l'eau met en évidence une lacune dans les données disponibles sur les paramètres cruciaux des cultures. Une collecte plus étendue de données spécifiques à la culture de la canneberge pourrait améliorer la précision et la fiabilité de la calibration du modèle.

5.1.5. Résumé des performances du modèle

L'évaluation de la performance du modèle, résumée dans le tableau 5, révèle une concordance variable entre les données simulées et observées de l'humidité du sol dans les quatre modèles de culture. Dans l'ensemble, les modèles de pommes de terre et de courges présentaient la plus grande concordance entre la teneur en eau du sol simulée et observée, ce qui est comparable aux résultats d'autres études (p. ex., Razzaghi et al., 2017 ; Wang et al., 2023). Cela correspond aux attentes

étant donné la représentation prédominante des légumes dans les études de modélisation des cultures (p. ex., Montoya et al., 2016 ; Battilani et al., 2014). En outre, ces cultures représentent la plus forte prévalence de cultures irriguées dans la région et auront donc l'impact le plus important sur les besoins totaux en irrigation de la zone d'étude.

Il est essentiel de reconnaître certaines limites de l'étude. La calibration a été effectuée exclusivement pour l'humidité du sol, en omettant d'autres paramètres de sortie pertinents. De plus, l'absence de validation du modèle, attribuée à une seule année de données disponibles, introduit un niveau d'incertitude. Le cycle de croissance particulier des fraises sur le site L3, axé sur la production de plantes plutôt que de fruits, pose un défi à la précision de la modélisation et de la simulation. De plus, la conversion des données des champs de canneberges du potentiel matriciel à l'humidité volumique du sol introduit une source potentielle d'erreur. Les modèles de cette étude sont un outil utile pour estimer les besoins régionaux en irrigation. Les recherches futures pourront s'appuyer sur ces résultats et affiner les modèles à l'aide de données supplémentaires.

Tableau 5. Résumé des performances du modèle AquaCrop pour la simulation de la teneur en eau du sol dans la zone racinaire sur quatre sites en 2022.

Site de terrain et Modèle de culture		Indices statistiques			
		r	RMSE (mm)	NRMSE (%)	d
L1	PDT	0.88	5.3	21.8	0.91
L2	Courge	0.76	8.7	19.2	0.84
L3	Fraise	0.54	6.6	18.6	0.65
L4	Canneberge	0.68	5.3	11.8	0.80

5.2 Simulation des besoins en irrigation historiques

Dans cette étude, AquaCrop a été utilisé avec différentes stratégies d'irrigation pour chacun des modèles de culture calibrés afin d'estimer les besoins historiques en irrigation pour les 25 dernières années (1997-2021). Ensuite, les modèles ont été utilisés pour prédire l'impact du changement climatique sur les besoins d'irrigation au futur proche (années 2050) et lointain (années 2080).

Chacun des modèles AquaCrop calibrés a été utilisé pour estimer les besoins nets en irrigation pour les 25 dernières années (1997-2021) pour trois traitements d'irrigation différents. Les données climatiques, telles que la température, l'humidité relative, la vitesse du vent et le rayonnement solaire, ont été obtenues et introduites dans un fichier climatique. Les pratiques de gestion agronomique, telles que la date de plantation et le contrôle des mauvaises herbes, ont été maintenues conformes aux spécifications de l'agriculteur. Les paramètres des cultures et du sol sont restés inchangés par rapport à leurs valeurs calibrées au champ. Le fichier des cultures a été converti du format jour calendaire en degrés-jours de croissance pour tenir compte de la variabilité de la durée du cycle de culture due à la température au cours de la saison de croissance. Il a été constaté que le mode jour calendaire ne permettait pas au modèle de simuler correctement la

croissance des cultures et l'utilisation de l'eau dans des conditions de température non optimales ou pour les scénarios de changement climatique prévus (Tsakmakis et al., 2019). La date de plantation (ou d'ensemencement) a été maintenue constante. Pour les simulations de canneberge, le fichier de la nappe phréatique utilisé dans l'étalonnage du modèle a été supprimé, de sorte que les CWR représenteraient la somme de l'aspersion et de la sous-irrigation.

Le fichier d'irrigation a été établi pour déterminer les besoins nets en irrigation. Les traitements d'irrigation ont été établis sur la base des recommandations de la littérature et appliqués à chaque culture. La pomme de terre est une culture à racines peu profondes, généralement cultivée sur des sols moyens à grossiers. C'est l'une des cultures les plus sensibles au stress hydrique, qu'il s'agisse d'un excès ou d'un déficit d'eau dans le sol (King et al., 2020 ; Stark et al., 2020). Le SWC recommandé pour les pommes de terre varie, mais il est généralement optimal lorsqu'il est maintenu entre 60 et 85 % de l'AW à différents stades du cycle de croissance (Allen et al., 1998 ; King et al., 2020). Au Québec, Dubé et Rochette (1985) suggèrent un minimum de 50 % de la AW à tous les stades de croissance, un niveau également utilisé par Boisvert et al. (1992) à Ottawa pour des études de production de pommes de terre irriguées. De même, la courge est une culture à racines peu profondes (Amer, 2011) qui se cultive mieux sur un sol fertile, bien drainé et contenant de la matière organique (Amer, 2011 ; OMAFRA ; 2022). La courge est sensible à l'excès d'eau dans le sol, du semis à la maturité. Compte tenu de la profondeur relativement faible des racines, dans les 40-50 cm supérieurs du sol, il est crucial de maintenir la SWC au-dessus de 50 % de l'AW pour éviter des déficits hydriques nuisibles (Allen et al., 1998 ; Hess et al., 1997). Selon Ells et al. (1994), plus de 60 % des racines de courge se trouvent dans les 15 premiers centimètres du sol tout au long de la saison. Le développement rapide des racines nécessite un calendrier d'irrigation bien géré afin d'éviter à la fois l'excès et le déficit d'eau dans le sol. Cela permet d'assurer une bonne formation des fruits et d'atténuer le risque de pourriture des racines et des tiges. (Hess et al., 1997 ; OMAFRA, 2022). Les canneberges ont besoin d'une zone racinaire humide et bien oxygénée et le rendement de la culture est très sensible aux variations de l'eau dans le sol. Alors que leurs racines fines et fibreuses s'étendent à des profondeurs maximales de 0,15 à 0,30 m, la majeure partie des racines des canneberges est concentrée dans les 0,1 à 0,15 m supérieurs de la surface du sol (Sandler et DeMoranville, 2008). Pour un rendement optimal de la canneberge sans excès d'eau, l'irrigation devrait être mise en place lorsque le potentiel matriciel du sol de la zone racinaire se situe entre -7,5 et -4 kPa (Caron et al., 2016 ; Pelletier et al., 2015a). Les valeurs en dehors de cette plage conduisent à des conditions anaérobies humides ou à des conditions sèches limitant la remontée capillaire (Caron et al., 2017). Dans leur étude sur les besoins en eau et la conception de la sous-irrigation pour la production de canneberges, Elmi et al. (2010) ont conclu qu'un niveau d'épuisement de 25 à 50 % AW pouvait être utilisé pour déterminer les besoins en irrigation dans les conditions du Québec sans compromettre le rendement. L'irrigation est une pratique de gestion de l'eau essentielle pour les fraises au Québec, car il s'agit d'une culture à racines peu profondes qui ne peut tolérer la sécheresse (AAFC, 2021 ; Nand et Qi, 2023). Les racines des fraisiers poussent dans les 15 premiers centimètres du sol et 75 % des racines sont concentrées dans les 8 premiers centimètres (Craig, 1976). Elles ont besoin d'un sol bien drainé et

bénéficient d'une teneur en matière organique modérée à élevée. Elles peuvent être cultivées dans des sols sablonneux si l'irrigation est bien gérée (AAFC, 2021). L'irrigation est appliquée pour maintenir l'humidité du sol au-dessus de 50 % de l'AW afin d'assurer la croissance continue de la plante (Craig, 1976). Alors, trois traitements d'irrigation ont été étudiés sur la base de l'épuisement maximal admissible (MAD) de la teneur en eau disponible (AW) du sol. Alors, pour tous les cultures, l'irrigation dans les simulations a été déclenchée lorsque 20 %, 35 % ou 50 % de la quantité totale d'eau disponible dans le sol avaient été épuisés. Dans tous les cas, l'eau a été appliquée pour ramener l'humidité du sol de la zone racinaire à la FC.

Cinq années sèches, cinq années moyennes et cinq années humides ont été identifiées en comparant les précipitations totales sur la période de croissance des cultures de 1997 à 2021. Les moyennes des résultats de simulation de cinq années ont été calculées pour représenter les conditions météorologiques historiques sèches, moyennes et humides de la saison de croissance.

Les résultats simulés ont ensuite été comparés statistiquement pour évaluer les effets du traitement d'irrigation et des conditions météorologiques sur le besoin net d'irrigation (I_{net}), le rendement sec (Y) et la productivité de l'eau (WP). L'analyse statistique a été utilisée pour recommander la stratégie d'irrigation optimale dans des conditions de saison de croissance sèche, moyenne et humide. La signification statistique du traitement d'irrigation et du temps ou du climat a été testée à l'aide d'une ANOVA à deux voies avec interaction factorielle, exécutée avec la procédure GLM dans SAS Studio version 3.81 (SAS Institute Inc., Cary, NC). Les différences significatives du test F ont été déterminées à $p = 0,05$. En outre, les moyennes des moindres carrés (LS-means) ont été calculées pour chaque effet principal ainsi que pour leur interaction, en utilisant l'énoncé LSMEANS avec un niveau de confiance maintenu à $p = 0,05$.

Les besoins en irrigation simulés pour chaque modèle de culture sont présentés ci-dessous. Les résultats de la production des cultures et de la productivité de l'eau sont inclus. Bien que les paramètres de culture du modèle n'aient pas été calibrés sur les données de terrain pour les sorties de rendement et de productivité de l'eau, les paramètres de culture par défaut de la bibliothèque d'AquaCrop permettent d'approximer les informations incomplètes et se sont avérés simuler avec précision les sorties de production (Raes et al., 2009). Par exemple, Tsakmakis et al. (2019) ont constaté que le rendement des graines de coton n'était simulé avec précision que lorsque le fichier de culture par défaut du modèle était utilisé.

5.2.1. Simulation des besoins historiques en irrigation des pommes de terre

Bien que les besoins en eau des cultures de pommes de terre aient été précédemment modélisés dans le cadre du projet RADEAU, la collecte de données et la modélisation ont été achevées pour comprendre les calculs supplémentaires à partir des premiers principes.

Les besoins nets en irrigation (I_{net}), le rendement sec des cultures (Y) et la productivité de l'eau d'évapotranspiration (PLE_{ET}) simulés pour la pomme de terre sont présentés dans le tableau 6 pour les années historiques sèches, moyennes et humides et pour trois traitements d'irrigation. Par souci de clarté, les besoins en eau des cultures sont la quantité d'eau nécessaire pour couvrir la perte d'eau par évapotranspiration d'une culture exempte de maladies, poussant dans de grands champs sans restriction de l'eau et de la fertilité du sol, et atteignant son plein potentiel de production dans

un environnement donné. L'irrigation nette (I_{net}), est la quantité totale d'eau nécessaire pour satisfaire pleinement les besoins en eau d'une culture spécifique, en tenant compte de la partie des qui n'est pas satisfaite par les précipitations, le stockage de l'eau dans le sol et les eaux souterraines. Dans AquaCrop, la biomasse (B) et le rendement (Y) sont exprimés en masse de matière sèche par unité de surface (tonne/ha). La PLE_{ET} est le rapport entre le rendement de la culture et l'évapotranspiration. Il est exprimé en kg de rendement par m^3 d'eau évapotranspirée. Puisque les données sur le rendement n'étaient pas disponibles, des expérimentations supplémentaires sont recommandées pour étayer les résultats en matière de rendement.

Les précipitations, l'ETo et la température moyenne de la saison de croissance sont fournis pour référence. Chaque valeur représente le résultat moyen de cinq années, représentant les conditions historiques sèches, moyennes et humides de la saison de croissance. Les besoins en irrigation diminuent avec l'augmentation de l'épuisement maximal autorisé de 20 % à 50 % de la teneur en eau disponible, étant donné que le seuil d'épuisement le plus bas nécessite des applications d'irrigation plus petites mais plus fréquentes. Ceci est dû au temps d'épuisement plus court pour 20 % AW à partir de la FC du sol, par rapport aux autres traitements. Lorsque les besoins en irrigation diminuent, le rendement total en matière sèche reste constant, ce qui entraîne une plus grande productivité (Figure 16). Ces résultats concordent avec les stratégies d'irrigation recommandées pour les pommes de terre et l'accord général selon lequel, pour maximiser les rendements, l'AW ne doit pas descendre en dessous de 50-65 % dans la zone d'activité maximale des racines (Allen et al., 1998 ; Singh, 1969 ; Shock et al., 2007 ; Wright et Stark, 1990). Au-delà de ce seuil, on prévoit que le stress hydrique aura un impact sur la production de récoltes.

Tableau 6. Résultats de la simulation historique pour la pomme de terre. Simulation des besoins nets en irrigation, du rendement sec et de la productivité de l'eau ET de la pomme de terre pour différents traitements d'irrigation et des conditions météorologiques historiques. Les moyennes sur 5 ans des données météorologiques de la saison de croissance et les résultats des simulations sont présentés.

Météo historique 5 ans*	Traitement de l'irrigation Retour à la CC	Saison de croissance (mai-sept)			Résultats simulés		
		Précip (mm)	ETo (mm)	Temp (°C)	I net (mm)	Y sec (ton/ha)	PLE_{ET} (kg/m ³)
Sèche	MAD de 20%AW	339	582	17.8	365	11.0	2.16
	MAD de 35%AW	339	582	17.8	305	10.9	2.30
	MAD de 50%AW	339	582	17.8	265	10.9	2.42
	Pluie seulement	339	582	17.8	0	4.7	1.89
Moyenne	MAD of 20%AW	500	586	18.4	337	10.6	2.08
	MAD of 35%AW	500	586	18.4	279	10.5	2.23
	MAD of 50%AW	500	586	18.4	249	10.4	2.32
	Pluie seulement	500	586	18.4	0	5.5	1.90
Humide	MAD of 20%AW	582	547	17.6	287	12.0	2.44

MAD of 35%AW	582	547	17.6	237	11.8	2.54
MAD of 50%AW	582	547	17.6	202	12.0	2.68
Pluie seulement	582	547	17.6	0	7.5	2.34

Chaque valeur représente une moyenne de cinq années, soit une condition météorologique historique.

*Cinq années sèches, moyennes et humides ont été sélectionnées sur la base des précipitations totales de la saison de croissance (mai à septembre).

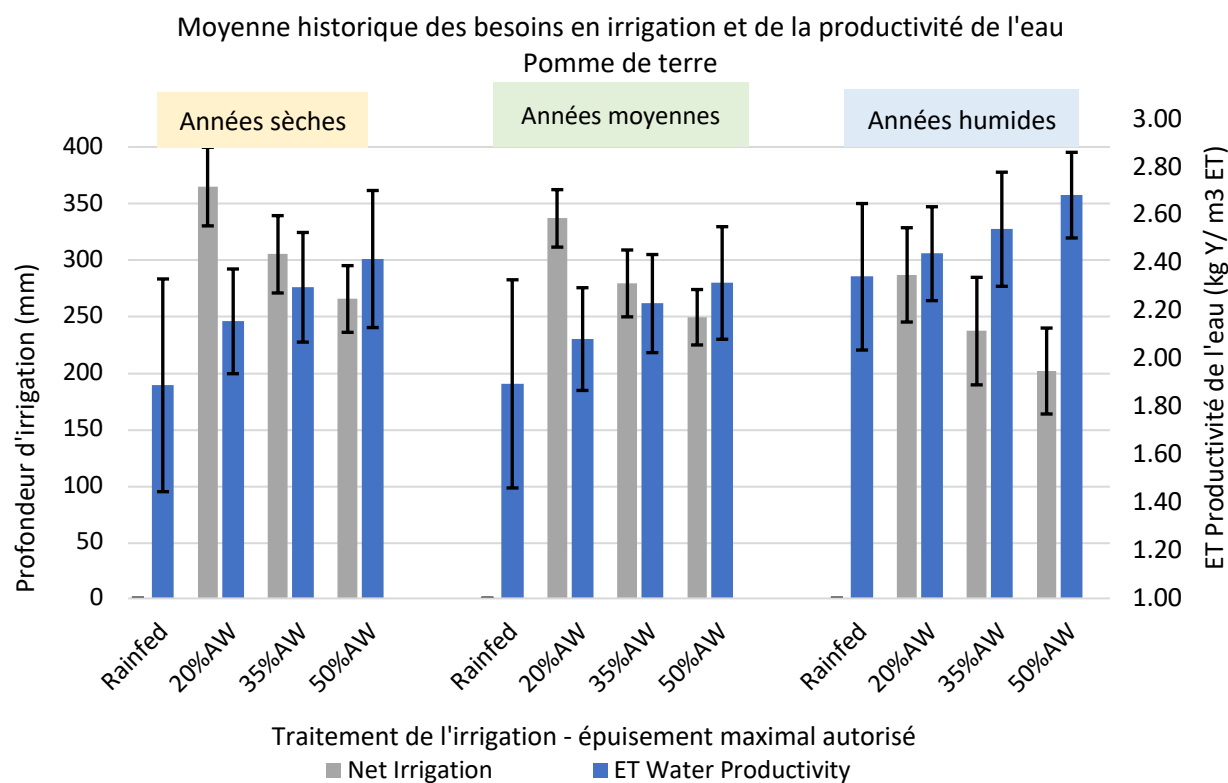


Figure 16. Simulation des besoins historiques en irrigation et de la productivité en eau de l'ET pour la pomme de terre sous trois traitements d'irrigation et en condition pluviale. Les colonnes représentent une moyenne sur 5 ans +/- l'écart-type.

La signification statistique des effets des conditions météorologiques et du traitement d'irrigation obtenus à partir de l'ANOVA est résumée dans le tableau 7. Dans ce résumé, chaque valeur représente la moyenne de toutes les sorties de simulation pour le traitement respectif dans la première colonne. Le test F a révélé que les conditions météorologiques et le traitement d'irrigation avaient tous deux un impact significatif sur les besoins en irrigation ($p < 0,0001$), alors que l'effet d'interaction n'en avait pas. En ce qui concerne les conditions météorologiques historiques, comme on s'y attendait, seules les conditions de la saison de croissance humide ont eu une irrigation nette significativement plus faible et un rendement plus élevé que les années sèches et moyennes.

Concernant le traitement d'irrigation, toutes les valeurs d'Inet étaient significativement différentes les unes des autres, montrant une réduction significative des besoins d'irrigation avec

une MAD de 50 % de l'AW. Danielescu et al. (2022) ont constaté que la quantité totale d'irrigation supplémentaire pour la production de pommes de terre dans l'Île-du-Prince-Édouard différait également de manière significative entre les scénarios d'irrigation minimale, modérée et extensive, suivant la même tendance à la baisse avec l'augmentation de l'épuisement.

D'autre part, le traitement d'irrigation n'a pas eu d'effet significatif sur le rendement, sauf dans le cas de la pluie, ce qui confirme l'importance de l'irrigation supplémentaire pour la production de pommes de terre dans la région de Lanoraie. En conséquence, la productivité de l'eau a été significativement plus élevée dans le cas de l'épuisement de 50 % que dans chacun des autres traitements d'irrigation.

Dans le scénario de la saison sèche, le test LS-Means de l'effet d'interaction a révélé que l'Inet simulé était statistiquement différent sous chaque traitement d'irrigation, alors que dans les saisons moyennes et humides, les traitements MAD35% et MAD50% ont entraîné des besoins d'irrigation nets similaires. Ces résultats mettent en évidence la réduction de l'eau d'irrigation nécessaire pendant les saisons de croissance humides historiques, ainsi que l'impact significatif d'un seuil d'épuisement de l'eau plus bas en termes d'augmentation de la productivité de l'eau. Notamment, pendant les saisons sèches où la disponibilité de l'eau est la plus préoccupante, la programmation de l'irrigation des producteurs de pommes de terre a le plus grand impact sur leur utilisation nette de l'irrigation.

Tableau 7. Analyse statistique des simulations historiques de la pomme de terre. Effet des différents traitements d'irrigation et des conditions météorologiques historiques sur les besoins nets en irrigation, le rendement sec et la productivité de l'eau ET des cultures de pommes de terre. Les différences entre les moyennes sont indiquées dans les colonnes avec des lettres différentes ($p < 0,05$).

Traitement d'irrigation	I net (mm)	Y sec (ton/ha)	PLE _{ET} (kg/m ³)
MAD de 20%AW	330 a	11.2 a	2.23 a
MAD de 35%AW	274 b	11.1 a	2.36 ab
MAD de 50%AW	239 c	11.1 a	2.47 b
Pluie seulement	0 d	5.9 b	2.04 ac
Météo historique			
Sèche	234 a	9.4 a	2.19 a
Moyenne	216 a	9.3 a	2.13 a
Humide	181 b	10.8 b	2.50 b
Signification			
Traitement d'irrigation	*<.0001	*<.0001	*0.0008
Météo historique	*<.0001	*0.0018	*0.0002
Intéraction	ns	ns	ns

*: significatif; ns: non-significatif. Différences significatives entre les moyennes ($p < 0,05$), indiquées par des lettres différentes dans les colonnes.

5.2.2. Simulation des besoins historiques en irrigation des courges

Les résultats des simulations historiques pour le modèle de la courge sont présentés dans le tableau 8, où chaque valeur est la moyenne sur 5 ans correspondant aux conditions météorologiques historiques. L'Inet simulé pour les courges suit les mêmes tendances que les simulations de pommes de terre, diminuant avec l'augmentation des seuils d'épuisement, ainsi que des conditions de saison de croissance sèche à humide. De même, lorsque les besoins en irrigation diminuent, le rendement reste constant et la productivité de l'eau en ET augmente. En raison de la faible capacité de rétention d'eau du sol, le fait de laisser l'humidité du sol s'épuiser jusqu'au seuil recommandé de 50 % de l'eau disponible (Maughan et al., 2015) réduit la fréquence des épisodes d'irrigation sans permettre à la culture de subir un stress dû à la sécheresse.

Tableau 8. Résultats de la simulation historique pour la courge. Simulation des besoins nets en irrigation, du rendement sec et de la productivité de l'eau ET de la courge pour différents traitements d'irrigation et des conditions météorologiques historiques. Les moyennes sur 5 ans des données météorologiques de la saison de croissance et les résultats des simulations sont présentés.

Météo historique 5 ans*	Traitement de l'irrigation Retour à la CC	Saison de croissance (mai-sept)			Résultats simulés		
		Précip (mm)	ETo (mm)	Temp (°C)	I net (mm)	dry Y (ton/ha)	PLE _{ET} (kg/m ³)
Sèche	MAD de 20%AW	339	582	17.8	222	7.1	2.10
	MAD de 35%AW	339	582	17.8	176	7.1	2.25
	MAD de 50%AW	339	582	17.8	151	7.1	2.36
	Pluie seulement	339	582	17.8	0	1.7	0.78
Moyenne	MAD of 20%AW	500	586	18.4	208	6.6	2.00
	MAD of 35%AW	500	586	18.4	155	6.5	2.09
	MAD of 50%AW	500	586	18.4	135	6.5	2.18
	Pluie seulement	500	586	18.4	0	4.9	2.13
Humide	MAD of 20%AW	582	547	17.6	177	7.1	2.18
	MAD of 35%AW	582	547	17.6	136	7.0	2.31
	MAD of 50%AW	582	547	17.6	94	7.0	2.41
	Pluie seulement	582	547	17.6	0	6.2	2.45

Chaque valeur représente une moyenne de cinq années, soit une condition météorologique historique.

*Cinq années sèches, moyennes et humides ont été sélectionnées sur la base des précipitations totales de la saison de croissance (mai à septembre).

La signification statistique des effets des conditions météorologiques et du traitement d'irrigation obtenus à partir de l'ANOVA est résumée dans le tableau 9. Là encore, chaque valeur représente la valeur moyenne de toutes les sorties de simulation pour le traitement d'irrigation ou

les conditions météorologiques spécifiés. Les effets évalués ont suivi des tendances similaires pour les simulations historiques de courges que pour la pomme de terre. Les conditions météorologiques de la saison de croissance ont eu un effet significatif sur l' I_{net} , le rendement et le WP_{ET} , mais n'ont entraîné des résultats significativement différents que pour les années humides (I_{net} plus faible, rendement plus élevé et WP_{ET} plus élevé).

L'effet significatif du traitement d'irrigation a entraîné des besoins d'irrigation statistiquement différents pour chaque traitement. En même temps, le rendement de la courge et la productivité de l'eau ont diminué de manière significative dans le cas de conditions pluviales uniquement. Dans l'ensemble, le traitement d'irrigation MAD50% réduit de manière significative les besoins nets en irrigation et augmente la productivité de l'eau.

Tableau 9. Analyse statistique des simulations historiques de la courge. Effet des différents traitements d'irrigation et des conditions météorologiques historiques sur les besoins nets en irrigation, le rendement sec et la productivité de l'eau ET des cultures de la courge. Les différences entre les moyennes sont indiquées dans les colonnes avec des lettres différentes ($p < 0,05$).

Traitement d'irrigation	I net (mm)	Y sec (ton/ha)	PLE _{ET} (kg/m ³)
MAD de 20%AW	202 a	6.9 a	2.09 a
MAD de 35%AW	156 b	6.9 a	2.22 a
MAD de 50%AW	127 c	6.9 a	2.32 a
Pluie seulement	0 d	4.3 b	1.79 b
Météo historique			
Sèche	137 a	5.7 a	1.87 a
Moyenne	124 a	6.1 a	2.10 a
Humide	102 b	6.8 b	2.34 b
Signification			
Traitement d'irrigation	*<.0001	*<.0001	*0.0017
Météo historique	*0.0002	0.0037	*0.0011
Intéraction	ns	*<.0001	*<.0001

*: significatif; ns: non-significatif. Différences significatives entre les moyennes ($p < 0,05$), indiquées par des lettres différentes dans les colonnes.

5.2.3. Simulation des besoins historiques en irrigation des fraises

L'irrigation nette, la biomasse totale hors-sol (B) et la productivité de l'eau simulée pour les fraises sont présentées dans le tableau 10 pour les années historiques sèches, moyennes et humides et pour les trois traitements d'irrigation. Chaque valeur représente le résultat moyen de cinq années, représentant les conditions météorologiques historiques sèches, moyennes et humides de la saison de croissance. La biomasse est présentée par opposition au rendement en fruits, étant donné que le modèle a été calibré sur le site de production des plantes. Les besoins en irrigation sont plus

importants lors des années sèches et diminuent avec l'augmentation de l'épuisement maximal autorisé de 20 % à 50 % de la teneur en eau disponible. La biomasse aérienne reste constante malgré la variation des seuils d'épuisement, sauf lorsqu'aucune irrigation n'est appliquée. Cela se traduit par une plus grande productivité de l'eau avec un MAD de 50 %.

Tableau 10. Résultats de la simulation historique pour la fraise. Simulation des besoins nets en irrigation, du rendement sec et de la productivité de l'eau ET de la fraise pour différents traitements d'irrigation et des conditions météorologiques historiques. Les moyennes sur 5 ans des données météorologiques de la saison de croissance et les résultats des simulations sont présentés.

Météo historique 5 ans*	Traitement de l'irrigation Retour à la CC	Saison de croissance (mai-sept)			Résultats simulés		
		Précip (mm)	ET _o (mm)	Temp (°C)	I _{net} (mm)	B (ton/ha)	PLE _{ET} (kg/m ³)
Sèche	MAD de 20%AW	339	582	17.8	368	15.0	1.91
	MAD de 35%AW	339	582	17.8	318	15.0	1.96
	MAD de 50%AW	339	582	17.8	289	15.0	2.01
	Pluie seulement	339	582	17.8	0	1.8	0.34
Moyenne	MAD of 20%AW	500	586	18.4	328	14.0	1.84
	MAD of 35%AW	500	586	18.4	288	14.0	1.88
	MAD of 50%AW	500	586	18.4	241	14.0	1.93
	Pluie seulement	500	586	18.4	0	5.3	0.71
Humide	MAD of 20%AW	582	547	17.6	288	14.5	2.01
	MAD of 35%AW	582	547	17.6	256	14.5	2.04
	MAD of 50%AW	582	547	17.6	218	14.5	2.09
	Pluie seulement	582	547	17.6	0	11.7	1.29

Chaque valeur représente une moyenne de cinq années, soit une condition météorologique historique.

*Cinq années sèches, moyennes et humides ont été sélectionnées sur la base des précipitations totales de la saison de croissance (mai à septembre).

La signification statistique entre les régimes d'irrigation et les conditions météorologiques obtenue à partir de l'ANOVA est présentée dans le tableau 11. Pour les simulations historiques sur les fraises, le traitement d'irrigation a eu un effet significatif sur les besoins nets en irrigation, tous les traitements étant significativement différents les uns des autres. L'I_{net} différait également de manière significative entre les saisons de croissance sèches, moyennes et humides. Indépendamment du traitement d'irrigation, il n'y a pas eu d'effet significatif sur la biomasse totale ou sur le WP_{ET}, sauf en conditions pluviales. L'effet d'interaction n'était pas significatif. En particulier dans des conditions sèches, le traitement d'irrigation par 50 % de MAD peut aider les producteurs de baies de la région à optimiser l'utilisation de l'eau d'irrigation.

Tableau 11. Analyse statistique des simulations historiques de la fraise. Effet des différents traitements d'irrigation et des conditions météorologiques historiques sur les besoins nets en irrigation, le rendement sec et la productivité de l'eau ET des cultures de la fraise. Les différences entre les moyennes sont indiquées dans les colonnes avec des lettres différentes ($p < 0,05$).

Traitement d'irrigation	I net (mm)	Y sec (ton/ha)	PLE_{ET} (kg/m ³)
MAD de 20%AW	328 a	14.5 a	1.92 a
MAD de 35%AW	287 b	14.5 a	1.96 a
MAD de 50%AW	249 c	14.5 a	2.01 a
Pluie seulement	0 d	6.3 b	0.78 b
Météo historique			
Sèche	244 a	11.7	1.56
Moyenne	214 b	11.8	1.59
Humide	190 c	13.8	1.86
Signification			
Traitement d'irrigation	*<.0001	*<.0001	*<.0001
Météo historique	*<.0001	ns	ns
Intéraction	ns	ns	ns

*: significatif; ns: non-significatif. Différences significatives entre les moyennes ($p < 0,05$), indiquées par des lettres différentes dans les colonnes.

5.2.4. Simulation des besoins historiques d'irrigation des canneberges

Les résultats de la simulation historique pour le modèle de la canneberge sont présentés dans le tableau 12. L' I_{net} simulé diminue avec l'augmentation des seuils d'épuisement de l'eau disponible dans le sol. De plus grandes quantités d'irrigation sont nécessaires au cours des années sèches pour compenser le manque de précipitations. La biomasse hors-sol totale et la productivité de l'eau sont consistantes entre tous les traitements d'irrigation et toutes les saisons de croissance, sauf en l'absence d'irrigation. Il convient de noter que pour la simulation, la profondeur variable de la nappe phréatique calibrée sur les conditions de terrain de la tourbière à canneberges a été omise afin de caractériser les besoins en eau des cultures satisfaits à la fois par la sous-irrigation et l'irrigation par aspersion, étant donné qu'elles représentent la même ressource en eau dans la zone d'étude.

Tableau 12. Résultats de la simulation historique pour la canneberge. Simulation des besoins nets en irrigation, du rendement sec et de la productivité de l'eau ET de la canneberge pour différents traitements d'irrigation et des conditions météorologiques historiques. Les moyennes sur 5 ans des données météorologiques de la saison de croissance et les résultats des simulations sont présentés.

Météo historique 5 ans*	Traitement de l'irrigation Retour à la CC	Saison de croissance (mai-sept)			Résultats simulés		
		Précip (mm)	ETo (mm)	Temp (°C)	I net (mm)	B (ton/ha)	PLE _{ET} (kg/m ³)
Sèche	MAD de 20%AW	339	582	17.8	203	12.4	2.16
	MAD de 35%AW	339	582	17.8	176	12.3	2.16
	MAD de 50%AW	339	582	17.8	161	12.3	2.16
	Pluie seulement	339	582	17.8	0	7.6	1.69
Moyenne	MAD of 20%AW	500	586	18.4	183	12.3	2.14
	MAD of 35%AW	500	586	18.4	154	12.2	2.14
	MAD of 50%AW	500	586	18.4	133	12.2	2.15
	Pluie seulement	500	586	18.4	0	10.0	2.13
Humide	MAD of 20%AW	582	547	17.6	147	12.5	2.33
	MAD of 35%AW	582	547	17.6	131	12.5	2.34
	MAD of 50%AW	582	547	17.6	93	12.5	2.34
	Pluie seulement	582	547	17.6	0	11.2	2.37

Chaque valeur représente une moyenne de cinq années, soit une condition météorologique historique.

*Cinq années sèches, moyennes et humides ont été sélectionnées sur la base des précipitations totales de la saison de croissance (mai à septembre).

L'analyse statistique résumée dans le tableau 13 révèle que pour les canneberges, les besoins en irrigation étaient significativement différents entre tous les traitements d'irrigation et toutes les conditions de la saison de croissance. Les conditions météorologiques historiques ont également influencé la biomasse totale de la culture, qui différait significativement dans chaque cas. Il n'y a pas eu d'effet significatif sur le WP_{ET}, sauf en conditions pluviales.

Tableau 13. Analyse statistique des simulations historiques de la canneberge. Effet des différents traitements d'irrigation et des conditions météorologiques historiques sur les besoins nets en irrigation, le rendement sec et la productivité de l'eau ET des cultures de la canneberge. Les différences entre les moyennes sont indiquées dans les colonnes avec des lettres différentes ($p < 0,05$).

Traitement d'irrigation	I net (mm)	Y sec (ton/ha)	PLE _{ET} (kg/m ³)
MAD de 20%AW	177 a	12.4 a	2.21 a
MAD de 35%AW	154 b	12.4 a	2.21 a
MAD de 50%AW	129 c	12.4 a	2.22 a
Pluie seulement	0 d	9.6 b	2.06 b
Météo historique			
Sèche	135 a	11.2 a	2.04 a
Moyenne	117 b	11.7 b	2.14 a
Humide	93 c	12.2 c	2.34 b
Signification			
Traitement d'irrigation	*<.0001	*<.0001	*0.0347
Météo historique	*<.0001	*0.0002	*<.0001
Intéraction	ns	*<.0001	*0.0054

*: significatif; ns: non-significatif. Différences significatives entre les moyennes ($p < 0,05$), indiquées par des lettres différentes dans les colonnes.

En résumé, l'analyse statistique des simulations historiques a révélé que les conditions météorologiques historiques (saison de croissance humide, moyenne ou sèche) et le traitement d'irrigation (épuisement de 20 %, 35 % ou 50 % de l'eau disponible) avaient un effet significatif sur le besoin net d'irrigation. Les résultats ont mis en évidence le potentiel d'économie d'eau de l'irrigation avec un épuisement maximal autorisé de 50 % de l'eau disponible, en particulier dans les années sèches où la demande en eau des cultures était significativement plus élevée. Pour toutes les principales cultures de la zone d'étude, les simulations historiques d'AquaCrop ont montré qu'un épuisement de 50 % de l'eau disponible réduisait considérablement les besoins nets d'irrigation et augmentait la productivité de l'eau, sans réduire de manière significative la production végétale. De plus, la gestion de l'eau d'irrigation devrait être axée sur les besoins historiques des années sèches, qui étaient nettement plus importants que ceux des années historiquement humides.

5.3 Impact du changement climatique sur les besoins en irrigation

Ensuite, les modèles ont été utilisés pour prédire l'impact du changement climatique sur les besoins d'irrigation dans un avenir proche (années 2050) et lointain (années 2080), par rapport à la base historique (1997-2021). Chaque modèle AquaCrop a été exécuté pour un ensemble de cinq GCM sous le scénario SSP5-8.5. Les fichiers climatiques ont été définis pour chaque GCM et comprenaient les données climatiques statistiquement downscalées décrites dans la section 4.1.2. Tous les autres paramètres sont restés cohérents avec les simulations historiques. Les trois

traitements d'irrigation ont été étudiés, correspondant à une MAD de 20 %, 35 % et 50 % de l'AW. Un échantillon des résultats de simulation pour le modèle d'ensemble CMIP6 dans le cadre du scénario SSP5-8.5 pour toutes les années est disponible en annexe. Les moyennes sur 30 ans ont été calculées pour chaque période (référence, années 2050 et années 2080), modèle (dans l'ensemble), culture (pomme de terre, courge, fraise et canneberge) et traitement d'irrigation (20 %, 30 % et 50 % de la MAD de l'AW). La médiane et la fourchette des besoins nets en irrigation qui en résultent sont présentées dans les figures 17, 18, 19, and Figure 20, respectivement pour la pomme de terre, la courge, la fraise et la canneberge. L'objectif était d'estimer l' I_{net} moyen pour des périodes climatiques proches et lointaines et de le mettre en relation avec la base historique. L'effet du traitement d'irrigation et du climat sur l' I_{net} a été étudié à l'aide d'une analyse statistique.

Dans la Figure 17, les résultats de la simulation moyenne sur 30 ans, représentés par le résultat médian du modèle avec des barres noires indiquant la fourchette, mettent en évidence une augmentation significative des besoins d'irrigation des pommes de terre d'ici la période projetée des années 2080 par rapport à la référence historique, dans le cadre du scénario d'émissions élevé sélectionné. Ces résultats confirment les conclusions précédentes simulées avec le modèle AquaCrop, évalué pour les besoins futurs d'irrigation à travers différents scénarios climatiques. Par exemple, Busschaert et al. (2022) ont indiqué une augmentation potentielle des besoins nets en irrigation de 30 % dans un avenir lointain (2071-2100) dans le cadre d'un scénario à fortes émissions (SSP3-7.0), ce qui a un impact particulier sur l'agriculture en Europe centrale et méridionale.

De plus, les résultats ont montré une augmentation de la production de tubercules. Cela correspond aux résultats d'études mondiales sur la modélisation des cultures de pommes de terre dans le contexte du changement climatique, comme celles de Jennings et al. (2020), qui suggèrent une augmentation des rendements avec des adaptations. En simulant avec AquaCrop, Govere et al. (2022) ont constaté un effet bénéfique du changement climatique sur le rendement du blé et l'utilisation de l'eau au Zimbabwe dans le cadre des RCP4.5 et RCP8.5 pour les projections des années 2040 et 2080. Ils ont attribué l'augmentation simulée des rendements et la diminution de l'utilisation de l'eau par les cultures aux effets de la fertilisation par le CO₂, qui ont eu un effet dominant sur les températures plus élevées projetées. Toutefois, une étude de modélisation spécifique sur la production de pommes de terre dans l'Île-du-Prince-Édouard (Adekanmbi et al., 2023) a démontré une diminution potentielle du rendement due au changement climatique sans adaptation des pratiques agricoles actuelles. Une étude récente sur l'impact du changement climatique sur les cultures de pommes de terre bien irriguées et bien fertilisées dans l'ensemble des États-Unis dans le cadre du scénario RCP 8.5 d'émissions élevées a indiqué que si l'augmentation des températures réduira probablement les rendements des pommes de terre, elle sera en grande partie compensée par l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère (Zhao et al., 2022). Les rendements peuvent également être améliorés dans la plupart des régions en plantant les pommes de terre plus tôt afin d'éviter les étés chauds. Malgré des températures plus élevées, l'utilisation de l'eau par les cultures de pommes de terre devrait diminuer en raison d'une saison de croissance plus courte et d'une plus grande efficacité de l'utilisation de l'eau sous l'effet du CO₂ atmosphérique élevé (Zhao

et al., 2022). Contrairement aux résultats du projet RADEAU (Charron et al., 2019), les simulations de cette étude prévoient un cycle de culture plus court grâce à la possibilité d'exécuter le modèle au format des degrés-jours de croissance.

Notamment, l'analyse statistique démontre que le traitement d'irrigation joue un rôle significatif dans l'influence du besoin net d'irrigation, avec une MAD fixée à 50% de l'AW montrant une réduction considérable. Dans l'ensemble, les résultats de l'ANOVA soulignent l'impact substantiel du traitement de l'irrigation et du climat sur les besoins nets en irrigation, indiquant une augmentation attendue dans le cadre du scénario de modèle climatique sélectionné, atténuée par le traitement MAD 50%AW. En résumé, les résultats de la simulation sont conformes à l'augmentation prévue de la demande en eau due aux effets météorologiques, contrebalancée par le potentiel d'augmentation du rendement des cultures attribué à une concentration plus élevée de CO₂.

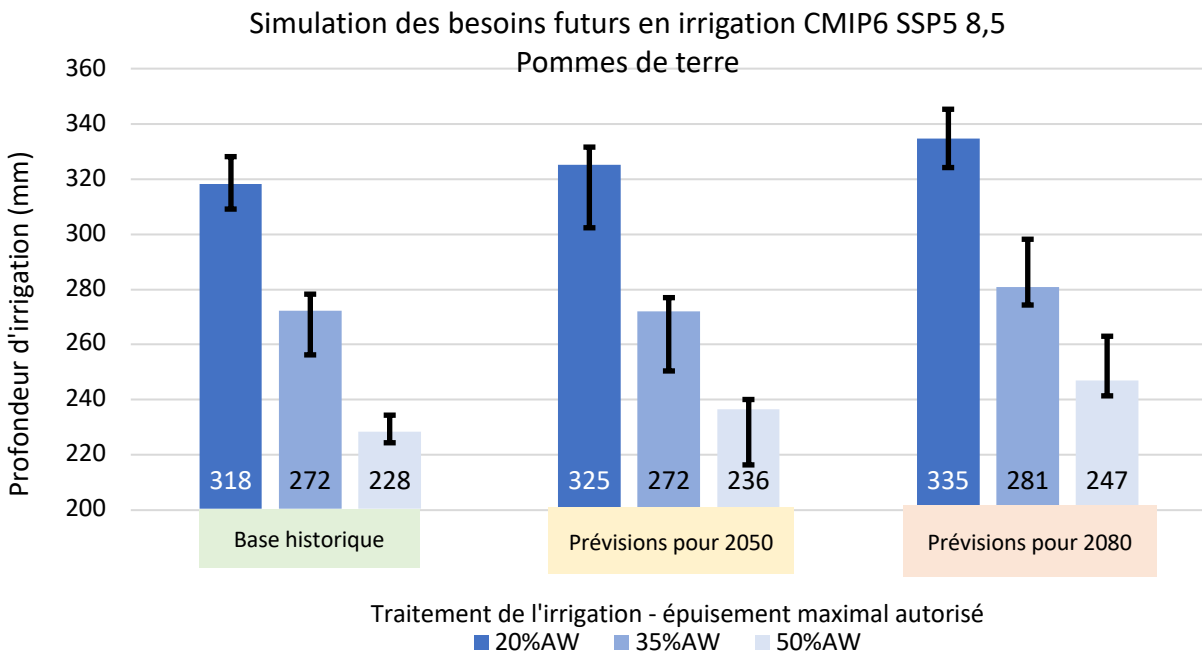


Figure 17. Médiane et fourchette des besoins d'irrigation projetés dans le cadre de CMIP6 SSP5-8.5 pour la pomme de terre.

Pour le modèle de la courge, les simulations futures ont révélé des besoins d'irrigation nets stables, ainsi que des rendements plus faibles dans les années 2050 et 2080, dans le cadre du scénario d'émissions élevées. Ces résultats peuvent être attribués à la réduction observée du cycle de croissance de la culture, associée aux changements des conditions climatiques. Alors que les valeurs par défaut des paramètres conservateurs d'AquaCrop (Hsiao, 2012 ; Raes et al., 2009) pour le fichier des cultures de pommes de terre sont présumées applicables à un large éventail de conditions, les paramètres conservateurs pour le modèle de courge, tels que les seuils de température supérieurs et inférieurs pour la croissance des feuilles, ont été obtenus à partir du fichier général des légumes par défaut. Les recherches et la paramétrisation futures du modèle

pourront permettre d'étudier plus en détail l'effet du changement climatique sur le cycle de culture de la courge d'hiver. Dans le cadre de cette étude, le modèle est une représentation simplifiée des légumes irrigués dans la zone d'étude de Lanoraie et présente l'effet possible d'un futur à fortes émissions sur la production de légumes.

Conformément aux simulations sur les pommes de terre, le test F a indiqué un effet significatif du traitement d'irrigation sur les besoins nets d'irrigation pour les courges. Le niveau d'épuisement maximal de 50 % de l'AW réduit de manière significative les besoins nets d'irrigation dans toutes les périodes climatiques, soulignant le rôle du régime d'irrigation choisi par le producteur sur l'utilisation de l'eau d'irrigation.

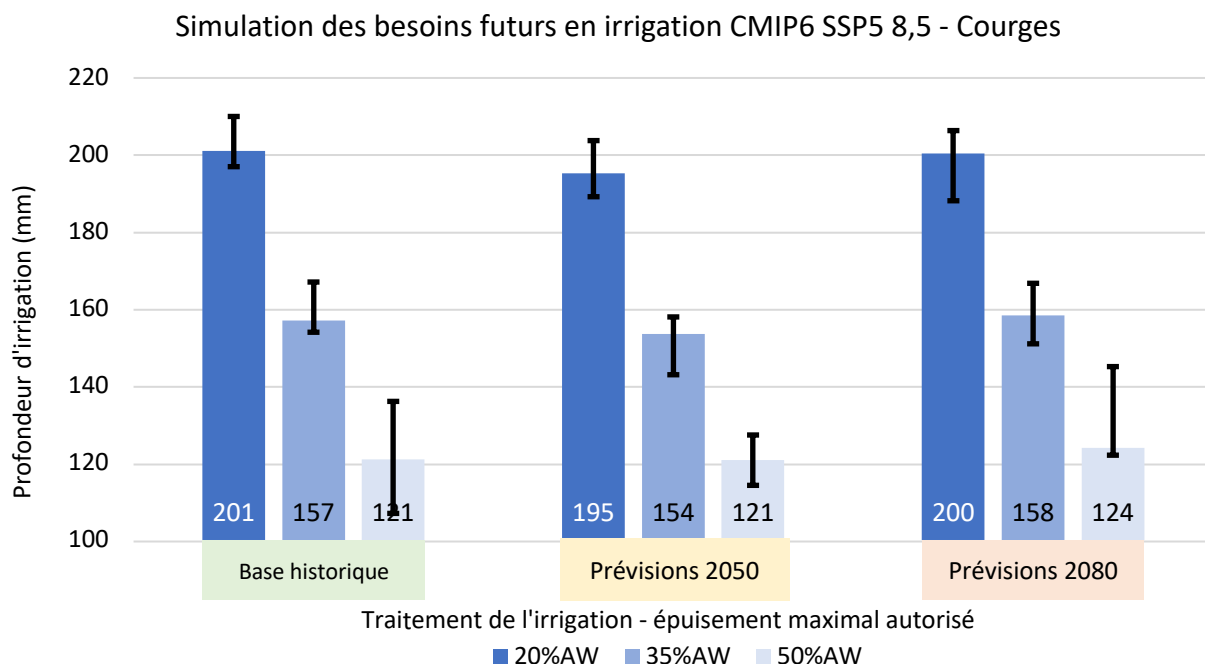


Figure 18. Médiane et fourchette des besoins d'irrigation projetés dans le cadre de CMIP6 SSP5-8.5 pour la courge.

Dans les simulations futures pour les cultures de fraises, on observe une diminution des besoins nets en irrigation (Figure 19), potentiellement associée au raccourcissement du cycle de culture simulé. Des tendances similaires ont été observées dans les simulations pour les canneberges, illustrées dans la Figure 20. Bien que cela corresponde aux résultats d'autres études de modélisation des cultures, indiquant une réduction potentielle de la durée du cycle des cultures en raison du changement climatique, il est recommandé d'obtenir des données et une calibration du modèle supplémentaires pour valider cet effet. Par ailleurs, cela offre la possibilité d'adapter les cultivars au changement climatique en étudiant les différentes dates de plantation et les tolérances à la chaleur des cultures. En simulant les impacts du changement climatique sur le blé d'hiver et le maïs en Iran, Khordadi et al. (2019) ont constaté que la variation de la date de semis pour optimiser le rendement, ainsi que la sélection des cultivars en fonction de divers GDD prévus pourraient

constituer des stratégies d'adaptation efficaces pour répondre aux besoins agricoles face à un climat changeant. En ce qui concerne la culture des baies dans les régions tempérées, Dale (2009) souligne qu'en raison de la variabilité accrue du climat, les cultivars devront résister aux fluctuations des conditions météorologiques hivernales et à l'augmentation du stress thermique, être capables de croître avec peu de froid et d'initier la formation de bourgeons dans diverses conditions environnementales. Pour relever ces défis, les sélectionneurs de cultures devraient se concentrer sur le développement de cultivars pérennes résistants à l'hiver et adaptables à divers environnements et systèmes de culture, ce qui nécessite une collaboration entre les sélectionneurs et les physiologistes des cultures pour concevoir des systèmes de sélection efficaces. (Dale, 2009). Ces initiatives de recherche collaborative sont présentes au Québec. Par exemple, le cultivar de fraise AAC-Généreuse, sélectionné par le Dr Khanizadeh à Agriculture et Agroalimentaire Canada au Québec, a été testé commercialement à Lavaltrie et a affiché un rendement élevé et une rusticité supérieure à celle d'autres variétés de mi-saison. De plus, sélectionnée à l'origine pour l'agriculture floridienne, Florida-Brilliance s'est révélée être une variété de mi-saison et de fin de saison très performante entre 2019 et 2021 dans le cadre du Réseau canadien d'essais sur les baies dirigé par Crawford et al. (2022). La poursuite de ces efforts sera cruciale face à l'évolution du climat.

L'ANOVA a montré que l'impact substantiel du traitement d'irrigation sur l'irrigation nette persiste dans les simulations projetées pour les fraises et les canneberges. Cela souligne l'impact de la gestion de l'irrigation indépendamment de la culture en cours.

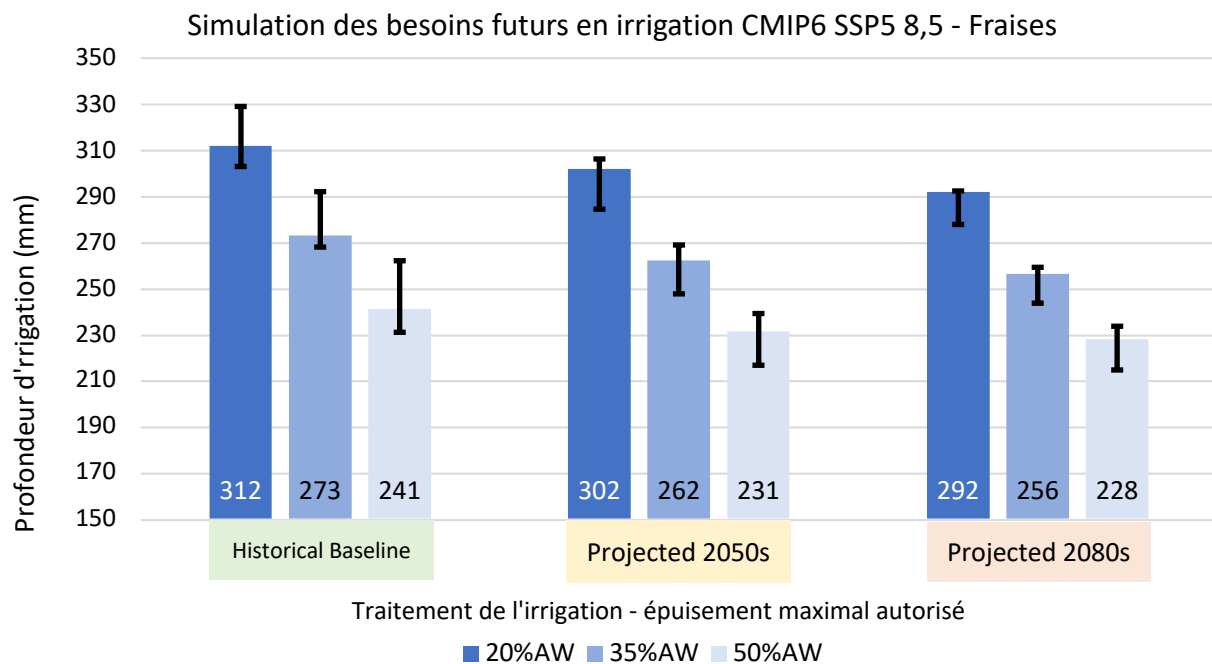


Figure 19. Médiane et fourchette des besoins d'irrigation projetés dans le cadre de CMIP6 SSP5-8.5 pour la fraise.

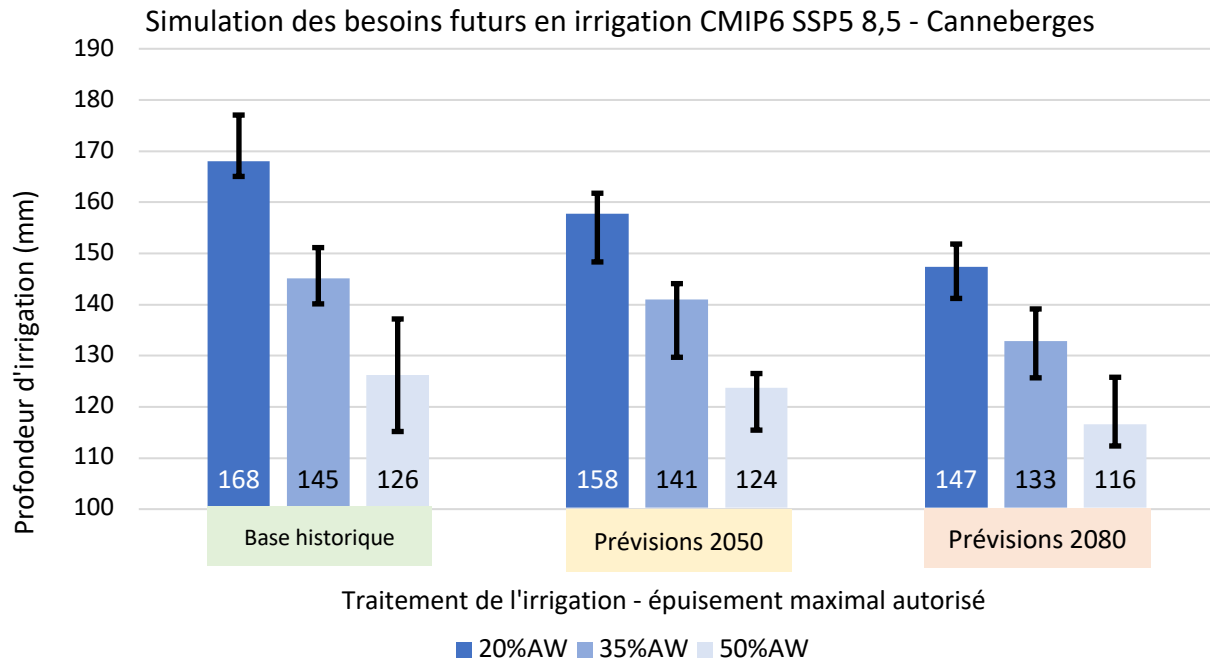


Figure 20. Médiane et fourchette des besoins d'irrigation projetés dans le cadre de CMIP6 SSP5-8.5 pour la canneberge.

En résumé, l'effet climatique du scénario CMIP-6 à fortes émissions (SSP5-8.5) a été étudié pour les principales cultures de la zone d'étude à l'aide de quatre modèles AquaCrop calibrés sur les conditions locales de terrain. Les simulations ont montré que les besoins en irrigation pour la pomme de terre augmenteront de manière significative dans les années 2080 par rapport à la période historique. Les besoins d'irrigation prévus pour les autres cultures sont restés relativement stables, avec une diminution possible des besoins d'irrigation prévus pour les cultures de baies. Toutefois, il est suggéré de poursuivre l'étalonnage du modèle afin d'étudier l'effet du changement climatique sur le raccourcissement des cycles de croissance des cultures. Les recherches futures pourraient explorer l'optimisation des variétés de cultures et des dates de plantation afin d'adapter la région agricole au changement climatique, comme l'ont montré d'autres études (par exemple Khordadi et al., 2019 ; Sharma et al., 2021). Pour toutes les cultures, le traitement de l'irrigation a eu un impact significatif sur les besoins nets en irrigation. Un traitement d'irrigation de MAD 50 % AW peut réduire considérablement les besoins d'irrigation futurs.

D'autres recommandations portent sur l'intégration de trajectoires socio-économiques supplémentaires. En étudiant l'impact du changement climatique sur le maïs en Afrique subsaharienne, Dale et al. (2017) ont constaté des tendances spatiales robustes de pertes de rendement dans les ensembles utilisés, qui correspondent à des schémas spatiaux d'augmentation de l'aridité. Ils ont constaté que la distribution spatiale de l'incertitude dans les projections de rendement est principalement influencée par la variabilité interne, un contributeur important à l'incertitude à la fois dans les ensembles intra-modèles et inter-modèles, soulignant l'importance des stratégies de gestion des risques adaptatives et robustes face aux incertitudes du changement

climatique. En outre, le modèle AquaCrop, évalué pour les besoins futurs en irrigation dans le cadre de différents scénarios climatiques, a indiqué une augmentation potentielle des besoins nets en irrigation de 30 % dans un avenir lointain (2071-2100) dans le cadre d'un scénario à fortes émissions (SSP3-7.0), ayant un impact particulier sur l'Europe centrale et méridionale (Busschaert et al., 2022). Cependant, un scénario de forte atténuation (SSP1-2.6) suggère une stabilisation de l'augmentation de l'Inet à environ 13 mm par mois d'ici la fin du siècle, accompagnée d'une augmentation plus faible de la variabilité interannuelle. Ces résultats mettent en évidence des disparités importantes dans les projections de l'Inet entre les différents GCM. Par conséquent, les études futures devraient explorer une gamme plus complète de trajectoires socio-économiques.

6. Conception du système d'approvisionnement en eau d'irrigation

Finalement, les besoins en eau ont été extrapolés à partir des estimations de terrain à l'échelle régionale. Pour synthétiser les besoins en irrigation de la zone d'étude, les profondeurs brutes d'irrigation ont été extrapolées sur les terres cultivées irriguées et cartographiées en secteurs d'approvisionnement en eau pour aider à proposer un système d'approvisionnement en irrigation.

À ce stade initial du projet, l'accent a été mis principalement sur l'évaluation des besoins en eau historiques et futurs des principales cultures irriguées de la région, sur l'extrapolation de ces besoins à la zone d'étude et sur la réalisation d'une évaluation préliminaire d'un système potentiel de canalisations d'irrigation. Toutefois, la conception technique d'une canalisation d'irrigation nécessite l'accès à des informations détaillées concernant le tracé exact de la canalisation, des relevés topographiques, des analyses de sol et toute autre donnée pertinente qui faciliterait une évaluation précise et un processus de conception dans le cadre d'une étude d'ingénierie approfondie. L'exécution d'une telle conception nécessite une compréhension globale de plusieurs facteurs clés, y compris, mais sans s'y limiter, une analyse topographique approfondie, des données détaillées sur les pentes, une évaluation du sol et des eaux souterraines, la sélection des matériaux, l'évaluation du système de pompage et le calcul de la demande de puissance, ainsi que l'évaluation de la qualité de l'eau et de l'impact sur l'environnement.

6.1 Cartographie des besoins régionaux en eau d'irrigation

Tout d'abord, les besoins mensuels moyens en irrigation ont été calculés à partir des résultats de la simulation pour les cinq années sèches historiques dans le cadre de la stratégie d'irrigation 50%MAD recommandée. En plus des événements d'irrigation simulés, les besoins en eau pour la protection contre le gel et la chaleur ont été pris en compte pour les cultures de fraises et de canneberges, ainsi que l'eau utilisée pour l'inondation de la récolte de canneberges. Les producteurs de fraises et de canneberges de la région étudiée utilisent leurs systèmes d'irrigation pour la protection contre le gel au printemps. Par conséquent, en analysant les données météorologiques horaires au cours des cinq saisons de croissance les plus sèches, une profondeur d'eau a été supposée pour les événements de protection contre le gel en fonction des valeurs seuils respectives pour chaque culture. L'activation de l'irrigation par aspersion pendant quelques minutes lorsqu'un seuil de température critique maximale est atteint est une pratique culturelle courante pour refroidir les plants de canneberges et prévenir les pertes de rendement dues à la surchauffe. Par conséquent, l'irrigation par aspersion pour le refroidissement par évaporation des cultures de canneberges pendant les journées très chaudes a été envisagée. De plus, l'efficacité d'application des principaux systèmes d'irrigation utilisés a été appliquée en consultant des ressources en ingénierie d'irrigation, ainsi qu'un fournisseur principal de systèmes d'irrigation dans la zone d'étude.

Les profondeurs brutes des besoins en irrigation ont été extrapolées sur les terres cultivées irriguées de la zone d'étude pour chaque mois de la saison de croissance. Pour les années sèches historiques, les volumes régionaux d'eau requis pour les principales cultures irriguées pendant la saison de croissance étaient les plus importants pendant les mois de juillet et d'août. Cette période de plus forte demande en eau d'irrigation coïncide avec les débits minimaux de quatre cours d'eau

tributaires du complexe tourbeux de Lanoraie évalués par l'IRDA : le Point-du-Jour, le Saint-Jean, le Saint-Joseph et le Bras-du-Sud-Ouest (Ricard et al., 2023). En considérant également les restrictions de débit imposées par les municipalités, il est évident que ces cours d'eau ne représentent pas une source durable d'eau d'irrigation durant les mois de juillet et août, surtout lors des années sèches. De plus, les recherches menées par l'équipe de l'UQAM suggèrent que les étangs d'irrigation excavés pourraient intercepter l'eau qui, autrement, rechargerait les terres humides (Chéné et Larocque, 2023). Ainsi, pour répondre à la demande en eau d'irrigation sans compromettre l'hydrologie des milieux humides, une conduite d'irrigation est explorée.

6.2 Demande en eau des secteurs d'irrigation

En guise d'évaluation préliminaire des scénarios potentiels d'approvisionnement en eau, les dimensions possibles des conduites sont proposées pour cinq secteurs d'irrigation dans la zone d'étude. La figure 21 présente les limites des secteurs d'irrigation déterminés par les responsables du projet et met en évidence les terres cultivées irriguées qui ont été incluses dans l'estimation régionale des besoins en irrigation. Il est important de noter que l'analyse a été réalisée à partir de données géographiques fournies pour une année de rotations de cultures et représente une estimation des terres cultivées irriguées. Les exigences en matière de débit du système ont été conçues en fonction de l'utilisation maximale de l'eau. La demande volumétrique maximale en eau a été déterminée dans chacun des cinq secteurs d'irrigation de la région, apparaissant au mois de juillet. À partir des événements d'irrigation simulés pour les principales cultures, cette demande de pointe a été supposée répartie sur 15 jours d'irrigation. Les débits potentiels ont été étudiés pour 12, 15 et 18 heures de pompage par jour pour chaque secteur. Les débits maximaux, si l'eau est pompée 12 heures par jour pendant 15 jours, pour chaque secteur sont indiqués dans le tableau 14.

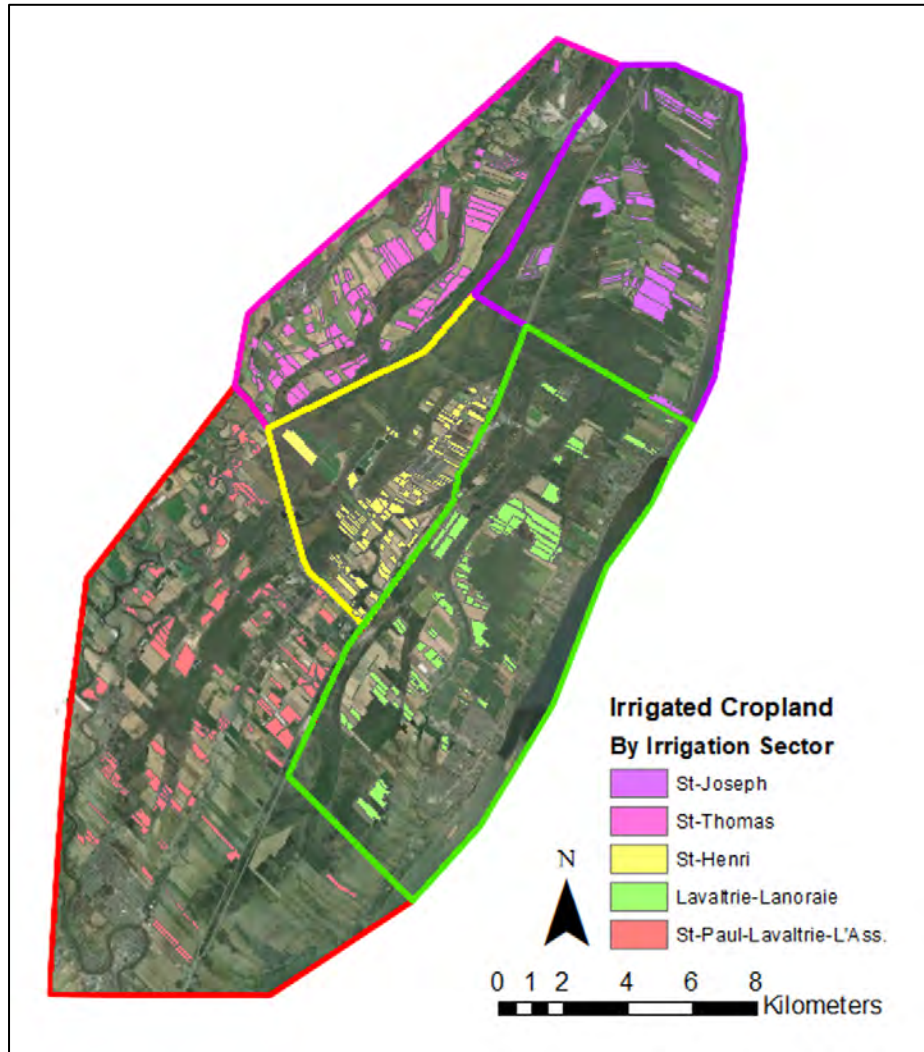


Figure 21. Terres cultivées irriguées prises en compte dans l'estimation régionale des besoins en irrigation pour les secteurs d'irrigation proposés.

Tableau 14. Débit maximal de la pipeline pour chaque secteur d'irrigation au cours du mois de la demande volumétrique maximale en eau. Hypothèse de 15 jours d'irrigation avec 12 heures de pompage par jour.

Secteur d'irrigation	Superficie irriguée (ha)	Pic de demande Vol (m ³)	Débit maximal Q (m ³ /s)
St-Joseph	565	485927	0.75
St-Thomas	830	832044	1.28
St-Henri	487	454566	0.70
Lavaltrie-Lanoraie	691	664524	1.03
St-Paul-Lavaltrie-L'Ass.	942	903875	1.39

Lorsque l'eau circule dans un système d'irrigation, les pertes de pression, ou par friction, sont affectées par des facteurs tels que la vitesse d'écoulement, le diamètre de la conduite et la rugosité de la conduite. L'estimation des pertes par friction est une partie importante de l'analyse de l'écoulement des tuyaux et de la sélection de la taille des tuyaux pour des applications spécifiques. De nombreuses relations empiriques ont été développées pour décrire la chute de pression dans un écoulement hydraulique due à la résistance au frottement, telles que l'équation de Manning, l'équation de Darcy-Weisbach et la formule de Hazen-Williams (Satterfield, 2010 ; USDA, 2021).

Les diamètres des conduites ont été calculés à partir du débit volumétrique pour répondre à la demande maximale de chaque secteur d'irrigation, en utilisant l'équation de Manning et l'équation de Hazen-Williams, et sont présentés dans les sections 6.3 et 6.4, respectivement, tout en tenant compte de la durée du pompage, du matériau de la conduite et de la pente de la conduite. Une fois la pression dans les tuyaux à différents endroits, l'équation de Bernoulli peut être adaptée à la situation.

6.3 Diamètre de pipeline dérivé de Manning

En utilisant le débit volumétrique et l'équation de Manning, qui est également utilisé pour l'écoulement des conduites sous pression, les diamètres des conduites ont été calculés pour un système d'approvisionnement en eau. Une série de situations ont été envisagées, en tenant compte de la durée du pompage, du matériau de la conduite et de la pente de la conduite. Les hypothèses sont résumées dans le tableau 15. Les matériaux de canalisation étudiés étaient le chlorure de polyvinyle (PVC), le polyéthylène haute densité (HDPE) et l'acier. Les pentes variaient de 0,2 % à 0,8 %. Ces pentes potentielles ont été sélectionnées sur la base d'observations topographiques dans la zone d'étude et représentent une gamme possible de pentes. Pour préciser, les diamètres des tuyaux sont calculés pour l'aval des sites de pompage.

Tableau 15. Liste des hypothèses étudiées pour les calculs de l'équation de Manning pour les pipelines.

Durées de pompage (heures/jour)	Matériaux des tuyaux et Coefficients de rugosité	Gradients hydrauliques (m/m)
12	PVC (n = 0.009)	0.008
15	HDPE (n = 0.009)	0.006
18	Acier (n = 0.012)	0.004
		0.002

Les diamètres des conduites en PVC et en acier peuvent être observés dans les figures 22 et 23, sous différents gradients hydrauliques. En supposant 15 heures de pompage sur 12 jours d'irrigation pour une conduite en PVC avec une pente de 0,4 %, les diamètres potentiels seraient de 67 cm, 82 cm, 65 cm, 75 cm et 84 cm pour les secteurs d'irrigation de St-Joseph, St-Thomas,

St-Henri, Lavaltrie-Lanoraie et St-Paul-Lavaltrie-L'Assomption. La pente exacte de la canalisation dépendra des relevés effectués dans le cadre d'une étude future sur les tracés possibles de pipelines.

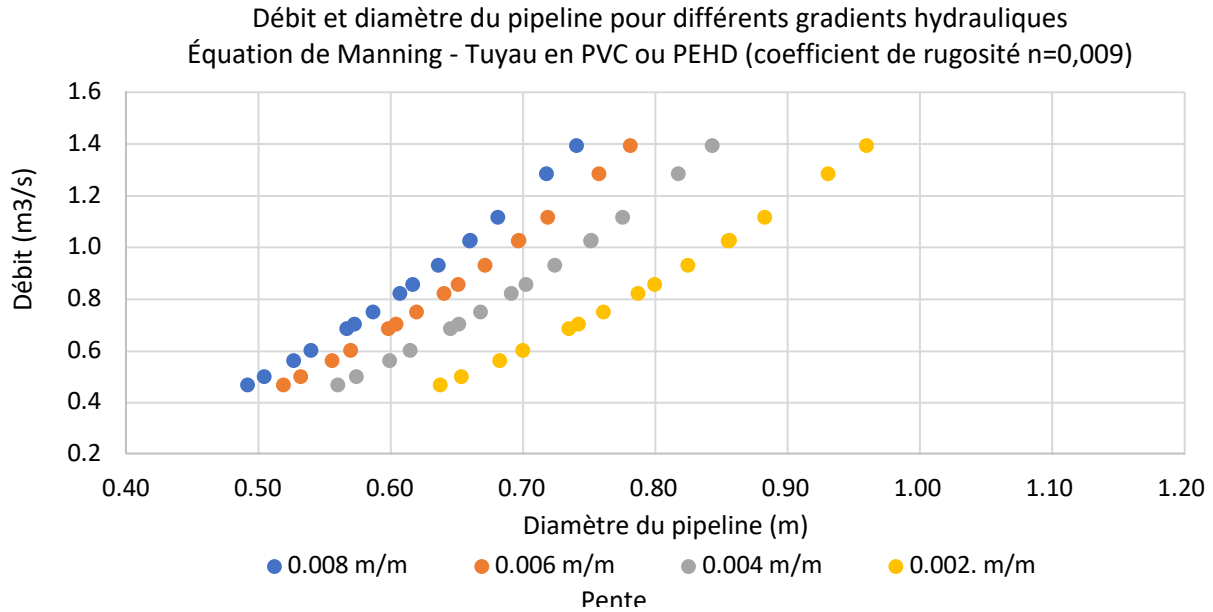


Figure 22. Débit et diamètre d'une conduite en PVC (ou PEHD) pour différents gradients hydrauliques en cas de pic de demande, d'après l'équation de Manning.

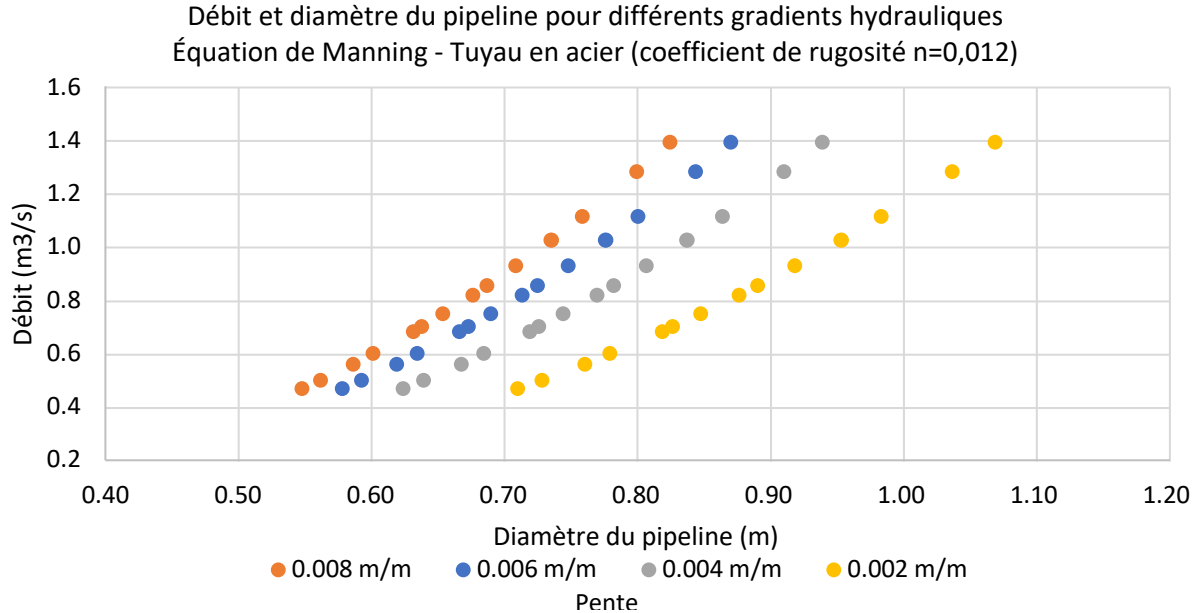


Figure 23. Débit et diamètre d'une conduite en acier pour différents gradients hydrauliques en cas de pic de demande, d'après l'équation de Manning.

6.4 Diamètre du pipeline calculé par Hazen-Williams

De même, le débit volumétrique et l'équation de Hazen-Williams ont également été utilisés pour calculer le diamètre du pipeline à partir du débit volumétrique, tout en tenant compte de la durée du pompage, du matériau du tuyau et de la pente du tuyau. Les hypothèses prises en compte dans les calculs sont résumées dans le tableau 16.

Tableau 16. Liste des hypothèses étudiées pour les calculs de l'équation de Hazen-Williams pour les pipelines.

Durées de pompage (heures/jour)	Matériaux des tuyaux et Coefficients de rugosité	Gradients hydrauliques (m/m)
12	PVC (C = 150)	0.008
15	HDPE (C = 140)	0.006
18	Acier (C = 110)	0.004
		0.002

Les diamètres des conduites en PVC et en acier, calculés à l'aide de l'équation de Hazen-Williams, sont présentés dans les Figure 24 et Figure 25, en tenant compte de différents gradients hydrauliques. En utilisant le même exemple, pour une conduite en PVC avec une pente de 0,4 %, en supposant 15 heures de pompage sur 12 jours d'irrigation, les diamètres potentiels sont estimés à 67 cm, 83 cm, 66 cm, 76 cm et 85 cm pour les secteurs d'irrigation de St-Joseph, St-Thomas, St-Henri, Lavaltrie-Lanoraie et St-Paul-Lavaltrie-L'Assomption. Les équations de Manning et de Hazen-Williams ont permis d'obtenir des diamètres de canalisations avec une différence négligeable allant de 0 à 3 %. Cette analyse empirique fournit une première estimation des dimensions des conduites nécessaires pour répondre à la demande d'irrigation des secteurs proposés pendant les périodes de pointe des années historiquement sèches. Théoriquement, l'eau d'irrigation provenant des étangs et des cours d'eaux diminuerait une partie du débit nécessaire. Une évaluation approfondie des volumes des étangs, des niveaux de débit des ruisseaux et des restrictions municipales est fondamentale pour cette caractérisation.

Une conception complète du système d'adduction devrait prendre en compte des facteurs clés tels que l'altitude, la distance, les installations de stockage, les systèmes de pompage et les besoins en énergie. Les phases futures du projet nécessiteront l'évaluation de la qualité de l'eau, le respect des réglementations environnementales et gouvernementales et la réalisation d'une analyse coûts-avantages pour le système d'approvisionnement en eau d'irrigation. De plus, l'engagement de la communauté jouera un rôle crucial dans le processus de planification du projet.

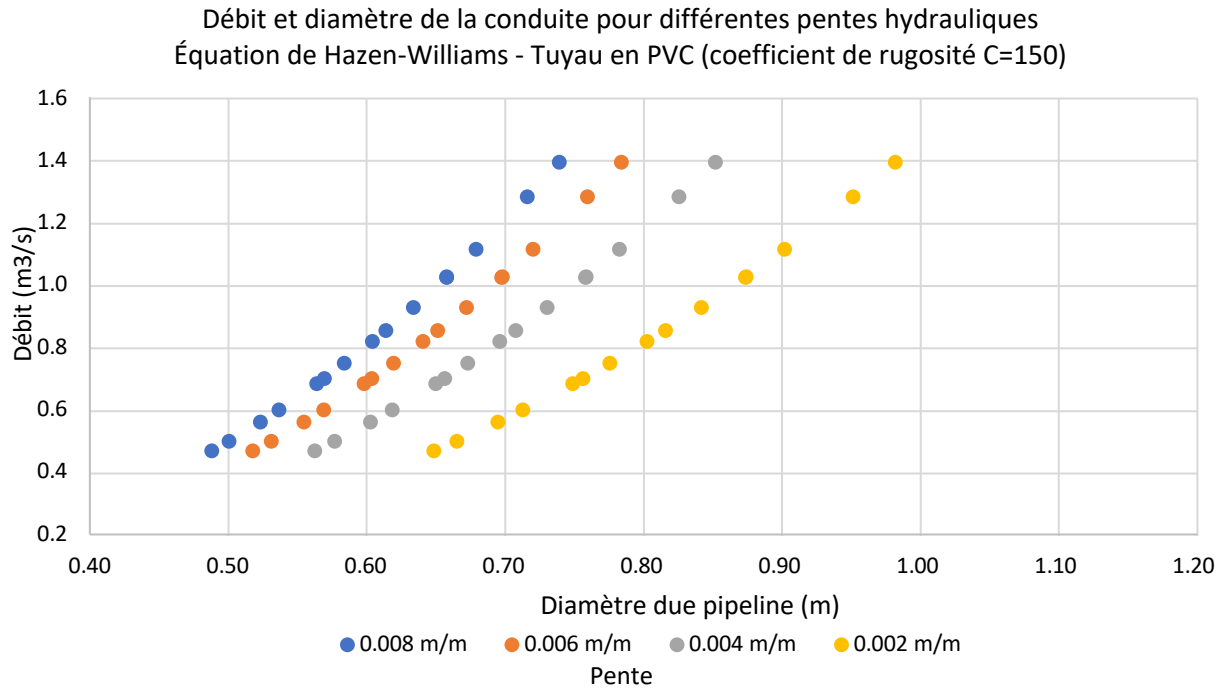


Figure 24. Débit et diamètre d'une conduite en PVC pour différents gradients hydrauliques en cas de pic de demande, d'après l'équation de Hazen-Williams.

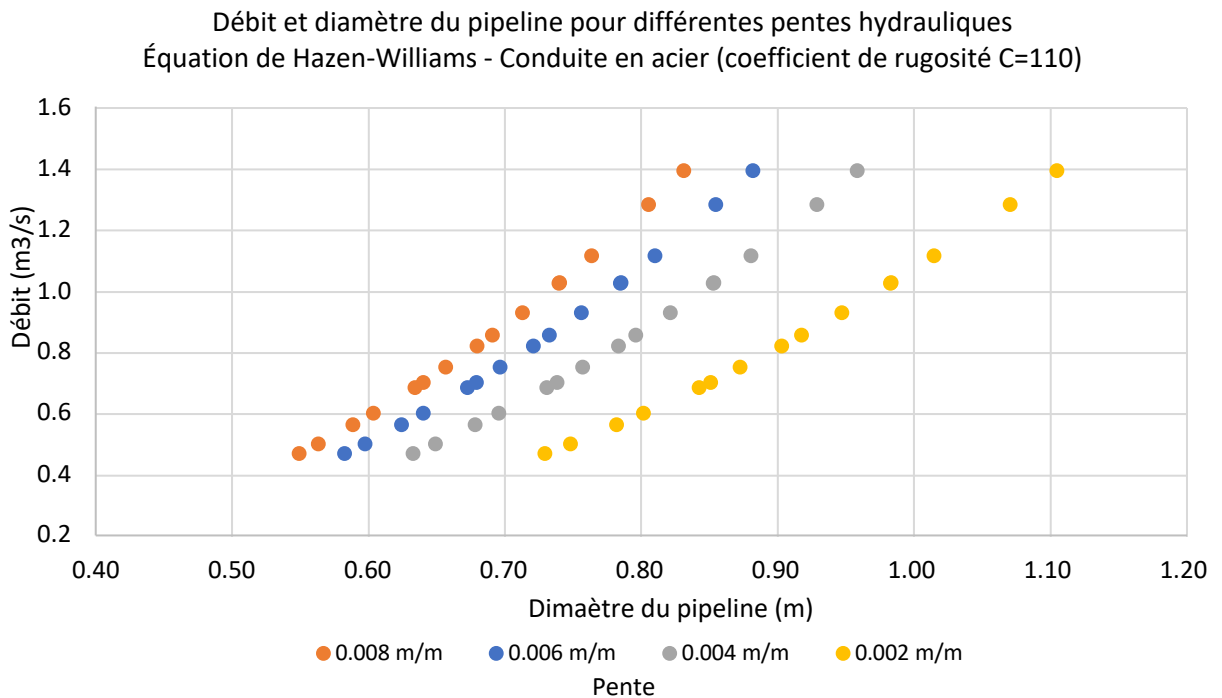


Figure 25. Débit et diamètre d'une conduite en acier pour différents gradients hydrauliques en cas de pic de demande, d'après l'équation de Hazen-Williams.

7. Conclusions and recommandations

7.1 Conclusion

Cette étude vise à évaluer les besoins actuels et futurs en eau d'irrigation pour le complexe agricole et humide de Lanoraie et à proposer un scénario d'approvisionnement en eau. Les données de terrain recueillies sur quatre sites représentatifs au cours de la saison de croissance 2022 ont été utilisées pour calibrer les modèles AquaCrop aux conditions locales, en affinant leur précision dans la simulation de l'humidité du sol. Par la suite, ces modèles affinés ont été utilisés pour estimer les besoins en irrigation pour les années historiques sèches, moyennes et humides. Les besoins futurs en irrigation ont été estimés en incorporant les données climatiques de l'ensemble de modèles CMIP-6, avec une réduction d'échelle statistique pour la zone d'étude, dans le cadre du scénario SSP5-8.5. Enfin, les quantités brutes d'irrigation pour les principales cultures irriguées dans les scénarios historiques de sécheresse ont été extrapolées à travers la zone d'étude. Cette extension a facilité l'identification des pics de demande d'eau, conduisant à une évaluation préliminaire d'un système d'adduction d'eau conçu pour cinq districts d'irrigation.

Sur la base des objectifs de l'étude, les conclusions suivantes ont été tirées :

- a) Dans l'ensemble, AquaCrop a simulé la teneur en eau du sol avec une précision satisfaisante et a servi d'outil utile pour estimer les besoins régionaux en irrigation. Les modèles de pommes de terre et de courges ont montré la plus grande concordance entre l'humidité du sol simulée et observée, par rapport aux modèles de canneberges et de fraises.
- b) La simulation de l'irrigation historique pour les cultures prédominantes dans la zone d'étude a mis en évidence que le traitement de l'irrigation utilisé par les producteurs influence de manière significative les besoins saisonniers nets pour chacune des principales cultures irriguées. Les conditions météorologiques dominantes de la saison de croissance ont également eu un impact significatif sur l'irrigation nette. L'utilisation d'une stratégie de gestion de l'irrigation avec un MAD fixé à 50 % de l'AW s'est avérée très efficace, réduisant de manière significative les besoins d'irrigation pour toutes les principales cultures. Cette approche s'est avérée particulièrement efficace au cours des années historiquement sèches, atténuant la demande d'eau considérablement accrue par rapport aux années humides.
- c) Dans le cadre du scénario SSP5-8,5 à fortes émissions, les besoins futurs en irrigation de chaque grande culture ont eu des réponses distinctes au changement climatique, mais l'impact significatif du traitement de l'irrigation a persisté pour toutes les cultures. Pour la pomme de terre, le climat futur et la stratégie d'irrigation ont tous deux joué un rôle important dans l'influence des besoins nets en irrigation, prévoyant une augmentation significative d'ici les années 2080. Toutefois, la mise en œuvre du traitement MAD 50%AW a permis d'atténuer cette augmentation. Les projections pour les autres cultures

principales suggèrent des besoins en eau saisonniers stables ou en baisse, potentiellement attribués à des cycles de croissance des cultures plus courts. Sur l'ensemble des périodes climatiques, le maintien d'un niveau d'épuisement maximal de 50 % de l'AW s'est imposé comme une pratique recommandée, réduisant systématiquement les besoins nets d'irrigation pour toutes les cultures. Cela souligne le rôle central du régime d'irrigation choisi par les producteurs pour influencer l'utilisation globale de l'eau d'irrigation.

- d) La cartographie des besoins d'irrigation simulés dans la région agricole de Lanoraie a révélé des demandes d'eau maximales au mois de juillet, coïncidant avec des périodes de faible débit des cours d'eau. Compte tenu de l'abaissement des niveaux d'eau du complexe de tourbières, un système de conduites d'irrigation a été étudié pour acheminer l'eau vers cinq secteurs d'irrigation désignés. Différents matériaux de tuyaux, gradients hydrauliques et durées de pompage ont été étudiés. Par exemple, en supposant 15 heures de pompage sur 12 jours d'irrigation pour un pipeline en PVC avec une pente de 0,4 %, des diamètres potentiels de 67 cm, 82 cm, 65 cm, 75 cm et 84 cm ont été identifiés pour fournir un débit de pointe aux secteurs d'irrigation de St-Joseph, St-Thomas, St-Henri, Lavaltrie-Lanoraie et St-Paul-Lavaltrie-L'Assomption.

7.2 Recommandations pour les recherches futures

Sur la base des résultats de cette étude, les recommandations suivantes sont formulées pour les recherches futures et les phases du projet SCELANEAU :

- a) Les efforts de recherche futurs pourraient bénéficier d'une période prolongée de collecte de données afin d'améliorer la calibration du modèle AquaCrop spécifique aux conditions locales de Lanoraie et de valider la performance du modèle. Cela implique le déploiement d'un plus grand nombre de sondes volumétriques d'humidité du sol avec un réseau stratégiquement distribué sur plusieurs champs. Une analyse approfondie du sol est conseillée pour déterminer avec précision les paramètres de rétention de l'eau dans le sol, y compris la capacité du champ, qui est un paramètre très sensible dans la simulation de la teneur en eau du sol. En outre, le suivi précis de la croissance des cultures et des variables de production, telles que l'indice de surface foliaire, la biomasse cumulée et les mesures de rendement final, est recommandé pour affiner l'étalonnage des paramètres des cultures et renforcer les prédictions du modèle.
- b) Une étude de terrain compréhensive examinant la réponse au stress hydrique des plantes des principales cultures irriguées à des régimes d'irrigation spécifiques permettrait d'améliorer la justification d'une stratégie de gestion de l'irrigation adaptée aux besoins individuels de chaque culture.

- c) La réalisation de simulations futures à l'aide de données sur le changement climatique modélisées selon d'autres scénarios socio-économiques partagés permettrait de mieux comprendre les effets potentiels du changement climatique sur les besoins nets en irrigation, compte tenu de la variabilité des projections climatiques. L'étude des seuils de température et des réactions au stress thermique de plusieurs variétés de cultures pourrait permettre d'explorer plus avant l'impact du changement climatique sur la durée des cycles de culture et contribuer à la sélection de cultivars mieux adaptés aux climats futurs.
- d) Les prochaines phases du projet devraient se concentrer sur la conception technique détaillée du système de conduites d'irrigation proposé. Cela implique une analyse topographique approfondie pour déterminer le tracé le plus efficace du réseau, l'évaluation des sols et des eaux souterraines, la sélection des matériaux, l'évaluation du système de pompage et le calcul des besoins en énergie. Des évaluations de la qualité de l'eau et de l'impact sur l'environnement seront nécessaires pour garantir la conformité avec les normes réglementaires et obtenir les permis nécessaires, tout en impliquant activement les communautés locales pour qu'elles apportent leur contribution et répondent à leurs préoccupations.
- e) Une analyse coûts-avantages complète, prenant en compte à la fois les coûts de construction initiale et les dépenses opérationnelles à long terme, aidera à déterminer la faisabilité et le financement du système d'approvisionnement en eau d'irrigation proposé.

8. Références

- Adekanmbi, T., Wang, X., Basheer, S., Nawaz, R. A., Pang, T., Hu, Y., & Liu, S. (2023). Assessing future climate change impacts on potato yields—A case study for Prince Edward Island, Canada. *Foods*, 12(6), 1176. <https://doi.org/10.3390/foods12061176>
- Agriculture and Agri-Food Canada. (2021). *Crop Profile for Strawberry in Canada* (A118-10/17-2019E-PDF; Pest Management Program). Agriculture and Agri-Food Canada. https://publications.gc.ca/collections/collection_2021/aac-aafc/A118-10-17-2019-eng.pdf
- Agriculture and Agri-Food Canada. (2023). *Canadian Food Inspection Agency—AAC Génèreuse*. Government of Canada. <https://inspection.canada.ca/english/plaveg/pbrpov/cropreport/str/app00009051e.shtml>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *FAO Irrigation and drainage paper 56*. [Methodology Reference]. Food and Agriculture Organization. <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>
- Amer, K. H. (2011). Effect of irrigation method and quantity on squash yield and quality. *Agricultural Water Management*, 98(8), 1197–1206. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.03.003>
- Arguez, A., & Vose, R. S. (2011). The Definition of the Standard WMO Climate Normal: The Key to Deriving Alternative Climate Normals. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(6), 699–704.
- Battilani, A., Letterio, T., & Chiari, G. (2014). *AquaCrop model calibration and validation for processing tomato crop in a sub-humid climate*. 167–174.
- Bigah, Y., Rousseau, A. N., & Gumiere, S. J. (2019). Development of a steady-state model to predict daily water table depth and root zone soil matric potential of a cranberry field with a subirrigation system. *Agricultural Water Management*, 213, 1016–1027. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.12.024>
- Boisvert, J., Dwyer, L., & Lemay, M. (1992). Estimation of Water Use By Four Potato (*Solanum tuberosum* L.) Cultivars for Irrigation Scheduling. *Canadian Agricultural Engineering*, 34(4), 319.
- Busschaert, L., de Roos, S., Thiery, W., Raes, D., & De Lannoy, G. J. M. (2022). Net irrigation requirement under different climate scenarios using AquaCrop over Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(14), 3731–3752. <https://doi.org/10.5194/hess-26-3731-2022>
- Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of gcm precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, 28(17), 6938–6959. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>
- Caron, J., Bonin, S., Pepin, S., Kummer, L., Vanderleest, C., & Bland, W. L. (2016). Determination of irrigation set points for cranberries from soil- and plant-based measurements. *Canadian Journal of Soil Science*, 96(1), 37–50. <https://doi.org/10.1139/cjss-2015-0037>
- Caron, J., Pelletier, V., Kennedy, C. D., Gallichand, J., Gumiere, S., Bonin, S., Bland, W. L., & Pepin, S. (2017). Guidelines of irrigation and drainage management strategies to enhance cranberry production and optimize water use in North America. *Canadian Journal of Soil Science*, 97(1), 82–91. <https://doi.org/10.1139/cjss-2016-0086>
- ClimateData.ca*. (2023). [dataset].
- Craig, D. L. (1976). *Strawberry culture in Eastern Canada*. Agriculture Canada. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.59427>
- Crawford, Jennifer, Amyotte, B., Gerbrandt, E., Lafontaine, P., & Znadstra, J. (2022). *The Canadian Berry Trial Network Update to Industry Report* (Canadian Agri-Science Cluster for Horticulture 3, p. 5).

- Dale, A. (2008). *How climate change could influence breeding and modern production systems in berry crops*. 161–168.
- Dale, A., Fant, C., Strzepek, K., Lickley, M., & Solomon, S. (2017). Climate model uncertainty in impact assessments for agriculture: A multi-ensemble case study on maize in sub-Saharan Africa. *Earth's Future*, 5(3), 337–353. <https://doi.org/10.1002/2017EF000539>
- Danielescu, S., MacQuarrie, K. T. B., Zebarth, B., Nyiraneza, J., Grimmett, M., & Levesque, M. (2022). Crop water deficit and supplemental irrigation requirements for potato production in a temperate humid region (Prince Edward Island, Canada). *Water*, 14(17), Article 17. <https://doi.org/10.3390/w14172748>
- Darouich, H., Karfoul, R., Eid, H., Ramos, T. B., Baddour, N., Moustafa, A., & Assaad, M. I. (2020). Modeling Zucchini squash irrigation requirements in the Syrian Akkar region using the FAO56 dual-Kc approach. *Agricultural Water Management*, 229, 105927. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105927>
- Djaman, K., Koudahe, K., Saibou, A., Darapuneni, M., Higgins, C., & Irmak, S. (2022). Soil water dynamics, effective rooting zone, and evapotranspiration of sprinkler irrigated potato in a sandy loam soil. *Agronomy*, 12(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040864>
- Dubé, P., & Rochette, P. (1985). *Les déficits hydriques*. 2, 27–114
- Elmi, A., Madramootoo, C., Handyside, P., & Dodds, G. (2010). Water requirements and subirrigation technology design criteria for cranberry production in Quebec, Canada. *CANADIAN BIOSYSTEMS ENGINEERING*, 52. <https://library.csbe-scgab.ca/docs/journal/52/C0906.pdf>
- Ells, J. E., McSay, A. E., Kruse, E. G., & Larson, G. (1994). Root distribution and proliferation of field-grown acorn squash as influenced by plastic mulch and water. *HortTechnology*, 4(3), 248–252. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.4.3.248>
- Environment and Climate Change Canada. (2022a). *Historical Data* [dataset]. Environment and Climate Change Canada. https://climate.weather.gc.ca/historical_data/search_historic_data_e.html
- Environment and Climate Change Canada. (2022b). *Historical Data* [dataset]. Environment and Climate Change Canada. https://climate.weather.gc.ca/historical_data/search_historic_data_e.html
- Environmental Systems Research Institute, Inc. (2022). *ArcGIS Desktop* (10.8) [Computer software]. Environmental Research Systems Institute.
- Farahani, H. J., Izzi, G., & Oweis, T. Y. (2009). Parameterization and Evaluation of the AquaCrop Model for Full and Deficit Irrigated Cotton. *Agronomy Journal*, 101(3), 469–476. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0182s>
- Food and Agriculture Organization. (2008). *International Year of the Potato 2008—New Light on a Hidden Treasure*.
- Govere, S., Nyamangara, J., & Nyakatawa, E. Z. (2022). Beneficial effect of climate change on wheat yield and water footprints in the Middle-Manyame sub-catchment, Zimbabwe. *Journal of Water and Climate Change*, 13(8), 2895–2910. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.038>
- Harnois Irrigation. (2021). *Irrigation Systems in Lanoraie* [Personal communication].
- Hattendorf, M. J., & Davenport, J. R. (1996). Cranberry Evapotranspiration. *HortScience*, 31(3), 334–337. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.31.3.334>
- Hess, M., Bill, M., Jason, S., & John, S. (1997). Oregon state University Western Oregon squash irrigation guide, vol. 541. *Department of Bioresource Engineering, Corvallis, OR*, 737–6304.

- IRDA. (2021). *Base de Données Hydropédologiques du Québec pour l'horizon de surface des sols agricoles du Québec* (Version 2) [dataset]. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement.
- IRDA. (2022). *Soil coverage of the province of Quebec*. (2nd digital version) [Complete coverage. Scale 1:20 000]. Produced by AAFC, MAPAQ and IRDA. Distributed by IRDA.
- Jennings, S. A., Koehler, A.-K., Nicklin, K. J., Deva, C., Sait, S. M., & Challinor, A. J. (2020). Global potato yields increase under climate change with adaptation and CO₂ fertilisation. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2020.519324>
- Jeranyama, P., DeMoranville, C. J., & Kennedy, C. D. (2017). Evaluating tensiometers and moisture sensors for cranberry irrigation. *Acta Horticulturae*, 1180, 369–372. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1180.50>
- Khordadi, M. J., Olesen, J. E., Alizadeh, A., Nassiri Mahallati, M., Ansari, H., & Sanaeinejad, H. (2019). climate change impacts and adaptation for crop management of winter wheat and maize in the semi-arid region of iran. *Irrigation and Drainage*, 68(5), 841–856. <https://doi.org/10.1002/ird.2373>
- King, B. A., Stark, J. C., & Neibling, H. (2020). *Potato irrigation management*. Springer.
- L'union des producteurs agricoles de Lanaudière. (2022). *Base de données des parcelles et productions agricoles déclarées* [dataset]. Produced by FADQ. Modified and distributed by UPA. <https://www.fadq.qc.ca/documents/donnees/base-de-donnees-des-parcelles-et-productions-agricoles-declarees/>
- Maughan, T., Drost, D., & Allen, L. N. (n.d.). *Vegetable Irrigation: Squash and Pumpkin*.
- Maurer, E. P., Hidalgo, H. G., Das, T., Dettinger, M. D., & Cayan, D. R. (2010). The utility of daily large-scale climate data in the assessment of climate change impacts on daily streamflow in California. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(6), 1125–1138. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1125-2010>
- Mirsafi, Z.-S., Sepaskhah, A. R., Ahmadi, S. H., & Kamgar-Haghighi, A. A. (2016). Assessment of AquaCrop model for simulating growth and yield of saffron (*Crocus sativus* L.). *Scientia Horticulturae*, 211, 343–351. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.09.020>
- Montoya, F., Camargo, D., Ortega, J. F., Córcoles, J. I., & Domínguez, A. (2016). Evaluation of Aquacrop model for a potato crop under different irrigation conditions. *Agricultural Water Management*, 164, 267–280. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.10.019>
- Morillo, J. G., Martín, M., Camacho, E., Díaz, J. A. R., & Montesinos, P. (2015). Toward precision irrigation for intensive strawberry cultivation. *Agricultural Water Management*, 151, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.09.021>
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3), 513–522.
- Nand, V., & Qi, Z. (2023). Potential of implementing irrigation in rainfed agriculture in Quebec: A review of climate change-induced challenges and adaptation strategies. *Irrigation and Drainage*, 72(4), 1165–1187. <https://doi.org/10.1002/ird.2840>
- National Aeronautics and Space Administration. (2022). *Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER) Project funded through the NASA Earth Science Program* (2.0.10) [dataset].
- OMAFRA. (2022). *Pumpkin and squash production | ontario.ca*. Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. <http://www.ontario.ca/page/pumpkin-and-squash-production>

- Opena, G. B., & Porter, G. A. (1999). Soil management and supplemental irrigation effects on potato: II. root growth. *Agronomy Journal*, *91*(3), 426–431. <https://doi.org/10.2134/agronj1999.00021962009100030011x>
- Ouranos. (2015). *Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec*. <https://www.ouranos.ca/sites/default/files/2022-12/proj-201419-synthese2015-rapportcomplet.pdf>
- Pan, T., Hou, S., Liu, Y., & Tan, Q. (2019). Comparison of three models fitting the soil water retention curves in a degraded alpine meadow region. *Scientific Reports*, *9*(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54449-8>
- Paredes, P., D'Agostino, D., Assif, M., Todorovic, M., & Pereira, L. S. (2018). Assessing potato transpiration, yield and water productivity under various water regimes and planting dates using the FAO dual Kc approach. *Agricultural Water Management*, *195*, 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.09.011>
- Pavlista, A. D. (1995). EC95-1249 potato production stages: Scheduling key practices. *Historical Materials from University of Nebraska-Lincoln Extension*, 1584.
- Pelletier, V., Gallichand, J., Caron, J., Jutras, S., & Marchand, S. (2015). Critical irrigation threshold and cranberry yield components. *Agricultural Water Management*, *148*, 106–112. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.09.025>
- Pelletier, V., Gallichand, J., Gumiere, S., Pepin, S., & Caron, J. (2015). Water table control for increasing yield and saving water in cranberry production. *Sustainability*, *7*(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/su70810602>
- Pereira, L. S., Paredes, P., Hunsaker, D. J., López-Urrea, R., & Mohammadi Shad, Z. (2021). Standard single and basal crop coefficients for field crops. Updates and advances to the FAO56 crop water requirements method. *Agricultural Water Management*, *243*, 106466. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106466>
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2009). AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: ii. main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, *101*(3), 438–447. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>
- Razzaghi, F., Zhou, Z., Andersen, M. N., & Plauborg, F. (2017). Simulation of potato yield in temperate condition by the AquaCrop model. *Agricultural Water Management*, *191*, 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.06.008>
- Sandler, H. A., & DeMoranville, C. J. (2008). *Cranberry Production Guide*.
- Satterfield, Z. (2010). Fundamentals of Hydraulics: Flow. In *Tech Brief—Fundamentals of Hydraulics* (1st ed., Vol. 10, p. 4). The National Environmental Services Center. https://wccw.ca/wp-content/uploads/2021/01/NESC-Tech-Brief_Fundamentals-of-Hydraulics-Flow.pdf
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal*, *70*(5), 1569–1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
- Sharma, A., Deepa, R., Sankar, S., Pryor, M., Stewart, B., Johnson, E., & Anandhi, A. (2021). Use of growing degree indicator for developing adaptive responses: A case study of cotton in Florida. *Ecological Indicators*, *124*, 107383. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107383>
- Shock, C. C., Pereira, A. B., & Eldredge, E. P. (2007). Irrigation best management practices for potato. *American Journal of Potato Research*, *84*(1), 29–37. <https://doi.org/10.1007/BF02986296>
- Singh, G. (1969). A review of the soil-moisture relationship in potatoes. *American Potato Journal*, *46*, 398–403.

- Stark, J. C., Thornton, M., & Nolte, P. (2020). *Potato Production Systems*. Springer Nature.
- Susha Lekshmi, S. U., Singh, D. N., & Shojaei Baghini, M. (2014). A critical review of soil moisture measurement. *Measurement*, *54*, 92–105. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.007>
- Terán-Chaves, C. A., García-Prats, A., & Polo-Murcia, S. M. (2022). Calibration and validation of the fao aquacrop water productivity model for perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Water*, *14*(23), Article 23. <https://doi.org/10.3390/w14233933>
- Tsakmakis, I. D., Kokkos, N. P., Gikas, G. D., Pisinaras, V., Hatzigiannakis, E., Arampatzis, G., & Sylaios, G. K. (2019). Evaluation of AquaCrop model simulations of cotton growth under deficit irrigation with an emphasis on root growth and water extraction patterns. *Agricultural Water Management*, *213*, 419–432. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.029>
- United States Department of Agriculture. (2021). Part 634 Hydraulics—Chapter 4 Pipe Flow. In *National Engineering Handbook* (1st ed.). United States Department of Agriculture.
- van Genuchten, M. Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, *44*(5), 892–898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Vanderleest, C. P. L., & Bland, W. L. (2017). Evapotranspiration from cranberry compared with the equilibrium rate. *Canadian Journal of Soil Science*, *97*(1), 5–10. <https://doi.org/10.1139/cjss-2015-0093>
- Vanderleest, C. P. L., Caron, J., & Bland, W. L. (2017). Water table level management as an irrigation strategy for cranberry (*Vaccinium macrocarpon* Aiton). *Canadian Journal of Soil Science*, *97*(1), 11–19. <https://doi.org/10.1139/cjss-2016-0001>
- Wang, H., Cheng, M., Liao, Z., Guo, J., Zhang, F., Fan, J., Feng, H., Yang, Q., Wu, L., & Wang, X. (2023). Performance evaluation of AquaCrop and DSSAT-SUBSTOR-Potato models in simulating potato growth, yield and water productivity under various drip fertigation regimes. *Agricultural Water Management*, *276*, 108076. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108076>
- Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *63*(11), 1309–1313. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2)
- Zhao, C., Stockle, C. O., Karimi, T., Nelson, R. L., Evert, F. K. van, Pronk, A. A., Riddle, A. A., Marshall, E., Raymundo, R., Li, Y., Guan, K., Gustafson, D., Hoogenboom, G., Wang, X., Cong, J., & Asseng, S. (2022). Potential benefits of climate change for potatoes in the United States. *Environmental Research Letters*, *17*(10), 104034. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac9242>

9. APPENDIX

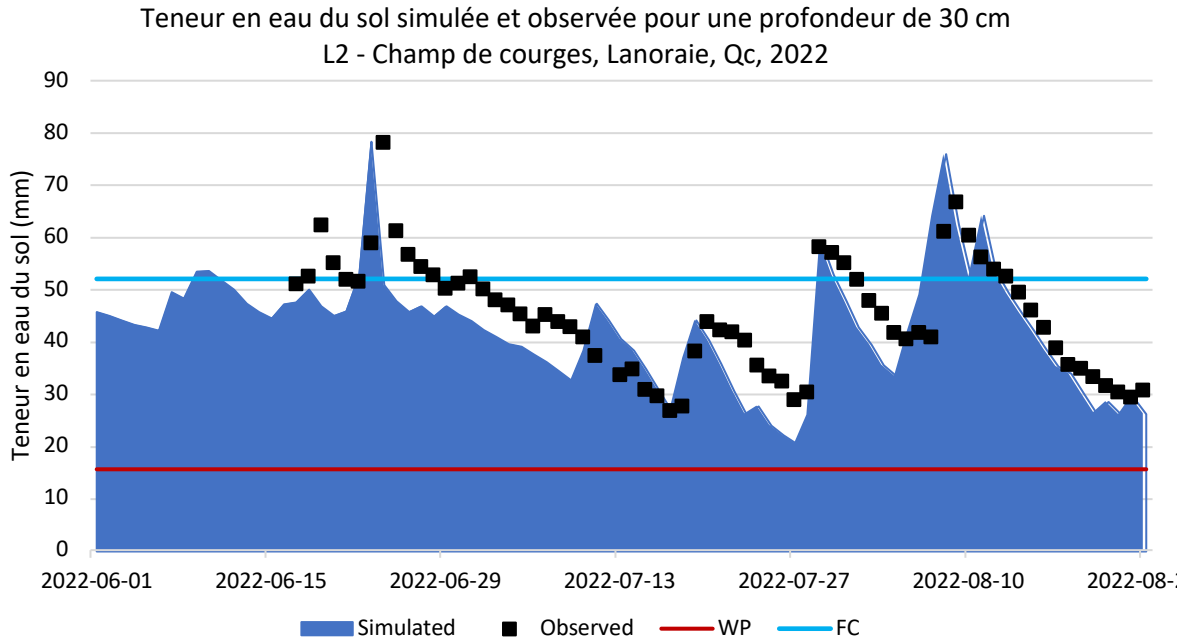


Figure A1. Teneur en eau du sol simulée et observée dans la zone racinaire de la courge (0-30 cm) à L2 au cours de la période de végétation 2022, y compris le point de flétrissement (WP) et la capacité au champ (FC).

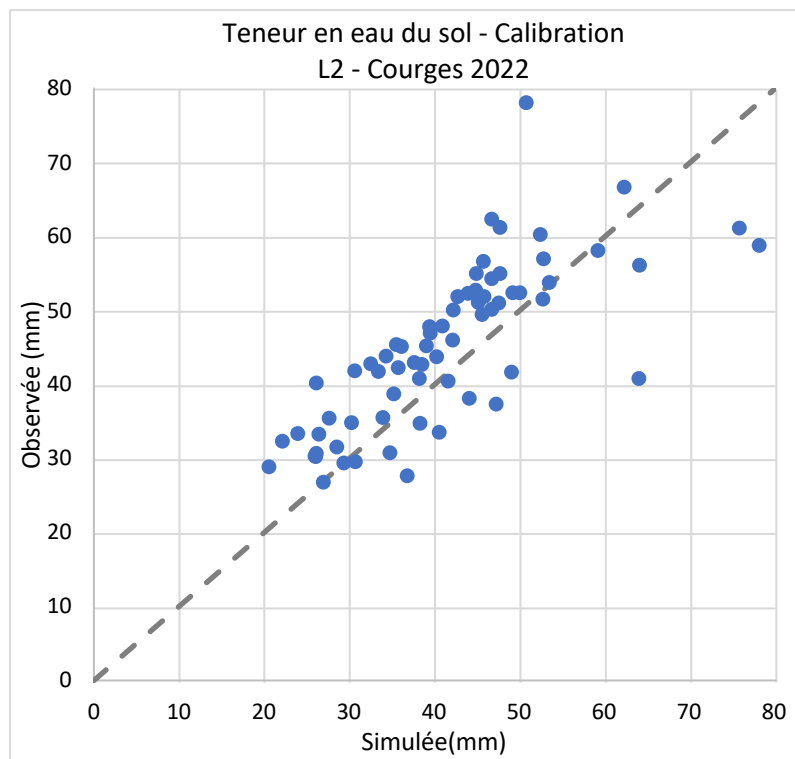


Figure A2. Teneur en eau du sol simulée et observée à une profondeur de 0 à 30 cm à L2

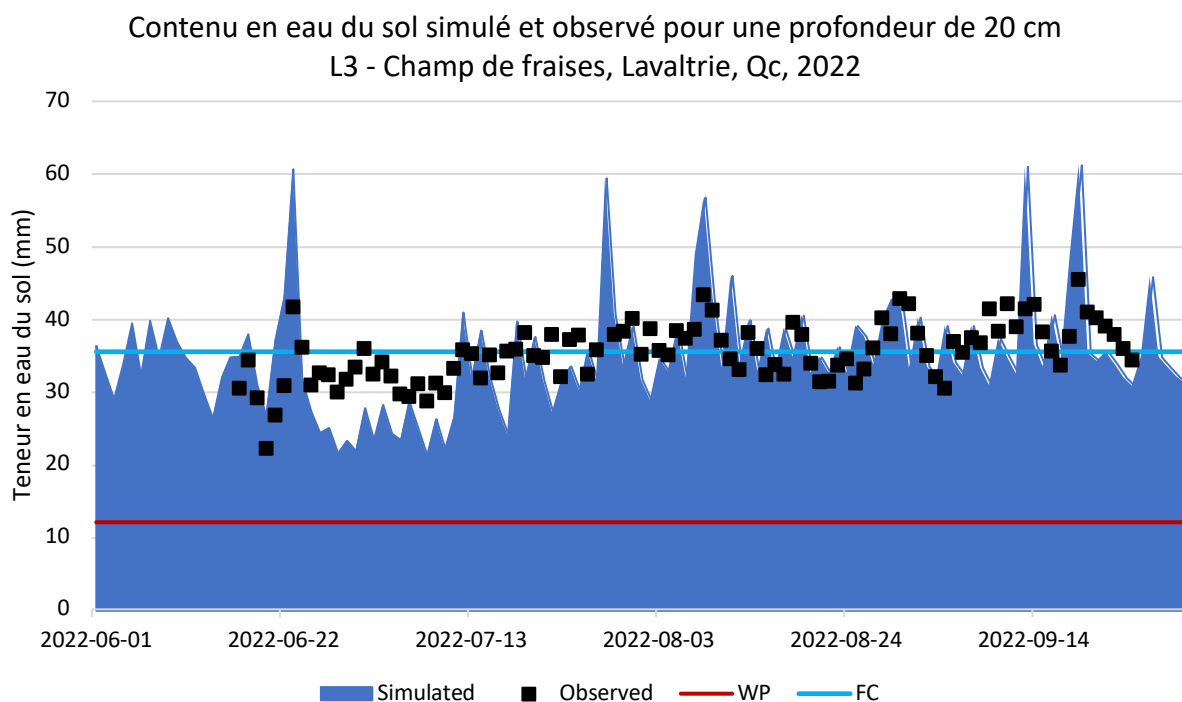


Figure A3. Teneur en eau du sol simulée et observée dans la zone racinaire du fraisier (0-20 cm) à L3 au cours de la saison de croissance 2022, y compris le point de flétrissement (WP) et la capacité au champ (FC).

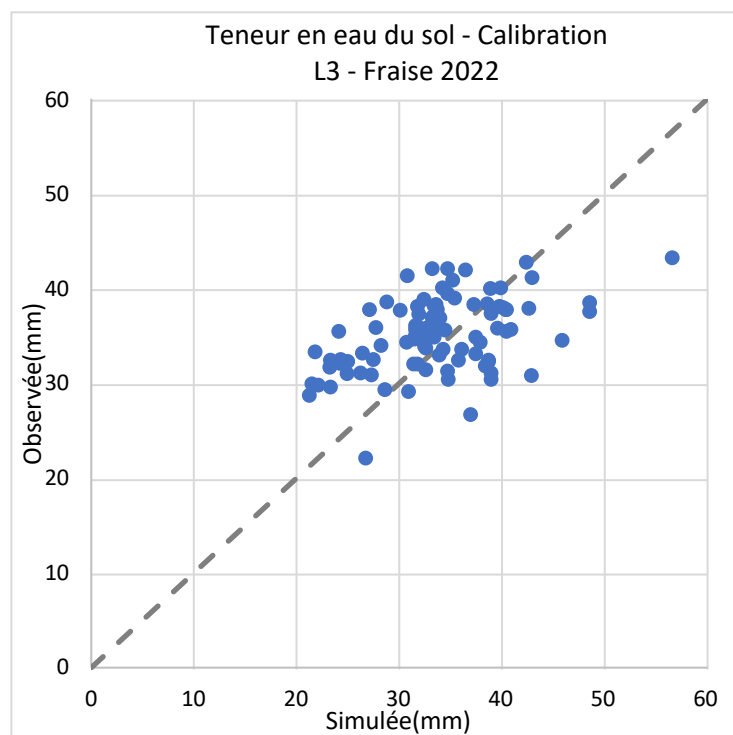


Figure A4. Teneur en eau du sol simulée et observée de 0 à 20 cm de profondeur à L3.

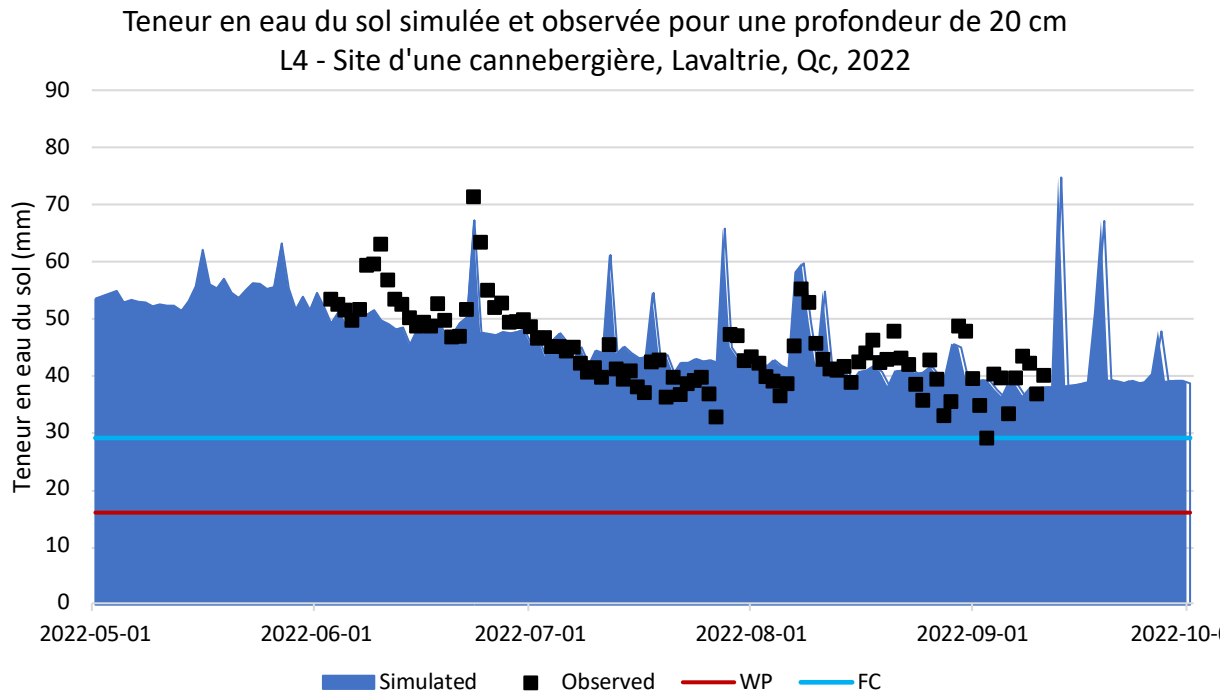


Figure A5. Teneur en eau du sol simulée et observée dans la zone racinaire de la courge (0-20 cm) à L4 au cours de la saison de croissance 2022, y compris le point de flétrissement (WP) et la capacité au champ (FC).

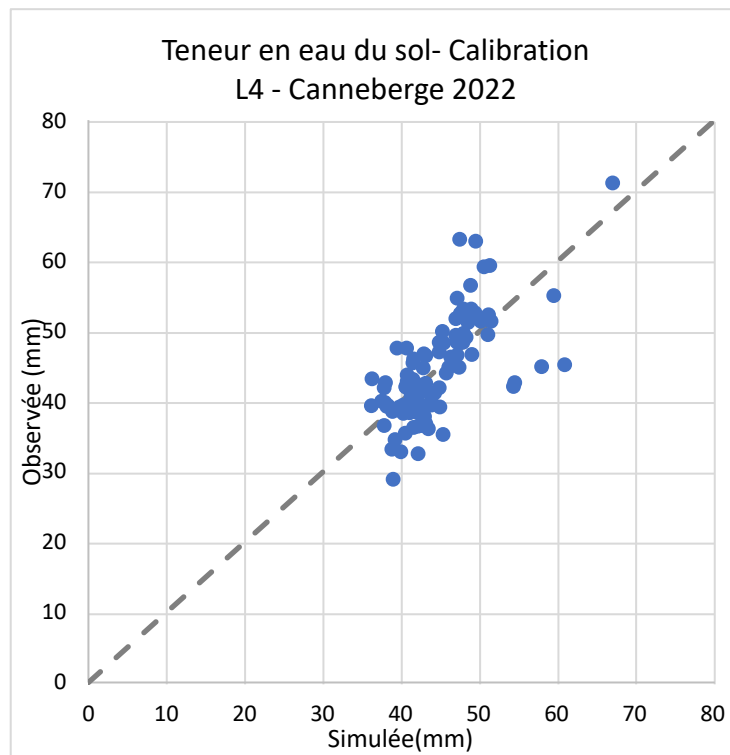


Figure A6. Teneur en eau du sol simulée et observée de 0 à 20 cm de profondeur à L4.

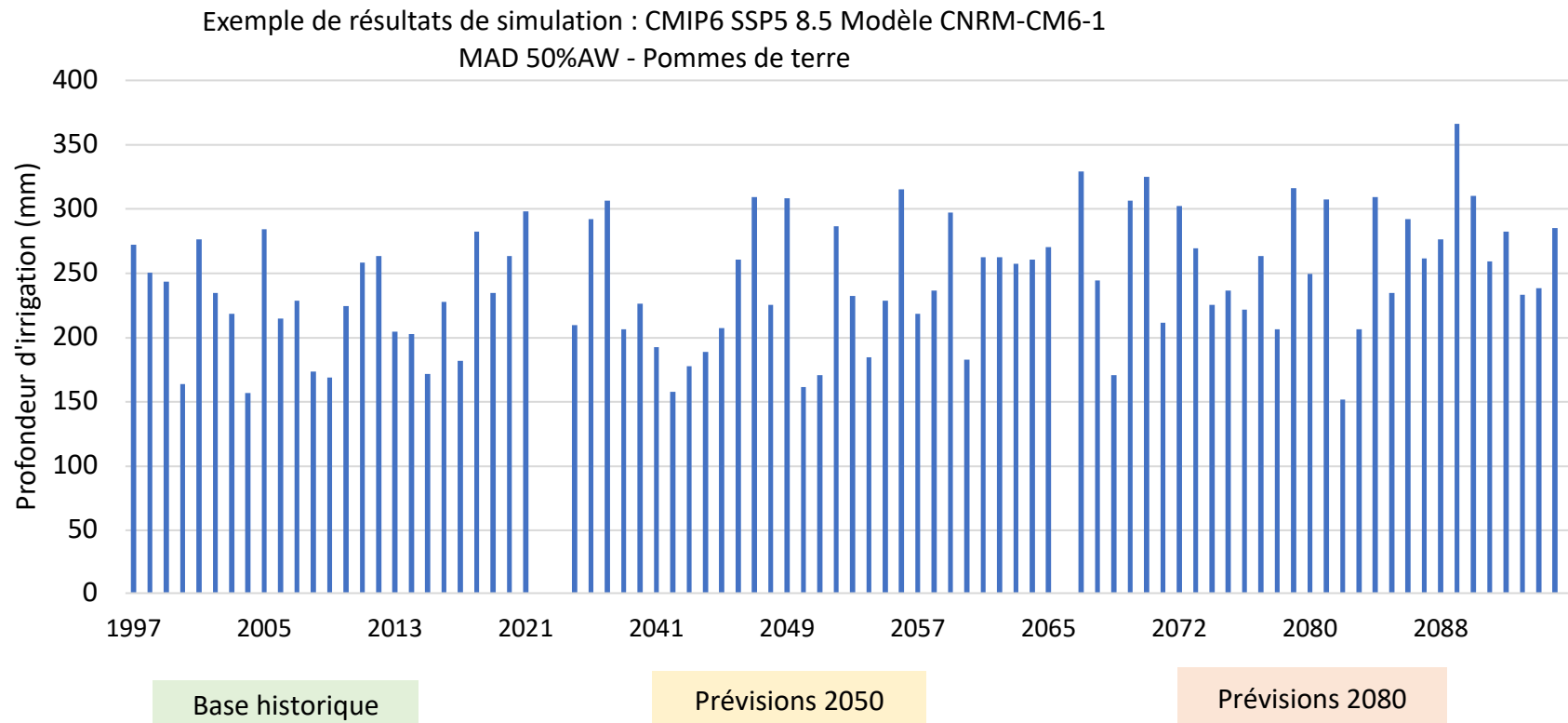


Figure A7. Simulation des besoins nets en irrigation du modèle CNRM-CM6-1 de l'ensemble pour la pomme de terre sous MAD fixé à 50% AW sous SSP5-8.5.

ANNEXE 4 - Rapport final de Sylvestre Delmotte

Projet Scelaneau

Analyse comparative des besoins et ressources en eau pour
l'irrigation dans le territoire du complexe tourbeux de Lanoraie

—

États des lieux et pistes de solutions pour un approvisionnement
durable

Sylvestre Delmotte, agr., PhD, consultant en agro-environnement

Avec le soutien de :

Dominic Brochu, agr., et Charles Bergeron, agr., Fédération Régional de l'UPA de Lanaudière

François Durand, ing., agr, GMA Lac-Saint-Jean

Mars 2024

1. Introduction

Au cours de la dernière décennie, les producteurs agricoles ont connu des étés particulièrement secs qui ont exacerbé les problématiques d'approvisionnement en eau dans le territoire : des débits d'étiage très faibles et des cours d'eau à secs ont entraîné des tensions entre producteurs agricoles, et entre producteurs agricoles et d'autres usagers du territoire. Ces épisodes ont contribué à jeter la lumière sur le territoire du complexe tourbeux de Lanoraie, un des territoires au Québec où la cohabitation entre l'agriculture et les espaces naturelles est probablement le plus visible et vécu au quotidien par les usagers.

Face à ces constats et aux interrogations croissantes des producteurs agricoles, des professionnels du secteur, d'autres acteurs locaux et des représentants du gouvernement du Québec, le projet Scelaneau, financé par le MAPAQ, visait à broser un portrait des prélèvements en eau réalisés dans le territoire, et des ressources en eau disponibles, pour établir un état des lieux précis des enjeux de gestion de l'eau. Des réflexions sur des solutions d'approvisionnement durable en eau ont été réalisées avec les producteurs agricoles du territoire et avec les professionnels, néanmoins confrontés à une situation complexe et à des incertitudes sur l'interprétation et l'application future de la réglementation sur les prélèvements en eau.

Ce rapport présente une analyse comparative des prélèvements actuels et des ressources en eau disponibles dans le territoire, suivant différentes interprétations possibles de ce que serait un usage durable des ressources en eau. La dernière partie de ce rapport présente un exemple de projet de réseau d'aqueduc qui pourrait voir le jour dans le futur pour détourner des prélèvements vers d'autres sources d'eau.

2. Comparaison des usages et ressources en eau par secteur

Le territoire a été subdivisé en cinq zones de cultures, séparées soit par des espaces naturels (secteur de tourbière ou boisés) ou des limites physiques d'origine anthropique (route ou autoroute). Les zones distinguées sont ainsi (figure 1) :

- Au nord-ouest, la zone St-Paul, Lavaltrie, L'Assomption, qui est en grande partie dans le bassin versant de la rivière Point du Jour, et plutôt en aval du complexe tourbeux de Lanoraie.
- Au nord-est, la zone St-Thomas, dont le cours d'eau qui prend sa source dans la tourbière se nomme le Bras du Sud-Ouest.
- Au centre, la zone St-Henri est principalement constitué d'un coteau sableux, et à l'ouest de ce territoire se situe la source de la rivière Point du Jour dans le complexe tourbeux.
- Au sud-ouest, la zone Lavaltrie-Lanoraie, traversée par la rivière St-Antoine, elle-même affluent de la rivière St-Jean, qui prend sa source également dans la tourbière, traverse le territoire et se jette dans le fleuve.
- Au sud-est, la zone St-Joseph, traversée par la rivière St-Joseph, qui prend également sa source dans le complexe Tourbeux et se jette au fleuve.

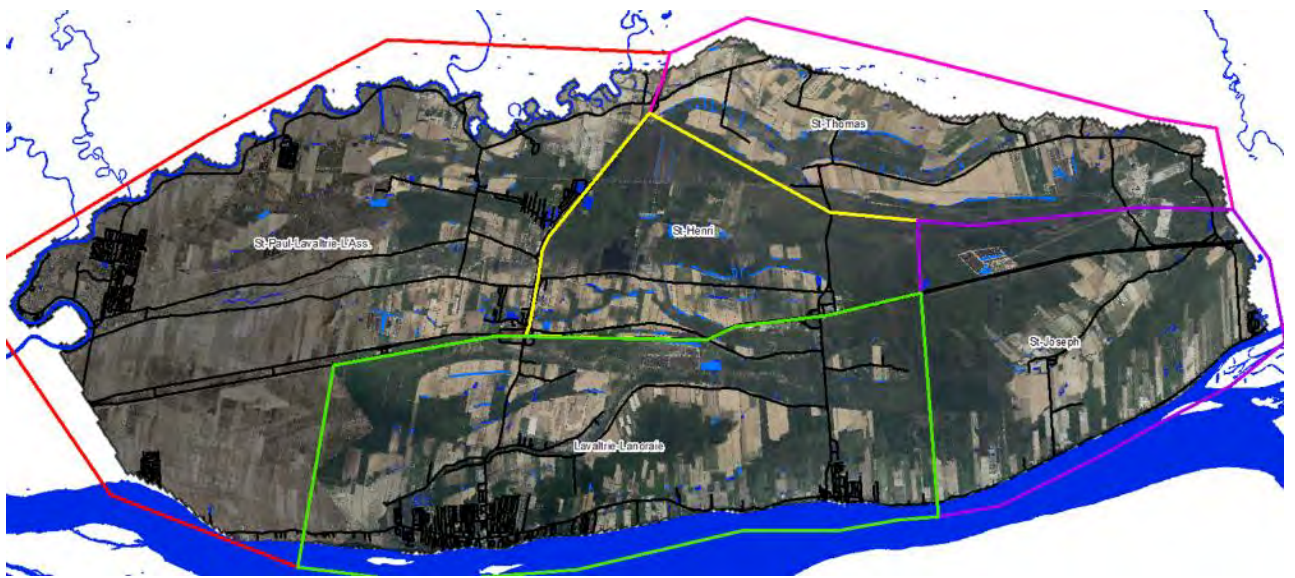


Figure 1 : Carte des différentes zones délimitées pour l'analyse au sein de la Tourbière de Lanoraie.

2.1 Prélèvements actuels et origine de l'eau utilisée

2.1.1 Zone St-Paul, Lavaltrie et L'Assomption

Cette zone couvre une superficie irriguée annuellement d'environ 430 ha selon les données de la FUPAL, sur environ 5000 ha cultivés¹. Ce sont principalement des pommes de terre (environ 300 ha), des canneberges (80ha) et des fruits et légumes et productions horticoles qui seraient irriguées.

Dans cette zone, selon les déclarations des producteurs, les besoins en eau sont estimés à un peu plus de 1,1 millions de m³ par été (voir tableau 1). L'eau proviendrait à près de 70% d'étangs d'irrigation, le reste provenant de la rivière Point-du-Jour. Les prélèvements sont principalement concentrés, en termes de volume, sur les mois de juin à août, tel que présenté dans le table 1. Les étangs d'irrigation dans lesquels l'eau est prélevée sont pour la plupart situés à plus de 30m du milieu humide selon la cartographie de Canard Illimité². Environ 20% des prélèvements seraient néanmoins réalisés dans des étangs situés dans ou à proximité immédiate des milieux humides.

Tableau 1 : Synthèse des volumes prélevés et de l'origine de l'eau utilisée pour la zone St-Paul, Lavaltrie et L'Assomption selon les données collectées par la FUPAL

	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Total été
Besoin en eau totaux (m³)	108 360	254 180	433 811	223 481	97 902	1 117 734
Besoin en % du total annuel	10%	23%	39%	20%	9%	100%
Pourcentage des besoins provenant des cours d'eau	1%	29%	36%	47%	11%	31%
Pourcentage des besoins provenant des étangs	99%	71%	64%	53%	89%	69%
- À proximité immédiate des milieux humides	0%	1%	1%	1%	0%	1%
- À plus de 30 m des milieux humides	99%	37%	41%	39%	86%	49%
- Entre 0 et 30 m des milieux humides	0%	32%	22%	13%	3%	19%

L'étude de l'université McGill a permis de réaliser une estimation des besoins en eau pour les principales cultures (sauf horticoles), présentées dans le tableau 2 en comparaison aux données collectées par la FUPAL. Dans l'étude de l'université McGill, les volumes estimés de besoin en eau d'irrigation ont été obtenus en multipliant les données de superficie cultivée de chaque cultures (données spatialisées de la FADQ pour l'année 2020) par les volumes estimés avec le modèle Aquacrop. Il s'agit donc d'un volume potentiel d'eau d'irrigation nécessaire si tous les producteurs

¹ Données de la FADQ de 2020 - base de données des parcelles et productions agricoles déclarées (BDPPAD).

² Milieux humides cartographie détaillée (gdb): <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/milieux-humides-du-quebec> (mise à jour juillet 2022)

venaient à irriguer toutes leurs superficies cultivées dans les cultures irrigables. Tel que le tableau 2 permet de le constater, le volume estimé avec cette approche est plus de deux fois supérieurs au volume estimé selon les déclarations des producteurs.

Tableau 2 : Comparaison des besoins en eau estimés par la FUPAL et par l'université McGill pour la zone St-Paul, Lavaltrie et L'Assomption

Estimation de la FUPAL (m ³)	Estimation de l'université McGill (m ³)	Différence (% de l'Observé)
1 117 734	2 627 745	135%

À retenir :

- Dans la zone St-Paul, Lavaltrie et L'Assomption, l'eau provient en majorité d'étangs d'irrigation, dont près des 2/3 ne sont pas à proximité immédiate des milieux humides.
- Les prélèvements sont concentrés sur les périodes de juin à août, principalement pour l'irrigation de la pomme de terre.
- Les superficies irriguées et le volume prélevé pourraient être considérablement plus élevés dans cette région, si de nouvelles superficies cultivées venaient à être irriguées ou si certains prélèvements n'ont pas été comptabilisés dans les données de la FUPAL.

2.1.2 Zone Coteau Saint-Henri

La zone du coteau Saint-Henri est située au centre du complexe tourbeux de Lanoraie, et comprend selon les données de la FUPAL une superficie cultivée et irriguée annuellement d'environ 540ha (superficie totale cultivée de 1075 ha environ selon données de la FADQ de 2020 - BDPPAD). Les pommes de terre (environ 180ha), les cultures horticoles (environ 50ha) et gazon (environ 50ha), les courges, haricots et autres légumes représentent la majorité des superficies irriguées. Les fruits (bleuets et fraises, vignes) représentent moins de 30ha irrigués dans ce territoire.

Les volumes prélevés annuellement cumulent un peu plus de 1,3 millions de m³, provenant pour la grande majorité d'étangs d'irrigation. Environ 50% des volumes proviennent d'étangs situés à plus de 30 m des milieux humides, les 45% restant étant à proximité du complexe tourbeux (tableau 3).

Dans ce territoire, une partie importante des prélèvements provient des cultures horticoles (plus de 30% du total). Puisque ces cultures ne sont pas prises en compte dans les estimations de l'université McGill, les écarts entre les prélèvements estimés par l'université McGill et les données de la FUPAL sont beaucoup plus faibles que dans le cas précédent (tableau 4). Si toutes les superficies de cultures maraichères et fruitières venaient à être irriguées dans ce territoire, le volume d'irrigation pourrait donc également légèrement augmenter.

Tableau 3 : Synthèse des volumes prélevés et de l'origine de l'eau utilisée pour la zone du coteau Saint-Henri selon les données collectées par la FUPAL

	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Total été
Besoin en eau totaux (m³)	183 618	301 769	449 357	332 260	59 163	1 326 166
Besoin en % du total annuel	14%	23%	34%	25%	4%	100%
Pourcentage des besoins provenant des cours d'eau	1%	5%	8%	4%	0%	5%
Pourcentage des besoins provenant des étangs	99%	95%	92%	96%	100%	95%
- À proximité immédiate des milieux humides	23%	24%	22%	23%	14%	22%
- À plus de 30 m des milieux humides	52%	45%	48%	48%	84%	49%
- Entre 0 et 30 m des milieux humides	24%	26%	22%	25%	1%	23%

Tableau 4 : Comparaison des besoins en eau estimés par la FUPAL et par l'université McGill pour la zone du coteau Saint-Henri

Estimation de la FUPAL (m ³)	Estimation de l'université McGill (m ³)	Différence (% de l'Observé)
1 326 166	1 289 360	-3%

À retenir :

- Dans la zone du coteau Saint-Henri, l'eau provient très majoritairement d'étangs d'irrigation, dont plus de la moitié ne sont pas à proximité immédiate des milieux humides.
- Les prélèvements sont concentrés sur les périodes de mai à août, principalement pour l'irrigation de la pomme de terre et des cultures horticoles.
- Les superficies irriguées et le volume prélevé pourraient être légèrement plus élevés dans cette région, si de nouvelles superficies cultivées venaient à être irriguées ou si certains prélèvements n'ont pas été comptabilisés dans les données de la FUPAL.

2.1.3 Zone Saint Thomas

La zone Saint-Thomas compte près de 900 ha irrigués chaque année selon les données de la FUPAL, les deux tiers environ étant de la pomme de terre (près de 600 ha), le reste étant principalement des asperges (environ 80 ha), des fruits (canneberges, camerises, bleuets... pour 100ha environ) et du gazon (environ 80ha). En tout, 1800 ha environ seraient cultivés dans ce secteur (Données FADQ – BDPPAD 2020).

Près de 2 millions de m³ sont prélevés annuellement dans cette zone. Les volumes prélevés pour chaque culture respectent approximativement les mêmes proportions que les superficies. Tout comme les deux cas précédents, les prélèvements d'eau sont concentrés durant les mois de juin à août.

Dans cette zone, 90% de l'eau utilisée pour l'irrigation provient d'étangs car les cours d'eau sont mineurs. Le bras du Sud-Ouest est un petit cours d'eau qui comble environ 5% des besoins en eau, et la rivière Chaloupe est utilisée pour combler les 5% restants. L'eau provient donc d'étangs, 2/3 des volumes provenant d'étangs situés à même le complexe tourbeux (ou le milieu humide). Cette situation est particulière à cette zone (tableau 5).

La comparaison des données collectées par la FUPAL avec les estimations de l'université McGill semble indiquer que les volumes prélevés pour l'irrigation des cultures pourraient être légèrement plus élevés si toutes les cultures maraichères et fruitières sont irriguées (tableau 6). Puisque les estimations de l'université McGill n'incluent pas l'irrigation du gazon qui représente 10% des volumes environ dans les données la FUPAL, si toutes les cultures irrigables l'étaient, les besoins en eau pourraient être environ 35% supérieurs aux estimations de la FUPAL.

Tableau 5 : Synthèse des volumes prélevés et de l'origine de l'eau utilisée pour la zone de Saint-Thomas selon les données collectées par la FUPAL

	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Total été
Besoin en eau totaux (m³)	96 833	395 915	781 453	606 190	60 655	1 941 047
Besoin en % du total annuel	5%	20%	40%	31%	3%	100%
Pourcentage des besoins provenant des cours d'eau	0%	10%	12%	18%	31%	10%
Pourcentage des besoins provenant des étangs	100%	90%	88%	82%	69%	90%
- À proximité immédiate des milieux humides	63%	71%	69%	61%	36%	67%
- À plus de 30 m des milieux humides	34%	13%	13%	18%	27%	16%
- Entre 0 et 30 m des milieux humides	3%	6%	6%	3%	5%	6%

Tableau 6 : Comparaison des besoins en eau estimés par la FUPAL et par l'université McGill pour zone de Saint-Thomas

Estimation de la FUPAL (m ³)	Estimation de l'université McGill (m ³)	Différence (% de l'Observé)
1 941 047	2 408 626	24%

À retenir :

- Dans la zone de Saint-Thomas, l'eau provient en majorité d'étangs d'irrigation, dont plus des 2/3 sont à proximité immédiate des milieux humides.
- Les prélèvements sont concentrés sur les périodes de juin à août, principalement pour l'irrigation de la pomme de terre.
- Les superficies irriguées et le volume prélevé pourraient être plus élevés dans cette région, si de nouvelles superficies cultivées venaient à être irriguées.

2.1.4 Zone de Lavaltrie et Lanoraie

La zone de Lavaltrie et de Lanoraie concentre environ 650 ha de cultures irriguées, principalement de la pomme de terre (430 ha), du gazon (60 ha), des canneberges (50 ha) et d'autres légumes (asperges, courges, maïs sucré pour environ 100ha). 2500 ha seraient cultivés dans ce secteur (données FADQ BDPPAD 2020).

En termes de volume, près de 2 millions de m³ seraient prélevés annuellement pour l'irrigation selon les données de la FUPAL. 75% du volume serait destiné à l'irrigation des pommes de terre, le gazon et les canneberges représentant environ 10% du volume chacun. Tel que présenté au tableau 7, les volumes seraient principalement prélevés entre les mois de juin à août.

L'eau proviendrait à 48% d'étangs et à 52% des cours d'eau : cette zone est celle où les cours d'eau (rivière Saint-Jean et Saint-Antoine) sont les plus sollicités pour combler les besoins en eau. L'eau des étangs proviendrait d'infrastructures qui sont en majorité à proximité des milieux humides (dans le milieu humide ou à moins de 30 m).

Finalement, les estimations de l'université McGill concordent avec les données de la FUPAL, malgré le fait que le volume pour l'irrigation des gazons n'est pas pris en compte. Ceci pourrait donc indiquer que la grande majorité des superficies qui sont actuellement cultivées en cultures irrigables le sont déjà actuellement.

Tableau 7 : Synthèse des volumes prélevés et de l'origine de l'eau utilisée pour la zone de Lavaltrie et Lanoraie selon les données collectées par la FUPAL

	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Total été
Besoin en eau totaux (m³)	43 774	684 294	864 369	348 340	27 679	1 968 456
Besoin en % du total annuel	2%	35%	44%	18%	1%	100%
Pourcentage des besoins provenant des cours d'eau	21%	50%	54%	55%	99%	52%
Pourcentage des besoins provenant des étangs	79%	50%	46%	45%	1%	48%
- À proximité immédiate des milieux humides	24%	3%	4%	7%	0%	5%
- À plus de 30 m des milieux humides	27%	9%	10%	15%	0%	11%
- Entre 0 et 30 m des milieux humides	28%	38%	32%	22%	0%	32%

Tableau 8 : Comparaison des besoins en eau estimés par la FUPAL et par l'université McGill pour zone de Lavaltrie et Lanoraie

Estimation de la FUPAL (m ³)	Estimation de l'université McGill (m ³)	Différence (% de l'Observé)
1 968 456	1 966 146	0%

À retenir :

- Dans la zone de Lanoraie et Lavaltrie, l'eau provient d'étangs d'irrigation, dont près des 2/3 sont à proximité immédiate des milieux humides et pour environ 40% des cours d'eau.
- Les prélèvements sont concentrés sur les périodes de juin à août, principalement pour l'irrigation de la pomme de terre.
- Les superficies irriguées et le volume prélevé semblent correctement estimés dans cette région.

2.1.5 Zone du rivière Saint-Joseph

La zone du rivière Saint-Joseph compte environ 350 ha irrigués selon les données de la FUPAL, principalement des pommes de terre (300 ha) et des canneberges (environ 40 ha). La superficie totale cultivée dans le secteur est d'environ 1500 ha selon les données de la FADQ (BDPPAD, 2020). Ces deux cultures requièrent des prélèvements d'eau annuels d'environ 0,8 millions de m³, concentrés entre les mois de juin et août. Cette zone est donc celle où les prélèvements sont les plus faibles (tableau 9).

Environ 58% de l'eau provient du cours d'eau (le rivière Saint-Joseph) et 42% des étangs. L'eau prélevée dans les étangs provient environ à moitié d'étangs situés à plus de 30 m des milieux humides, et l'autre moitié d'étangs situés à proximité ou dans les milieux humides.

Les estimations de volume nécessaire pour l'irrigation de l'université McGill sont 75% supérieures à celles de la FUPAL. Compte tenu de l'absence de cultures horticoles, cela peut être dû soit à des superficies actuellement irriguées mais non comptabilisées dans les données de la FUPAL, soit à des superficies cultivées en cultures qui pourraient être irriguées mais qui ne le sont pas actuellement. Cela indique donc que le volume d'eau potentiellement nécessaire pour irriguer les cultures de cette zone est potentiellement sous-estimé.

Tableau 9 : Synthèse des volumes prélevés et de l'origine de l'eau utilisée pour la zone du rivière Saint-Joseph selon les données collectées par la FUPAL

	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Total été
Besoin en eau totaux (m³)	37 214	148 393	373 007	224 869	18 665	802 149
Besoin en % du total annuel	5%	18%	47%	28%	2%	100%
Pourcentage des besoins provenant des cours d'eau	0%	62%	63%	60%	0%	58%
Pourcentage des besoins provenant des étangs	100%	38%	37%	40%	100%	42%
- À proximité immédiate des milieux humides	0%	22%	22%	21%	0%	18%
- À plus de 30 m des milieux humides	100%	15%	14%	18%	95%	82%
- Entre 0 et 30 m des milieux humides	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tableau 10 : Comparaison des besoins en eau estimés par la FUPAL et par l'université McGill pour zone du rivière Saint-Joseph

Estimation de la FUPAL (m ³)	Estimation de l'université McGill (m ³)	Différence (% de l'Observé)
802 149	1 403 823	75%

À retenir :

- Dans la zone du rivière Saint-Joseph, la moitié de l'eau utilisée pour l'irrigation provient d'étangs d'irrigation, dont la moitié sont à proximité immédiate des milieux humides. L'autre moitié provient du cours d'eau.
- Les prélèvements sont concentrés sur les périodes de juin à août, principalement pour l'irrigation de la pomme de terre.
- Les superficies irriguées et le volume prélevé pourraient être plus élevés dans cette région, si de nouvelles superficies cultivées venaient à être irriguées ou si certains prélèvements n'ont pas été comptabilisés dans les données de la FUPAL.

2.2 Analyse des prélèvements d'eau dans les cours d'eau

De l'eau est prélevée dans plusieurs des cours d'eau qui sillonnent le territoire pour combler les besoins en eau pour l'irrigation des cultures.

Contrairement à ce qui se fait parfois ailleurs au Québec, le système de prélèvement d'eau pour l'irrigation dominant dans le territoire du complexe tourbeux de Lanoraie consiste à installer une pompe directement dans le lit du cours d'eau et à raccorder l'équipement d'irrigation directement à la pompe. Il n'y a donc pas de stockage temporaire de l'eau, et l'eau est donc prélevée lors des périodes où les producteurs doivent irriguer leurs cultures, principalement lors des mois de juin à août tel que démontré dans la première partie de ce rapport.

La figure 2 présente le débit moyen estimé par l'IRDA pour la période 2000 à 2015 pour les trois cours d'eau principaux qui s'écoulent au travers du territoire du complexe tourbeux de Lanoraie. Ce sont au cours des mêmes mois de juin à août que les cours d'eau atteignent leur débit minimum.

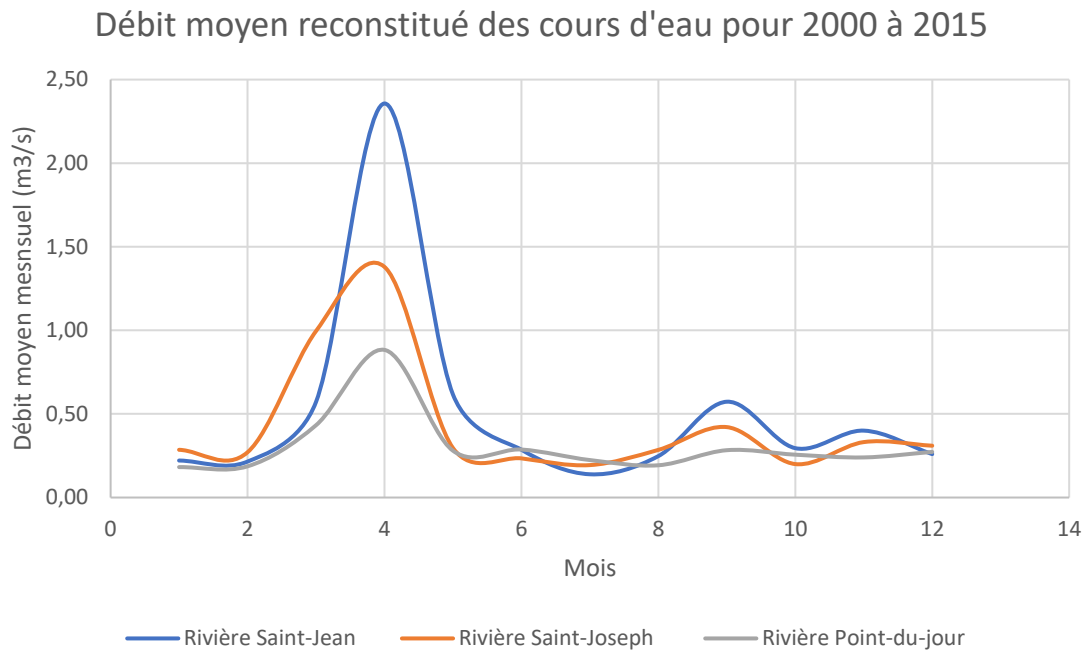


Figure 2 : Débit mensuel moyen reconstitué par le modèle SWAT pour la période 2000-2015 (Données IRDA)

Le tableau 11 présente le débit d'étiage hebdomadaire d'une récurrence de 2 ans ($Q_{2,7}$, l'indice qui sert de référence pour les réflexions sur les prélèvements en eau) estimé mensuellement selon le modèle SWAT par l'IRDA. Pour les trois cours d'eau pour lesquelles la modélisation a été possible, les débits d'étiage sont particulièrement faibles durant les mois d'été : autour de 0,03 m³/s pour la rivière Saint-Jean, et de 0,1 m³/s pour la rivière Saint-Joseph et la rivière Point-du-Jour.

**Tableau 11 : Débit d'étiage estimé par l'IRDA à partir des débits reconstitués par le modèle SWAT
(Extrait du rapport de l'IRDA)**

	Q _{2,7} (m ³ /s)					
	Avec irrigation			Sans irrigation		
	Saint-Jean	Saint-Joseph	Point-du-jour	Saint-Jean	Saint-Joseph	Point-du-jour
Janvier	0,341	0,229	0,252	0,537	0,282	0,672
Février	0,313	0,222	0,251	0,830	0,270	1,027
Mars	0,249	0,204	0,619	1,295	0,635	1,310
Avril	0,426	0,388	0,459	0,601	0,524	0,918
Mai	0,152	0,191	0,204	0,165	0,166	0,392
Juin	0,109	0,119	0,125	0,117	0,103	0,193
Juillet	0,109	0,132	0,142	0,100	0,126	0,129
Août	0,041	0,103	0,104	0,041	0,087	0,103
Septembre	0,096	0,172	0,169	0,113	0,141	0,137
Octobre	0,183	0,170	0,171	0,190	0,171	0,241
Novembre	0,330	0,254	0,334	0,397	0,341	0,428
Décembre	0,353	0,252	0,423	0,684	0,410	0,722
Annuel	0,027	0,103	0,102	0,041	0,087	0,103

Tel que le tableau 11 permet de le constater, les débits qui circulent dans les trois cours d'eau sont quand même relativement important au printemps et au début de l'été, jusqu'au milieu de la saison estivale où les cours d'eau atteignent des débits plus faibles. Partant de ces constats, nous avons réalisés deux analyses présentées ci-dessous par bassin versant des cours d'eau, selon la cartographie des bassins versants développée par l'IRDA :

- Nous avons comparé les débits prélevés mensuellement dans le cours d'eau aux estimations des débits reconstitués par l'IRDA pour chacun des cours d'eau sur la base des valeurs mesurées et simulées (données fournies par l'IRDA), pour obtenir un ordre de grandeur de la part du débit qui s'écoule dans le cours d'eau qui est prélevé.
- Nous avons également comparé ce débit prélevé cumulé au Q_{2,7} estimé par l'IRDA (IRDA, 2024) pour obtenir un indice de la pression des prélèvements sur le cours et un indice de la possibilité, au niveau réglementaire, de poursuivre ces prélèvements dans le futur.

Comparaison des prélèvements aux débits d'étiage

Nous avons converti les volumes prélevés (m³ par mois) en m³/s en considérant une hypothèse de prélèvements répartis de façon homogène sur toute la durée du mois afin de pouvoir les comparer aux débits des cours d'eau. Le tableau 12 présente la comparaison mensuelle des débits prélevés et passants (reconstitués) des rivières Saint-Jean et Saint-Antoine. Tel que présenté dans la première partie, les prélèvements sont principalement concentrés entre les mois de juin et août.

Dès le mois de juin, selon ces estimations, ce serait près de 45% du débit passant qui serait prélevé, et au mois de juillet, plus de 120% du débit. Ces estimations reflètent deux phénomènes possibles : d'une part, les débits reconstitués par l'IRDA sont estimés sur la base des mesures, qui sont la résultante d'un débit naturel du cours d'eau néanmoins influencé par les prélèvements qui ont actuellement lieu. Puisque le modèle SWAT n'a pas permis de reproduire convenablement les

prélèvements pour l'irrigation (sous-estimé), le débit reconstitué est probablement sous-estimé. D'autre part, les données de prélèvements et les hypothèses réalisées (répartition homogène des prélèvements dans le temps) présentent évidemment une incertitude, qui explique probablement en partie le fait que le débit prélevé en juillet serait supérieur au débit moyen du cours d'eau. En tout état de cause, il apparaît donc que les volumes prélevés dans les cours d'eau sont particulièrement élevés en comparaison au débit passant dans les cours d'eau durant les mois de juin à août, et en particulier en juillet. Lorsque ces prélèvements sont comparés aux débits d'étiages mensuels et a fortiori au débit d'étiage annuel du cours d'eau, les prélèvements cumulés et ramenés en unité de débit excèdent largement la valeur de 15% du débit d'étiage communément utilisé comme seuil pour évaluer l'impact des prélèvements sur les cours d'eau : en comparaison aux débits d'étiages mensuels estimés par l'IRDA, les pourcentages sont compris entre 120 et 180% environ, rapportés au débit d'étiage annuel, les pourcentages sont environ entre 250 et 650%.

Ces chiffres traduisent, qu'en l'état actuel des données en notre possession, les prélèvements actuellement réalisés dans la rivière Saint-Jean (et son affluent la rivière Saint-Antoine) semblent nettement supérieurs à la capacité du cours d'eau.

Tableau 12 : comparaison des débits prélevés mensuellement avec le débit moyen mensuel de la rivière Saint-Jean (et de son affluent la rivière Saint-Antoine), ainsi qu'avec le $Q_{2,7}$ mensuel et annuel estimé par l'IRDA.

	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Débit prélevé (m³/s)	0.004	0.131	0.173	0.072	0.011
Débit reconstitué de la rivière Saint-Jean (m³/s)	0.62	0.29	0.14	0.25	0.57
% du débit passant prélevé	1%	46%	124%	29%	2%
Débit étiage mensuel ($Q_{2,7}$) estimé pour la rivière Saint-Jean (IRDA avec Irrigation) (m³/s)	0.152	0.109	0.109	0.041	0.096
% du débit d'étiage mensuel ($Q_{2,7}$) prélevé	2%	120%	159%	176%	11%
% du débit d'étiage annuel ($Q_{2,7}$: 0.027 m³/s - IRDA) prélevé	13%	486%	641%	267%	39%

Le même portrait a été dressé pour les rivières Point du Jour (Tableau 13), Saint-Joseph (Tableau 14) et Bras-du-Sud-Ouest (tableau 15), pour laquelle seule des données de débit d'étiage annuel était disponible.

Si les constats généraux semblent similaires à ceux réalisés pour la rivière Saint-Jean, certaines différences sont observables :

- Dans le cas de la rivière Point-du-Jour, le débit passant prélevé est de l'ordre de 10 à 20%, ce qui semble indiquer que la situation serait moins critique que dans le cas de la rivière Saint-Jean. Comparé aux débits d'étiage mensuels et annuels, ces valeurs sont néanmoins supérieures au seuil de 15% (entre 20 et 67% suivant le mois et l'indicateur choisi), indiquant que les prélèvements cumulés seraient supérieurs au seuil communément recommandé pour maintenir les différentes fonctions du cours d'eau.
- La rivière Saint-Joseph présente des similitudes importantes avec la rivière Point-du-Jour en termes de portrait des prélèvements comparés aux ressources disponibles. Toutefois, la comparaison entre les prélèvements et les débits d'étiage mensuels ou annuels présente de grandes différences, puisque le débit d'étiage annuel estimé par l'IRDA est beaucoup plus faible que le débit d'étiage mensuel. En comparaison au débit passant, pour les mois de juin à août, les prélèvements sont autour de 15%, mais sont supérieurs pour le mois de juillet. Dans ce bassin également, les prélèvements cumulés dans les cours d'eau sont nettement supérieurs à 15% du débit d'étiage, qu'il soit mensuel ou annuel.
- Finalement, les prélèvements dans la rivière Bras-du-Sud-Ouest, bien qu'ils soient plus faibles que dans les autres cours d'eau, restent nettement supérieurs à 15% du débit d'étiage.

Tableau 13 : comparaison des débits prélevés mensuellement avec le débit moyen mensuel de la rivière Point-du-Jour, ainsi qu'avec le $Q_{2,7}$ mensuel et annuel estimé par l'IRDA.

<i>Rivière Point-du-Jour</i>	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Débit prélevé (m³/s)	0.001	0.026	0.041	0.025	0.004
Débit reconstitué de la rivière Point-du-Jour (m³/s)	0.28	0.29	0.22	0.19	0.28
% du débit passant prélevé	0%	9%	19%	13%	1%
Débit étiage mensuel ($Q_{2,7}$) estimé pour la rivière Point-du-Jour (IRDA avec Irrigation) (m³/s)	0.204	0.125	0.142	0.104	0.169
% du débit d'étiage mensuel ($Q_{2,7}$) prélevé	0%	20%	29%	24%	2%
% du débit d'étiage annuel ($Q_{2,7}$: 0.062 m³/s - IRDA) prélevé	1%	41%	67%	40%	7%

Tableau 14 : comparaison des débits prélevés mensuellement avec le débit moyen mensuel de la rivière Saint-Joseph, ainsi qu'avec le $Q_{2,7}$ mensuel et annuel estimé par l'IRDA.

<i>Rivière Saint-Joseph</i>	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Débit prélevé (m³/s)	0.000	0.036	0.088	0.050	0.000
Débit reconstitué de la rivière Saint-Jean (m³/s)	0.30	0.23	0.19	0.29	0.42
% du débit passant prélevé	0%	15%	46%	17%	0%
Débit étiage mensuel ($Q_{2,7}$) estimé pour la rivière Saint-Joseph (IRDA avec Irrigation) (m³/s)	0.191	0.119	0.132	0.103	0.104
% du débit d'étiage mensuel ($Q_{2,7}$) prélevé	0%	30%	67%	49%	0%
% du débit d'étiage annuel ($Q_{2,7}$: 0.032 m³/s - IRDA) prélevé	0%	111%	275%	157%	0%

Tableau 15 : comparaison des débits prélevés mensuellement avec le débit moyen mensuel de la rivière Bras-du-Sud-Ouest, ainsi qu'avec le $Q_{2,7}$ annuel estimé par l'IRDA.

<i>Bras-du-Sud-Ouest</i>	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Débit prélevé (m³/s)	0.000	0.007	0.019	0.026	0.000
Débit reconstitué de la rivière Saint-Jean (m³/s)	0.30	0.23	0.19	0.29	0.42
% du débit d'étiage annuel ($Q_{2,7}$: 0.007 m³/s - IRDA) prélevé	0%	95%	271%	366%	0%

Perspective avec les changements climatiques

Dans le cadre du présent projet, deux perspectives par rapport aux changements climatiques ont été étudiées : l'évolution des besoins en eau, dans le cadre du projet de l'université McGill (Kilmartin et Madramootoo, 2024), et l'évolution des débits des cours d'eau par l'IRDA (Ricard et al., 2024). Les deux perspectives sont inverses : les besoins en eau d'irrigation pourraient être légèrement supérieurs du fait de la hausse de l'évapotranspiration (environ 10% supérieurs dans le cas de la pomme de terre), alors que les ressources en eau pourraient être inférieures (les débits d'étiage seraient réduits de l'ordre de 20%).

Dans ce contexte, avec la perspective des changements climatiques, les cours d'eau qui traversent le territoire ne pourront vraisemblablement pas supporter une augmentation de prélèvements, leur usage semblant déjà actuellement être supérieur au seuil d'usage « durable » de la ressource et leur débit d'étiage étant appelé à diminuer.

À retenir :

- Dans les quatre cours d'eau, les prélèvements excèdent donc actuellement de façon importante le seuil de 15% du débit d'étiage (estimé sur une base mensuelle ou annuelle). Ils excèdent également dans la plupart des cas, au moins pour un mois de l'été, 15% du débit passant.
- Ces comparaisons permettent de documenter de manière chiffrée les risques potentiels de conflits d'usages de l'eau déjà relevés lors du projet RADEAU et reconnus par les différents acteurs du territoire, en lien avec la gestion des cours d'eau et des barrages qui permettent les prélèvements.

2.3 Analyse des prélèvements dans les étangs d'irrigation

Suivant les secteurs du territoire, une part importante des prélèvements d'eau provient d'étangs d'irrigation qui sont approvisionnés directement par les précipitations mais également par les écoulements d'eau souterraine provenant des nappes de surface. Afin d'évaluer ce que représentent ces volumes d'eau par rapport à la ressource utilisée, nous avons réalisé une comparaison avec une estimation de la recharge des nappes souterraines. Dans l'étude réalisée par l'UQAM, plusieurs hypothèses de recharge des nappes ont été utilisées, et nous en avons retenu deux pour l'analyse présentée ici : l'hypothèse d'une valeur moyenne de 289 mm par an, et l'hypothèse basse d'une recharge de 152 mm par an. En prenant en compte la superficie des différents bassins versants, nous avons estimé le volume total de la recharge annuelle suivant ces deux hypothèses (tableau 16).

Tableau 16 : Évaluation de la recharge des quatre bassins versant du complexe tourbeux de Lanoraie à partir de leur superficie et de l'évaluation du volume de précipitation annuelle qui contribue à la recharge de la nappe phréatique de surface.

Bassin versant	Superficie du bassin versant (ha)	Superficie (m ²)	Recharge annuelle en m ³ (hypothèse moyenne UQAM 289 mm)	Recharge annuelle en m ³ (hypothèse minimum UQAM 152 mm)
Rivière Point-du-Jour	8 114	81 140 000	23 449 460	12 333 280
Rivière-Saint-Jean	7 517	75 170 000	21 724 130	11 425 840
Rivière Saint Joseph	4 126	41 260 000	11 924 140	6 271 520
Rivière Bras du Sud-Ouest	851	8 510 000	2 459 390	1 293 520
TOTAL	20 608	206 080 000	59 557 120	31 324 160

Ainsi, selon ces estimations, la recharge annuelle atteindrait entre 30 et 60 millions de m³ par an. Les prélèvements dans les étangs sont estimés à partir des données collectées par la FUPAL à près de 5,5 millions de m³. Selon ces deux scénarios, à l'échelle de la région, ce serait donc entre 9 et 17% de la recharge totale qui serait prélevée pour l'irrigation (tableau 17). Pour les eaux souterraines, le seuil communément utilisé pour un usage durable de la ressource est de 20% (Charron et al., 2019)³. Ainsi, à l'échelle du complexe tourbeux, les prélèvements cumulatifs seraient inférieurs à ce seuil. Néanmoins, à l'échelle des bassins versants, la situation serait différente : dans les bassins versant des rivières Saint-Jean et Saint-Antoine, et Saint-Joseph, le % de la recharge prélevé serait faible, entre 3 et 8% de la recharge (suivant l'hypothèse de recharge minimale ou moyenne). Dans le cas du bassin versant de la rivière Point-du-Jour (zones coteau St-

³ https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Agroenvironnement/PV-3.2-FV-2016-002_Rapport.pdf

Henri et St-Paul, Lavaltrie et L'assomption), ce serait entre 9 et 16% de la recharge qui seraient prélevés. Si le coteau Saint-Henri était isolé, le pourcentage de la recharge prélevé serait probablement supérieur. Finalement, la zone de la rivière Bras-du-Sud-Ouest est celle où l'intensité des prélèvements en eau souterraine serait la plus élevée : entre 70 et 135% de la recharge annuelle serait prélevé suivant le scénario de recharge considéré.

Tableau 17 : Comparaison des volumes prélevés dans les étangs d'irrigation au volume de précipitation qui rechargeraient les aquifères de surface et la tourbière

Bassin versant	Recharge annuelle en m ³ (hypothèse UQAM 289 mm)	Recharge annuelle en m ³ (hypothèse UQAM 152 mm)	Volume prélevé dans les étangs (m ³ par an)	Hypothèses	% de la recharge annuelle prélevée (hypothèse recharge UQAM 289 mm)	% de la recharge annuelle prélevée (hypothèse recharge UQAM 152 mm)
Rivière Point-du-Jour	23 449 460	12 333 280	2 146 445	Volume prélevé dans les zones coteau St-Henri et St-Paul, Lavaltrie et L'assomption (figure 1)	9%	16%
Rivière-Saint-Jean	21 724 130	11 425 840	1 146 557	Volume prélevé de la zone Lavaltrie Lanoraie	4%	8%
Rivière Saint-Joseph	11 924 140	6 271 520	427 351	Volume prélevé de la zone Saint-Joseph	3%	5%
Rivière Bras du Sud-Ouest	2 459 390	1 293 520	1 739 816	Volume prélevé de la zone St-Thomas	71%	135%
TOTAL	59 557 120	31 324 160	5 460 168		9%	17%

À retenir :

- Selon l'estimation sommaire réalisée, les prélèvements en eau souterraine via des étangs d'irrigations rechargés par les nappes de surface représenteraient en moyenne, à l'échelle du complexe tourbeux de Lanoraie, moins de 20 % de la recharge annuelle, y compris avec une hypothèse de recharge faible.
- Dans deux bassins versants, situés au nord du territoire, la part de la recharge prélevée serait plus importante. En particulier, dans le bassin-versant de la rivière Bras-du-Sud-Ouest, les prélèvements d'eau souterraine sont concentrés dans l'espace et semblent nettement excéder le seuil communément utilisé pour qualifier la durabilité d'un usage.

2.4 Estimation des volumes d'eau présentant potentiellement une situation problématique pour l'environnement

2.4.1 Prélèvements dans les cours d'eau

Telle que la section 2 de ce rapport l'a exposée, dans certains cours d'eau, les prélèvements cumulatifs réalisés durant la période estivale dépassent le seuil communément utilisé pour évaluer l'intensité d'usage d'un cours d'eau, soit le seuil de 15% du débit d'étiage. Nous avons comparé le volume théoriquement disponible (15% du $Q_{2,7}$) aux volumes d'eau actuellement prélevés dans les cours d'eau, afin d'estimer le volume qui devrait être prélevé dans d'autres sources d'eau.

Les tableaux 18 à 21 présentent les résultats de ces estimations, en considérant deux valeurs possibles de $Q_{2,7}$: le $Q_{2,7}$ annuel et le $Q_{2,7}$ mensuel (pour les 3 cours d'eau pour lesquelles des données étaient disponibles). Considérant l'incertitude qui persiste sur l'estimation des valeurs de $Q_{2,7}$ pour les cours du territoire, considérer ces différentes valeurs permet d'obtenir une gamme de valeur plutôt qu'une seule :

- Dans le cas des rivières Saint-Jean et Saint-Antoine, ce sont près de 80 à 95% des volumes prélevés qu'il faudrait rediriger vers d'autres sources d'eau, puisque durant les mois de juillet et août, ce sont uniquement 3 à 10% des volumes prélevés qui pourraient l'être en respectant le seuil de 15% du débit d'étiage.
- Pour la rivière Saint Joseph (tableau 19), ce sont 45 à 85% des prélèvements qu'il faudrait rediriger vers d'autres sources à l'échelle annuelle. Au mois de juillet en particulier, seul 5 à 22% des prélèvements réalisés actuellement dans le cours d'eau pourraient être maintenu en respectant le seuil de 15% du débit d'étiage.
- Dans la rivière Point-du-Jour, environ 35 à 75% des prélèvements devrait être redirigé vers d'autres sources, pour les mêmes raisons. C'est également au mois de juillet que les prélèvements plus importants seraient le moins en adéquation avec le débit prélevable.
- Finalement, pour la rivière Bras-du-Sud-Ouest, ce sont uniquement 3% des volumes actuellement prélevés qui pourraient être poursuivis, 97% des prélèvements devraient être dirigés vers d'autres sources d'eau.

Tableau 18 : comparaison des volumes prélevés avec les volumes théoriquement prélevables selon la réglementation en vigueur pour la rivière Saint-Jean

<i>Rivière Saint-Jean</i>	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	TOTAUX
Prélèvements possibles (si 15% du Q_{2,7} annuel - m³)	10 848	10 498	10 848	10 848	10 498	53 538
Prélèvements possibles (si 15% du Q_{2,7} mensuel - m³)	61 068	43 792	43 792	16 472	38 569	203 692
Prélèvement actuels (m³)	9 384	317 134	423 296	156 884	12 640	919 338
% des besoins pouvant être couverts (15% Q_{2,7} annuel)	116%	3%	3%	7%	83%	6%
% des besoins pouvant être couverts (15% Q_{2,7} mensuel)	651%	14%	10%	10%	305%	22%
Volume à détourner (15% Q_{2,7} annuel)	0	306 636	412 449	146 036	2 143	867 264
Volume à détourner (15% Q_{2,7} mensuel)	0	273 342	379 504	140 412	0	793 258

Tableau 19 : comparaison des volumes prélevés avec les volumes théoriquement prélevables selon la réglementation en vigueur pour la rivière Saint-Joseph

<i>Rivière Saint-Joseph</i>	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	TOTAUX
Prélèvements possibles (si 15% du Q_{2,7} annuel - m³)	12 856	12 442	12 856	12 856	12 442	63 452
Prélèvements possibles (si 15% du Q_{2,7} mensuel - m³)	76 736	46 267	53 032	41 381	40 435	257 852
Prélèvement actuels (m³)	0	92 399	236 020	134 987	0	463 406
% des besoins pouvant être couverts (15% Q_{2,7} annuel)	100%	13%	5%	10%	100%	14%
% des besoins pouvant être couverts (15% Q_{2,7} mensuel)	100%	50%	22%	31%	100%	56%
Volume à détourner (15% Q_{2,7} annuel)	0	79 958	223 164	122 131	0	425 252
Volume à détourner (15% Q_{2,7} mensuel)	0	46 132	182 988	93 606	0	322 725

Tableau 20 : comparaison des volumes prélevés avec les volumes théoriquement prélevables selon la réglementation en vigueur pour la rivière Point-du-Jour

<i>Rivière Point-du-Jour</i>	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	TOTAUX
Prélèvements possibles (si 15% du Q_{2,7} annuel - m³)	24 909	24 106	24 909	24 909	24 106	122 939
Prélèvements possibles (si 15% du Q_{2,7} mensuel - m³)	81 959	48 600	57 050	41 783	65 707	295 099
Prélèvement actuels (m³)	1 348	66 353	111 005	67 205	10 635	256 546
% des besoins pouvant être couverts (15% Q_{2,7} annuel)	100%	36%	22%	37%	100%	27%
% des besoins pouvant être couverts (15% Q_{2,7} mensuel)	100%	73%	51%	62%	100%	64%
Volume à détourner (15% Q_{2,7} annuel)	0	42 247	86 096	42 295	0	170 638
Volume à détourner (15% Q_{2,7} mensuel)	0	17 753	53 955	25 422	0	97 129

Tableau 21 : comparaison des volumes prélevés avec les volumes théoriquement prélevables selon la réglementation en vigueur pour la rivière Bras-du-Sud-Ouest

<i>Rivière Bras-du-Sud-Ouest</i>	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	TOTAUX
Prélèvements possibles (si 15% du Q_{2,7} annuel - m³)	2 812	2 722	2 812	2 812	2 722	13 880
Prélèvement actuels (m³)	0	17 821	50 723	68 544	0	137 088
% des besoins pouvant être couverts (15% Q_{2,7} annuel)	100%	4%	3%	4%	100%	3%
Volume à détourner (15% Q_{2,7} annuel)	0	15 100	47 910	65 732	0	128 742

2.4.2 Prélèvements dans les étangs

Le même exercice de comparaison des prélèvements actuels avec les volumes théoriquement prélevables a été réalisé pour les eaux issues des étangs et donc des ressources souterraines. Le tableau 22 présente la comparaison des volumes qui seraient prélevables suivant les deux scénarios de recharge précédemment exposés dans chaque bassin versant.

Deux bassins versant présentent, sous cet angle d'analyse, des prélèvements d'eau souterraine qui excèdent le seuil d'usage durable de la ressource :

- Dans le bassin versant de la rivière Point-du-Jour (secteurs du coteau Saint Henri et de Saint Paul, Lavaltrie et l'Assomption), les volumes excèderaient le seuil de prélèvement dans le scénario de recharge annuelle faible. Ce serait 9% des prélèvements de ce bassin versant qu'il faudrait détourner vers d'autres sources dans cette zone.
- Dans le bassin versant du Bras-du-Sud-Ouest, les volumes prélevés excèdent nettement 20% de la recharge (quel que soit le scénario de recharge considéré). Ce serait ainsi entre 80% et 90% environ des volumes prélevés dans les étangs qu'il faudrait détourner vers d'autres sources d'eau.

Une autre considération à prendre en compte dans la problématique d'approvisionnement en eau souterraine est la localisation des étangs d'irrigation dans le territoire. Tel que démontré dans l'étude de l'UQAM mais également documenté dans le rapport de Technorem (2009)⁴, les pompages dans les étangs ont des effets locaux sur les niveaux des nappes. Puisque plusieurs étangs sont situés dans le complexe tourbeux, ou à proximité directe, ils ont donc potentiellement un impact préjudiciable sur les milieux humides et tourbeux. Dans une optique de considérer différents scénarios d'approvisionnements, le tableau 23 présente une estimation des volumes d'eau souterraine qui seraient à détourner vers d'autres sources d'eau (soit de nouveaux étangs situés plus loin du complexe tourbeux, soit d'autres sources). Cette estimation a été obtenue en additionnant les volumes prélevés dans les étangs situés à moins de 30 m des milieux humides et ceux situés dans le milieu humide. Au total, ce sont près de la moitié des prélèvements qui sont réalisés dans des étangs à proximité des milieux humides. Les bassins versant des rivières du Point-du-Jour, de la Saint-Jean et du Bras-du-Sud-Ouest sont ceux qui présentent le plus de prélèvements dans des étangs potentiellement problématiques. Ainsi, par exemple, pour la rivière Saint-Jean, ce sont 77% des prélèvements qui sont concernés.

⁴ TechnoRem, 2009, Cartographie hydrogéologique régionale de la zone de production maraîchère des MRC de Joliette et d'Autray, Rapport final avec l'appui financier du Programme d'approvisionnement en eau Canada-Québec, Projet CDAQ #5040.

Tableau 22 : Comparaison des volumes théoriquement prélevables avec les prélèvements actuels d'eau souterraine par bassin versant.

Bassin versant	Recharge annuelle en m ³ (hypothèse UQAM 289 mm)	Recharge annuelle en m ³ (hypothèse UQAM 152 mm)	Volume prélevé dans les étangs (m ³ par an)	Volume (m ³) qui pourrait être prélevé pour respecter le seuil de 20% de la recharge annuelle (hypothèse UQAM 289 mm)	Volume (m ³) qui pourrait être prélevé pour respecter le seuil de 20% de la recharge annuelle (hypothèse UQAM 152 mm)	Volume (m ³) à détourner pour respecter le seuil de 20% de la recharge annuelle (hypothèse UQAM 289 mm)	Volume (m ³) à détourner pour respecter le seuil de 20% de la recharge annuelle (hypothèse UQAM 152 mm)
Rivière Point-du-Jour	23 449 460	12 333 280	2 028 581	3 517 419	1 849 992	0	178 589
Rivière-Saint-Jean	21 724 130	11 425 840	935 328	3 258 620	1 713 876	0	0
Rivière Saint Joseph	11 924 140	6 271 520	338 743	1 788 621	940 728	0	0
Rivière Bras du Sud-Ouest	2 459 390	1 293 520	1 739 816	368 909	194 028	1 370 907	1 545 788
TOTAL	59 557 120	31 324 160	5 042 468	8 933 568	4 698 624	1 370 907	1 724 377

Tableau 23 : Volumes prélevés dans les étangs situés à proximité des milieux humides, par bassin versant, selon les données de la FUPAL.

Bassin versant	Volumes prélevés dans les étangs à proximité immédiate des milieux humides (m ³ / an)	Volumes prélevés dans les étangs situés à entre 0 m et 30 m des milieux humides (m ³ / an)	Total des prélèvements dans des étangs situés à proximité des milieux humides (m ³ / an)	Volume total prélevé dans les étangs (m ³ / an)	% des prélèvements effectués dans les étangs à proximité des milieux humides
Rivière Point-du-Jour - Coteau Saint Henri	297 078	304 784	601 862	1 257 453	48%
Rivière Point-du-Jour - St-Paul, Lavaltrie, l'Assomption	6 998	211 273	218 271	771 128	28%
Rivière-Saint-Jean	92 757	627 099	719 856	935 328	77%
Rivière Saint Joseph	140 493	-	140 493	338 743	41%
Ruisseau Bras du Sud-Ouest	92 757	627 099	719 856	1 739 816	41%
TOTAL	630 083	1 770 255	2 400 338	5 042 468	48%

2.4.3 Cumul des prélèvements à détourner de leur source actuelle

Des deux sections précédentes, plusieurs scénarios d'approvisionnement durables en eau peuvent être dessinés :

- Le scénario 1 viserait à respecter pour les prélèvements dans les cours d'eau une règle moins restrictive que la réglementation actuelle, soit de ne pas prélever (en termes de prélèvement cumulatif) plus de 15% du débit d'étiage mensuel. Pour les prélèvements dans les étangs, ce scénario considèrerait de détourner les prélèvements dans les étangs qui excèdent le seuil de 20% de la recharge, estimée selon une hypothèse de recharge moyenne (289 mm par an).
- Le scénario 2 consisterait à respecter la réglementation telle que définie actuellement, soit de limiter les prélèvements dans les cours d'eau en tout temps à 15% du débit d'étiage annuel, et à respecter un seuil de prélèvement dans les étangs de 20% de la recharge annuelle estimée avec l'hypothèse de recharge minimale (152 mm par an).
- Le scénario 3 consisterait à la même hypothèse concernant les prélèvements dans les cours d'eau (respect du $Q_{2,7}$ annuel), et à ajouter une contrainte spatiale aux prélèvements dans les étangs, soit d'éviter de prélever de l'eau dans les étangs à proximité du complexe tourbeux (30 m et moins).
- Finalement, le scénario 4 consisterait à la même hypothèse pour les prélèvements dans les cours (respect du $Q_{2,7}$ annuel) et à respecter simultanément les deux conditions pour les prélèvements d'eau souterraines : prélever moins de 20% de la recharge annuelle (hypothèse de recharge minimale) et de ne pas prélever dans les étangs situés à proximité des milieux humides (30 m et moins).

La résultante de ces scénarios en termes de volume d'eau à détourner des sources actuelles, c'est-à-dire à combler par d'autres sources d'eau, est présentée dans les tableaux 24 à 27. Ainsi, le scénario 1, qui implique de détourner le moins d'eau des sources actuelles, soit néanmoins 40% des volumes annuellement prélevés (tableau 24). 50% environ des volumes à détourner dans ce scénario sont des volumes actuellement prélevés dans les cours d'eau, l'autre 50% est actuellement prélevé dans les étangs. Dans ce scénarios, 55% des volumes à détourner sont concentrés dans le bassin versant du Bras-du-Sud-Ouest, 30% dans le bassin versant de la rivière Saint-Jean, alors que les prélèvements à détourner dans les rivières Saint-Joseph et Point-du-Jour représentent 11% et 4% respectivement. Le scénario 2 requière de détourner 46% des volumes actuellement prélevés de leurs sources (tableau 25). Dans ce scénario, la proportion d'eau souterraine à détourner est légèrement supérieure à celle des eaux de surface. La répartition par bassin versant est similaire à celle du scénario 1. Le scénario 3 prévoirait de détourner 56% des prélèvements d'eau vers d'autres sources (tableau 26). Dans ce scénario, 60% de l'eau à prélever dans d'autres sources est actuellement prélevée dans des étangs. La répartition entre bassin versant des prélèvements à détourner serait plus homogène : le bassin de la rivière Saint-Jean, concentrerait 40% des volumes à détourner, celui du Point-du-Jour 25%, celui du Bras-du-Sud-Ouest 21% et celui de la rivière Saint-Joseph 14%. Finalement, le scénario 4 impliquerait de détourner 67% des prélèvements actuels vers d'autres sources. Deux tiers de ces prélèvements à détourner sont des prélèvements actuellement réalisés dans les étangs. Un tiers de ceux-ci sont réalisés dans le bassin versant du Bras-du-Sud-Ouest, un autre tiers dans celui de la rivière Saint-

Jean. Le bassin versant de la rivière Point-du-Jour compte dans ce scénario 21% des prélèvements à détourner alors que celui de la rivière Saint-Joseph n'en compte que 12%.

Tableau 24 : Estimation des volumes d'eau à détourner dans le scénario 1.

Volumes totaux à détourner (scénario 1, en m ³)	Cours d'eau	Étang	Total
Rivière Point-du-Jour	97 129	0	97 129
Rivière-Saint-Jean	793 258	0	793 258
Rivière Saint Joseph	322 725	0	322 725
Ruisseau Bras du Sud-Ouest	128 742	1 370 907	1 499 649
Total	1 341 854	1 370 907	2 712 761
Pourcentage des prélèvements totaux			38%

Tableau 25 : Estimation des volumes d'eau à détourner dans le scénario 2.

Volumes totaux à détourner (scénario 2, en m ³)	Cours d'eau	Étang	Total
Rivière Point-du-Jour	170 638	178 589	349 227
Rivière-Saint-Jean	867 264	0	867 264
Rivière Saint Joseph	425 252	0	425 252
Ruisseau Bras du Sud-Ouest	128 742	1 545 788	1 674 529
Total	1 591 895	1 724 377	3 316 272
Pourcentage des prélèvements totaux			46%

Tableau 26 : Estimation des volumes d'eau à détourner dans le scénario 3.

Volumes totaux à détourner (scénario 3, en m ³)	Cours d'eau	Étang	Total
Rivière Point-du-Jour	170 638	820 133	990 771
Rivière-Saint-Jean	867 264	719 856	1 587 120
Rivière Saint Joseph	425 252	140 493	565 745
Ruisseau Bras du Sud-Ouest	128 742	719 856	848 598
Total	1 591 895	2 400 338	3 992 234
Pourcentage des prélèvements totaux			56%

Tableau 27 : Estimation des volumes d'eau à détourner dans le scénario 4.

Volumes totaux à détourner (scénario 4, en m ³)	Cours d'eau	Étang	Total
Rivière Point-du-Jour	170 638	820 133	990 771
Rivière-Saint-Jean	867 264	719 856	1 587 120
Rivière Saint Joseph	425 252	140 493	565 745
Ruisseau Bras du Sud-Ouest	128 742	1 545 788	1 674 529
Total	1 591 895	3 226 270	4 818 165
		Pourcentage des prélèvements totaux	67%

À retenir :

- Un usage durable des ressources en eau dans le complexe tourbeux de Lanoraie requerrait de détourner certains prélèvements vers d'autres sources d'eau.
- Des prélèvements actuellement réalisés dans les cours d'eau et dans les étangs seraient concernés, suivant la perspective choisie pour définir ce que serait un usage durable des ressources dans ce territoire.
- Ainsi, les volumes pouvant être prélevés dans les cours d'eau sont empreint d'une incertitude élevées associées à la connaissance encore très limitée des débits s'écoulant naturellement dans les cours d'eau qui sillonnent le territoire, en particulier en été, période durant laquelle la majorité des prélèvements sont réalisés. Cette incertitude a un impact important sur la possibilité de définir avec précision quels volumes pourraient être prélevés dans les cours d'eau.
- De même, pour les prélèvements réalisés dans les étangs, en l'absence de critères clairs pour définir ce que serait un usage durable des ressources en eau souterraine (volume prélevable, évaluation de la ressource incertaine par rapport à la quantification de la recharge, localisation des prélèvements et impact local sur les milieux humides), les différents scénarios définis se traduisent par des volumes plus ou moins importants à détourner vers d'autres sources d'eau et des localisations différentes de prélèvements à détourner.
- Cette difficulté à établir avec précision quels volumes pourraient être prélevés dans le milieu et quels volumes devraient être prélevés dans d'autres sources (fleuve, cours d'eau externes au territoire) représente un défi de taille pour la mise en place d'une gestion durable de l'eau dans la région. Il s'agit également d'un facteur de risque très important pour les producteurs qui se traduit aujourd'hui par une situation difficilement tenable sur le long terme, où aucun consensus et point de vue partagé n'existe, ni sur l'ampleur de problème, ni sur les solutions à mettre en œuvre.

3. Scénarios d’approvisionnement

Dans le contexte de connaissances imprécises et d’absence de vision claire, quantifiée et partagée de l’enjeu que représente l’approvisionnement en eau, identifier une solution d’approvisionnement en eau pour les producteurs du territoire se révèle être un défi. Si plusieurs solutions sont potentiellement techniquement faisables, c’est bien entendu la question des coûts qui représente le principal défi. Puisque chaque m³ qui devra être prélevé d’une source différente de celles mobilisées actuellement représentera un coût supplémentaire pour les producteurs, limiter au maximum ces coûts et donc le volume à détourner des sources actuelles est nécessaire. Au-delà de limiter ces volumes, identifier les solutions les moins coûteuses est également un objectif de premier plan.

3.1 Revue sommaire des solutions alternatives d’approvisionnement

Dans le cadre des projets RADEAU, deux pistes principales avaient été envisagées :

- Retenir davantage d’eau dans le complexe tourbeux de Lanoraie en procédant à des travaux d’infrastructures
- Utiliser de l’eau provenant de sources d’eau externes au territoire.

Dans le contexte du projet, des consultations avec les professionnels du MELCCFP ont été réalisées. À la lumière de ces consultations, le MELCCFP suggère de ne pas prioriser la première piste considérée du fait des importants impacts qu’elle pourrait avoir sur l’environnement et du probable manque d’accessibilité sociale de réaliser des travaux d’aménagement dans le territoire (barrages, digues...) pour conserver davantage d’eau.

La seconde piste reste d’actualité : utiliser de l’eau provenant de l’extérieur du territoire pour subvenir aux besoins des producteurs pour l’irrigation. Compte tenu de la localisation du territoire, deux sources d’eau sont possibles : la rivière l’Assomption, située au nord-ouest du territoire, mais dont le débit d’étiage est actuellement déjà relativement faible en été, et le fleuve Saint-Laurent au sud du territoire. La section suivante présente un exercice sommaire de réflexion qui a été mené sur une solution d’approvisionnement collectif pour l’irrigation d’un secteur agricole du nord du territoire à partir d’eau de la rivière l’Assomption.

Finalement, au cours du projet Scelaneau, une autre solution potentielle a été imaginée, qui potentiellement permettrait de limiter les coûts. Étant donné que les cours d’eau présentent des débits importants au printemps, il serait possible de prélever de l’eau et de la stocker dans des ouvrages de retenus pour les utiliser plus tard durant la saison estivale. Étant donnée la nature très sableuse des sols, il serait nécessaire d’étanchéifier les ouvrages de retenus d’eau, soit avec des membranes, soit avec une terre de nature très argileuse qui une fois compactée devient étanche. Étant donné que les étangs actuellement utilisés pour l’irrigation sont au contact direct avec la nappe, ils ne pourraient probablement pas servir d’ouvrage de retenus. Il faudrait étanchéifier ces étangs et poser des drains autour pour éviter que la nappe, lorsqu’elle est haute, n’exerce une pression sur la membrane plastique ou sur la couche d’argile, au risque de rompre l’étanchéité de l’ouvrage. Une autre solution serait de creuser de nouveaux bassins davantage sur le dessus des coteaux sableux, où ils seraient moins en contact avec la nappe phréatique de surface, ce qui limiterait le besoin de drainer autour des bassins. Une analyse sommaire du volume

qui s'écoule dans les cours d'eau au printemps, en considérant un prélèvement maximal de 15% du débit passant, permet d'affirmer que dans tous les secteurs, les débits ne permettraient pas de combler la totalité des besoins en eau. Les secteurs les plus problématiques sont le bassin versant de la rivière Bras-du-Sud-Ouest et la zone du coteau Saint-Henri, où la rivière Point-du-Jour a un débit très faible. Dans le bassin versant des rivières Saint-Joseph et Saint-Jean, le débit passant au printemps ne serait pas non plus suffisant.

3.2 : Tentative de conception d'un réseau d'aqueduc pour irriguer les cultures en utilisant de l'eau provenant de l'extérieur du territoire

Afin de documenter ce que représenterait un projet d'approvisionnement collectif dans un cours d'eau externe au territoire, nous avons imaginé un système d'aqueduc avec une prise d'eau dans la rivière l'Assomption (figure 3). Nous avons choisi ce territoire d'une part car il est situé dans le secteur Bras-du-Sud-Ouest qui présente une situation particulière en termes d'intensité des prélèvements d'eau souterraine par rapport à la recharge, mais également car plusieurs des étangs sont situés à même le milieu humide.

À partir des données de la FUPAL, la localisation des prélèvements et les volumes requis pour l'irrigation des cultures ont été compilées. Le secteur concerné est irrigué sur environ 150 ha chaque année, pour un volume total d'environ 300 000 m³ d'eau prélevé par année, soit environ 4% des prélèvements totaux réalisés dans le complexe tourbeux de Lanoraie. Un tracé a été défini avec une hypothèse de recharge des étangs existants à partir de l'eau de la rivière (voir figure 4). Un des enjeux de ce tracé est qu'il implique de recharger les étangs existants, qui, parce qu'ils sont en contact avec la nappe et en partie situés dans des milieux humides, seraient probablement complexe techniquement et administrativement à étanchéifier. Afin de compléter ce scénario de projet, nous avons donc réalisé une seconde version du projet qui consisterait à déplacer le réseau d'aqueduc davantage sur le haut des terres et à creuser de nouveaux étangs. Pour dimensionner les étangs, nous avons considéré qu'ils devaient pouvoir contenir l'équivalent du ¼ des volumes d'eau nécessaire pour le mois où les volumes d'irrigation seraient les plus importants. Sur cette base, et compte tenu du fait que les bassins devraient être remplis 3 fois durant le mois, le débit passant à chaque point de l'aqueduc a été estimé et utilisé pour le dimensionnement des tuyaux et systèmes de pompes requis.

Au total, ce serait donc une quinzaine de bassins d'irrigation qui devraient être creusés et étanchéifiés, pour un volume total de bassin à creuser de plus de 36 000 m³. Le réseau d'aqueduc doit aussi franchir l'autoroute, ce qui impliquerait un forage horizontal. François Durand, ing., a réalisé le dimensionnement de l'installation et a fait chiffrer le coût des infrastructures par un fournisseur de matériel. Ces infrastructures compteraient :

- Une pompe submersible et une pompe installée en surface pour maintenir la pression nécessaire dans le réseau
- Des variateurs électriques pour réduire l'impact sur le réseau du démarrage des pompes
- Près de 10 km de tuyau en polyéthylène à fusionner lors de l'installation et à enfouir, d'un diamètre variant de 3 pouces à 10 pouces suivant la localisation sur le réseau.

Afin de brosser un portrait le plus complet possible des coûts, nous avons estimé sur la base d'informations fournies par François Durand et sur la base des coûts documentés dans le guide du MAPAQ sur les étangs d'irrigations⁵ les autres coûts à prévoir :

- Le coût d'enfouir les tuyaux
- Le coût du forage horizontal sous l'autoroute
- Le coût de creusage et d'étanchéification des étangs

D'autres coûts supplémentaires seraient à prévoir, dont les coûts d'études et devis pour l'obtention des autorisations requises, le coût du raccordement électrique des pompes, les éventuelles coûts notariaux associés aux ententes de droit de passage, ainsi que tous les coûts associés aux raccords et autres matériels permettant de relier l'aqueduc aux étangs.

Le tableau 28 présente un budgétaire des coûts que nous avons pu obtenir pour les différents postes de dépense. Ainsi, pour approvisionner 150 ha irrigués annuellement, le coût d'investissement dépasserait un million de dollars.

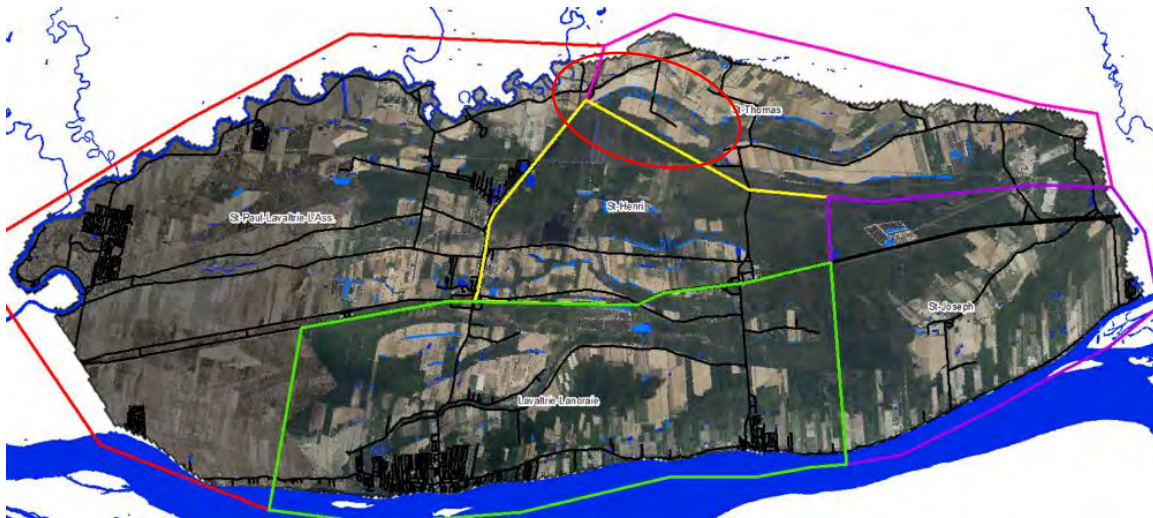


Figure 3 : localisation de la prise d'eau et du réseau de l'aqueduc

5

https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Formulaires/FI_amenagement_etang_irrigation_excave.pdf



Figure 4 : localisation de la prise d'eau (en rouge) et premier tracé de l'aqueduc

Tableau 28 : budgétaire des coûts d'un réseau d'irrigation pour 150 ha

	Coût unitaire
Fourniture des tuyaux (près de 10 km)	300 000.00 \$
Fusionner les tuyaux	15 000.00 \$
Forage horizontal sous l'autoroute (hypothèse de 100 m)	50 000.00 \$
Enfouir les tuyaux sur près de 10 km	60 000.00 \$
Pompe, surpresseur et drives	75 000.00 \$
Creuser et étanchéifier les étangs	700 000.00 \$
Total	1 200 000.00 \$

Même si ce budgétaire reste encore très hypothétique et fortement assujettis aux variations des coûts qui touchent les secteurs du génie et de la construction, cet ordre de grandeur permet d'informer le coût potentiel que pourrait représenter les scénarios d'approvisionnement durable de l'eau envisagés dans la section 2.4.3. Il est cependant très probable que le système envisagé dans l'exemple ci-dessus ne soit pas représentatif de la complexité de projets qui approvisionneraient en eau des champs situés à des distances plus importantes des sources d'eau possibles (fleuve et rivière L'Assomption), voir séparés par des obstacles naturels (tourbière...) ou anthropiques (voie ferrée, autoroute). Néanmoins, une règle de trois par rapport aux volumes qu'il faudrait combler selon les scénarios 1 à 4 donne un coût minimum d'investissement pour l'approvisionnement en eau compris entre 12 millions et 20 millions de dollars.

4. Conclusions et perspectives

Après deux projets (RADEAU et Scelaneau) visant à mieux caractériser les ressources et besoins en eau des producteurs agricoles du complexe tourbeux de Lanoraie, force est de constater que le défi d'un approvisionnement durable en eau dans ce territoire reste entier.

- Par les études conduites dans le cadre du projet Scelaneau, les besoins en eau ont été caractérisés de façon beaucoup plus précise, à la fois par l'enquête auprès des producteurs agricoles et par la modélisation réalisée par l'université McGill.
- Les ressources en eau disponibles dans les cours d'eau ont également été caractérisées plus finement, notamment via les suivis hydrologiques réalisés pendant le projet par l'IRDA et par la tentative de modélisation des débits avec le modèle SWAT. Une poursuite de ces suivis et des travaux de modélisation permettrait d'obtenir une meilleure confiance dans les données et de pouvoir statuer sur les volumes qu'il serait possible de prélever de façon durable dans les cours d'eau qui traversent le territoire sans affecter l'écosystème, ce type de prélèvement restant le plus simple et moins coûteux pour les producteurs agricoles.
- Les ressources en eau souterraines sont également mieux comprises, et en particulier l'impact des prélèvements dans les étangs sur les niveaux des nappes de surface dans l'aquifère sableux et éventuellement sur le niveau de l'eau dans la tourbière. Si un impact local de prélèvements réalisés dans un étang situés à proximité de la tourbière a été observé, l'impact des prélèvements situés à des distances plus importantes de la tourbière sur le niveau d'eau dans la tourbière semble moins évident, si ce n'est un impact cumulatif (non lié à un prélèvement en particulier mais à une concentration dans un territoire de beaucoup de prélèvements).
- Dans ce contexte, et en l'absence de règles précises qui seraient édictées par les pouvoirs publics responsables de la gestion de la ressource, il est impossible de statuer sur les volumes qui peuvent être prélevés de façons durables des différentes sources d'eau de surface et souterraine. L'application du principe de précaution, tel qu'envisagé dans le scénario 4 de ce rapport, impliquerait de trouver d'autres sources d'eau pour plus de deux tiers des prélèvements réalisés dans le territoire. Les coûts des investissements requis par un tel scénario atteindraient et dépasseraient surement 20 millions de dollars, somme que les producteurs agricoles du territoire ne pourront probablement pas assumer dans un contexte économiquement déjà très tendus pour les productions maraichères.
- La nécessité pour les producteurs de se conformer à la réglementation sur les prélèvements en eau dès l'année 2025 et d'obtenir un certificat d'autorisation pour leurs prélèvements, soulève beaucoup de questionnements. Comment, au regard des connaissances imparfaites exposées ci-dessus, seront analysées les demandes d'autorisations? Fournir une information aux producteurs sur la ligne de conduite que les pouvoirs publics décideront d'adopter pourraient permettre aux producteurs d'éviter des frais importants d'études et de montage de dossiers pour des demandes qui auraient peu de chance d'aboutir. Ces fonds pourraient être à la place investis dans des solutions d'approvisionnement durables.

ANNEXE 5 – Rencontre de producteurs – 2022-04-01



PROJET SCELANEAU

Rencontre de producteurs – 1 avril 2022

Québec 

Ce projet est financé dans le cadre du Programme d'appui à la lutte contre les changements climatiques en agriculture découlant du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques

irda

UQÀM



McGill
UNIVERSITY





PLAN DE LA PRÉSENTATION

1. Résumé du projet SCÉLANEAU et des objectifs
2. Objectifs de la rencontre
3. Présentation du suivi hydrogéologique (UQAM)
4. Présentation du suivi hydrométrique (IRDA)
5. Présentation des données des prélèvements d'eau des entreprises agricoles (FUPAL)
6. Présentation des analyses de McGill
7. Les prochaines étapes



RÉSUMÉ DU PROJET SCELANEAU

Projet PALCCA du MAPAQ: Programme d'appui à la lutte contre les changements climatiques en agriculture

Priorité 2b: Proposer des améliorations ou des modifications des modes d'approvisionnement et de gestion de l'eau, de manière individuelle ou collective, pour optimiser l'usage de l'eau disponible tout en limitant les répercussions sur les milieux humides limitrophes.

→ Projet spécifique à la tourbière de Lanoraie

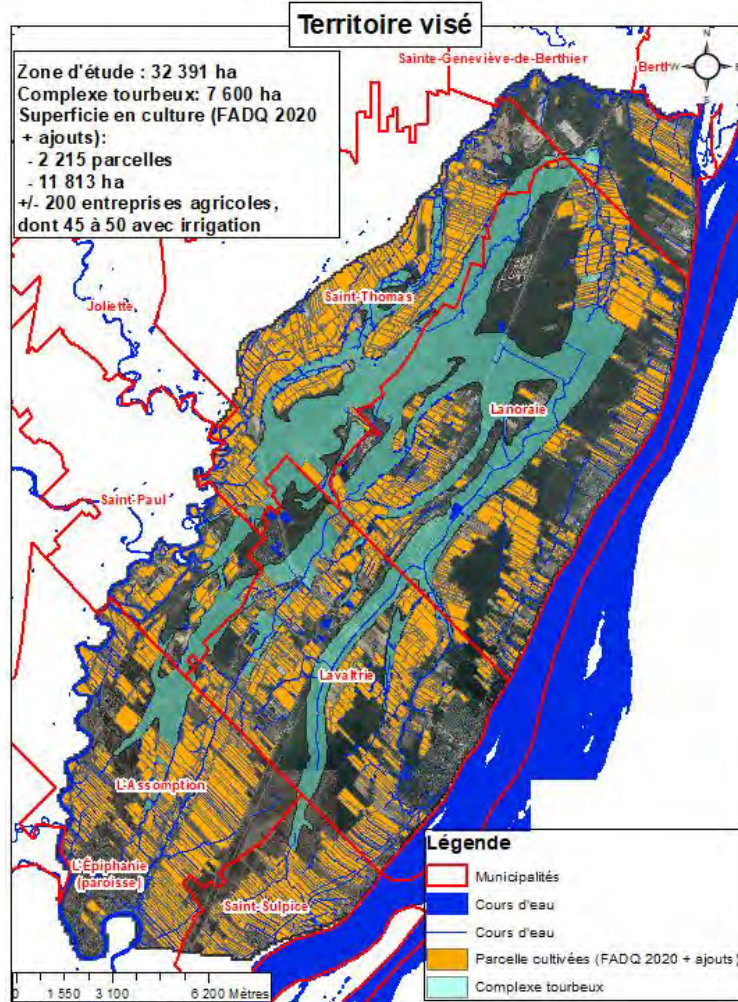
2021-2024

Collaboration entre FUPAL, Sylvestre Delmotte, UQAM, McGill et IRDA



Ce projet est financé dans le cadre du Programme d'appui à la lutte contre les changements climatiques en agriculture découlant du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques

LE COMPLEXE TOURBEUX DE LANORAIE





OBJECTIFS DU PROJET SCELANEAU

Développer et évaluer la faisabilité et la pertinence de scénarios techniques visant à concilier :

- les usages agricoles de l'eau (et des autres usagers)
- le maintien des fonctions hydrologiques du complexe tourbeux de Lanoraie
- ... sans oublier le contexte de changements climatiques.

5 volets:

- 1- Documenter les besoins en eau des entreprises agricoles (et autres préleveurs);
- 2- Caractériser l'hydrologie de surface et souterraine;
- 3- Modéliser l'hydrologie de surface et souterraine;
- 4- Documenter la faisabilité technico-économique et environnementale de 2 scénarios:
 - L'endiguement de certains secteurs (cours d'eau);
 - Développer un ou des réseaux d'adduction (rivières à proximité, fleuve St-Laurent);
- 5- Mobiliser et sensibiliser les entreprises agricoles pour participer au projet.



OBJECTIFS DE LA RENCONTRE

Objectifs de la rencontre d'aujourd'hui :

- État de situation de l'avancement du projet;
- Présentation des données préliminaires du suivi hydrologique, hydrométrique et des prélèvements d'eau des producteurs agricoles;
- Informer des suites du projet;
- Répondre à vos interrogations

Connexions aquifère-tourbière dans la région de Lanaoraie

Julien Chéné et Marie Larocque



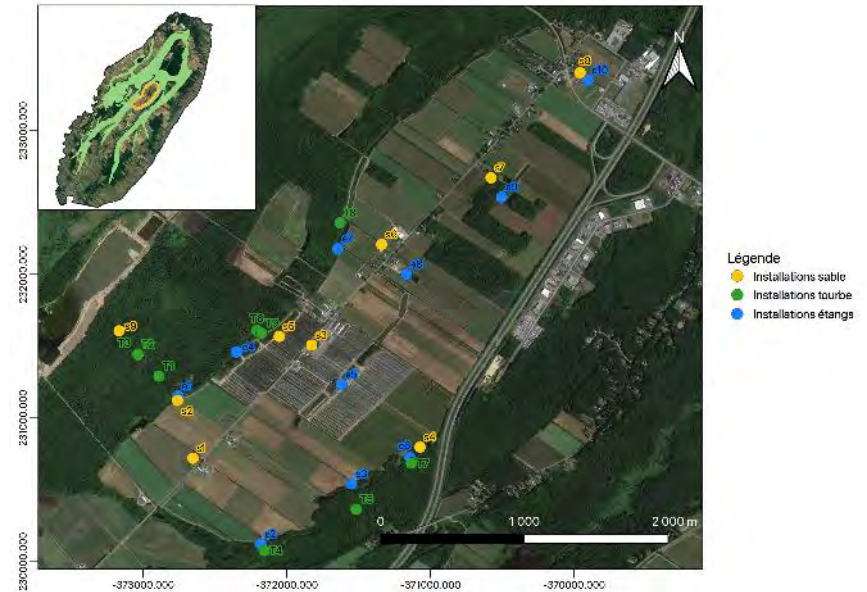
Objectifs de la maîtrise (projet J. Chéné)

1. Comprendre la dynamique des niveaux d'eau dans l'aquifère, dans les étangs et dans la tourbière
2. Quantifier la connectivité aquifère-tourbière



INSTRUMENTATION

- Zone étudiée : Coteau Saint-Henri
- Sondes de pressions pour mesurer les niveaux de nappe
 - 9 piézomètres et sondes dans la tourbière
 - 9 piézomètres et sondes dans le coteau sableux
 - 10 sondes dans les étangs agricoles



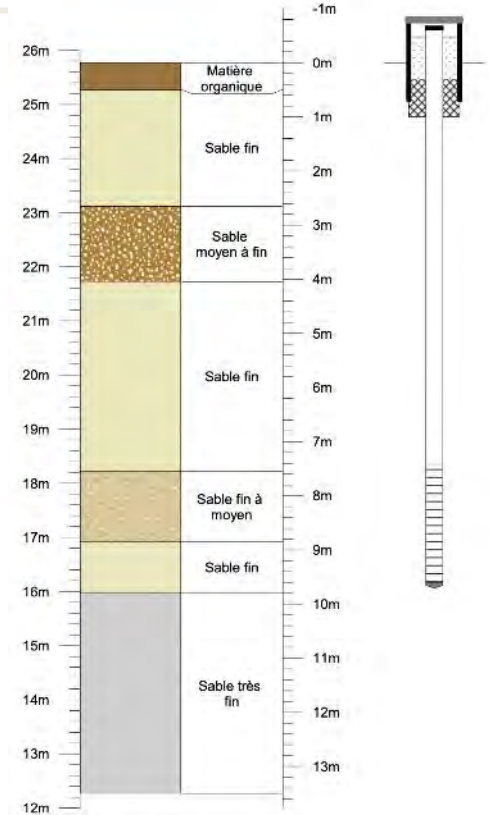
INSTRUMENTATION PUITES D'OBSERVATION DANS LE SABLE



- Analyse granulométrique
- Log stratigraphique



Log stratigraphique du piézomètre S1



Instrumentation : tourbière

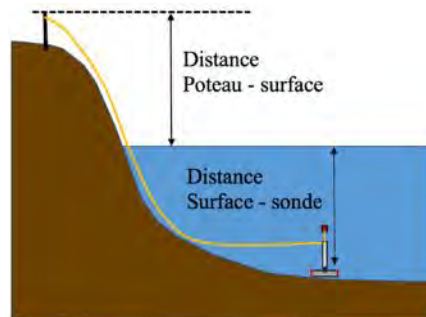
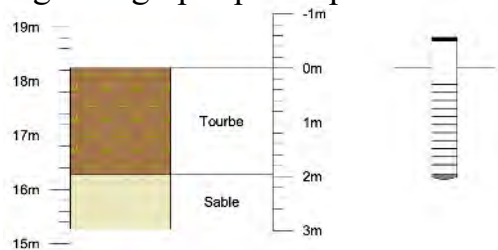


Instrumentation : étangs



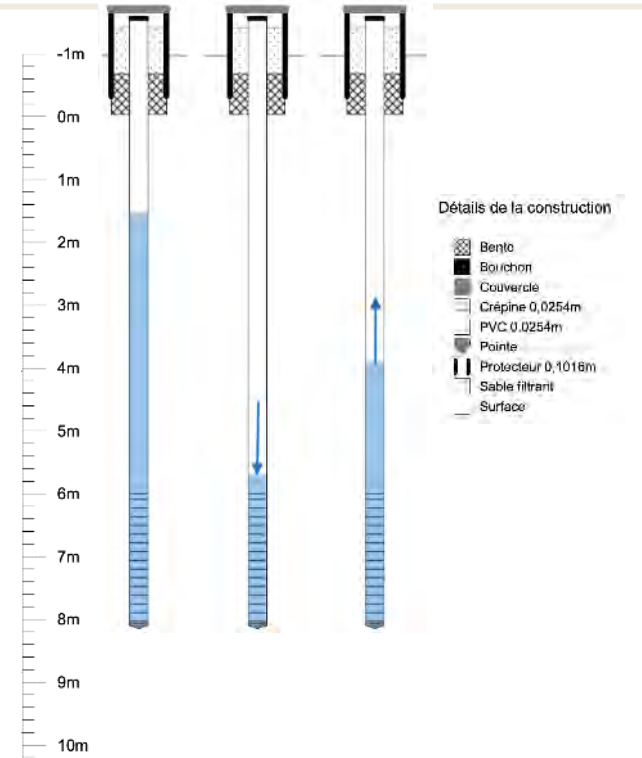
- L'effet des pompes est visible dans les étangs et dans la nappe voisine.
- Les niveaux dans la tourbière ont été très bas et n'ont remonté qu'en novembre 2021.

Log stratigraphique du piézomètre T1

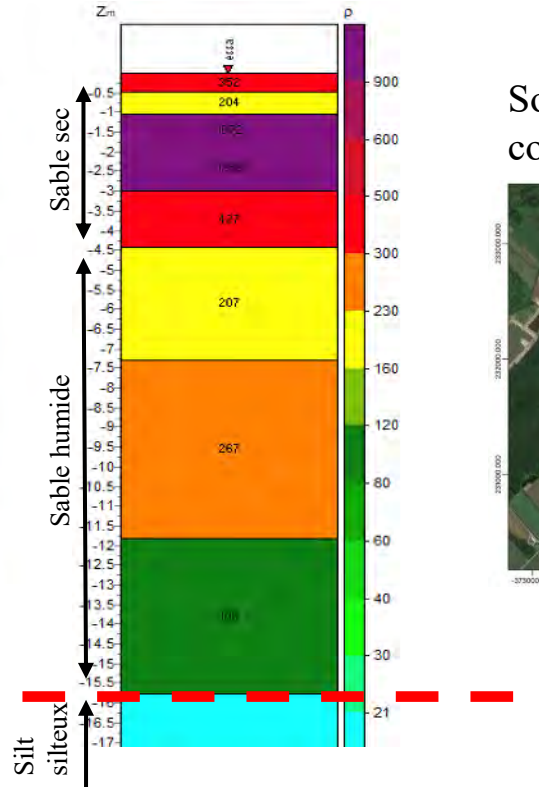
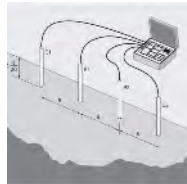
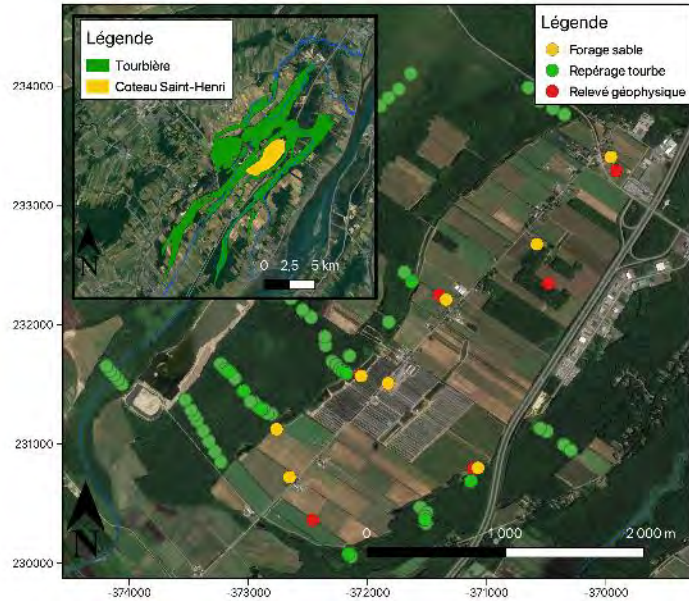


EXPÉRIMENTATION : ESSAIS HYDRAULIQUES

- Essais hydrauliques dans les 8 piézomètres forés du coteau sableux
 - 80 essais à charge variable pneumatiques (10 par piézomètre)
 - Traitement avec la méthode de Hvorslev
- ➔ Propriétés hydrauliques très uniformes



EXPÉRIMENTATION : SRATIGRAPHIE

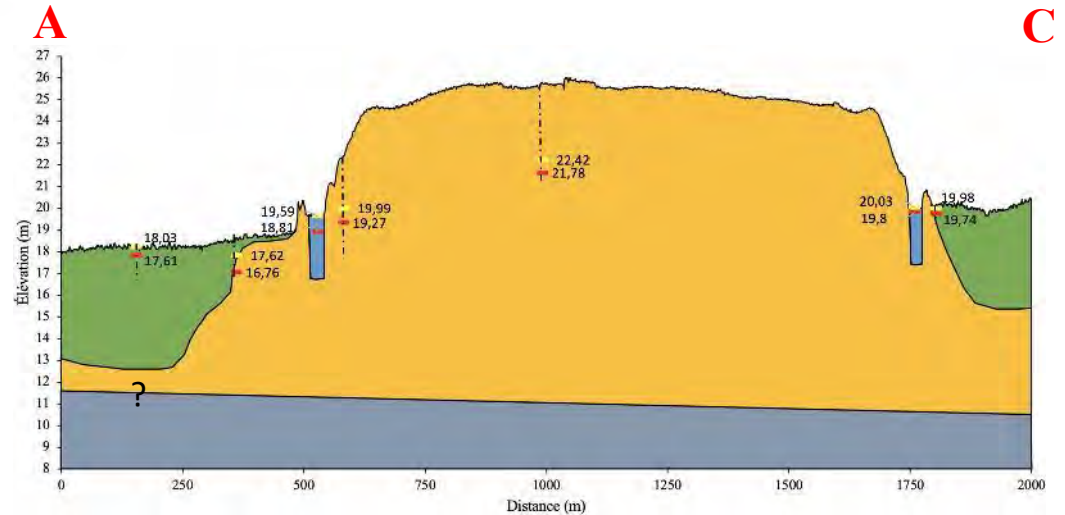
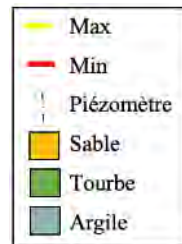
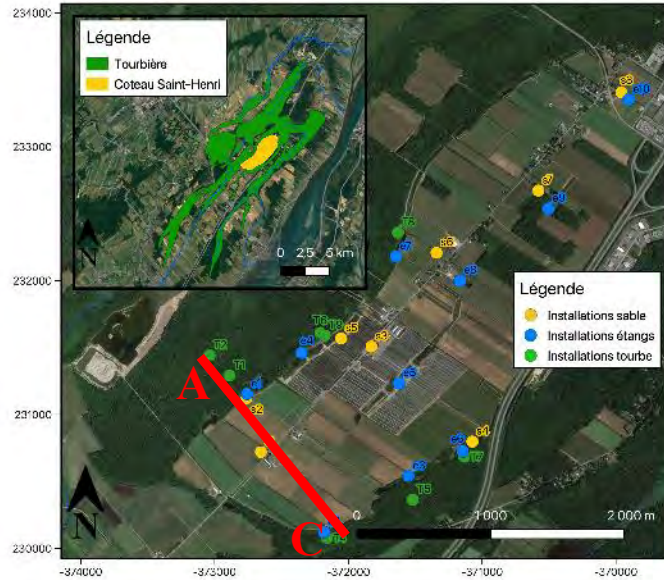


Sondage de résistivité sur le coteau Saint-Henri



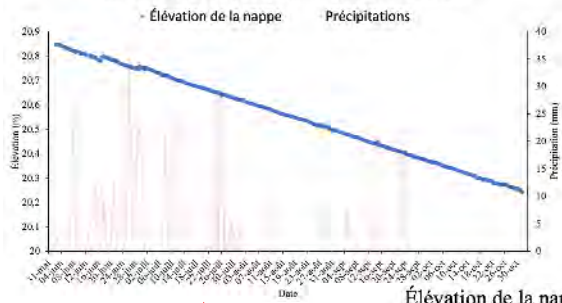
→ Profondeur du silt argileux à environ 16 m sous la surface

Analyses: coupe stratigraphique

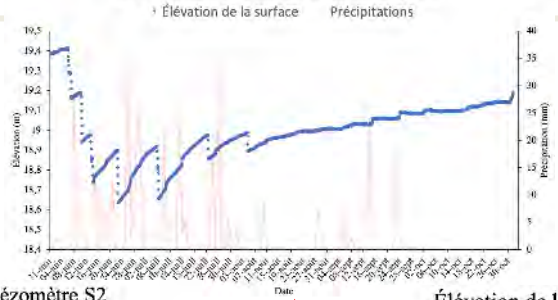


Analyses: niveaux d'eau

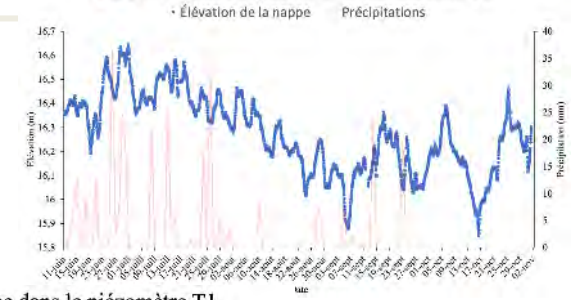
Élévation de la nappe au piézomètre S1



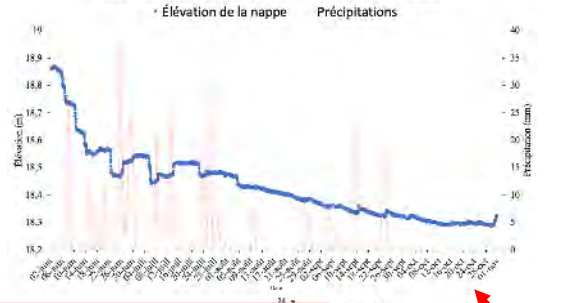
Élévation de la surface de l'étang E1



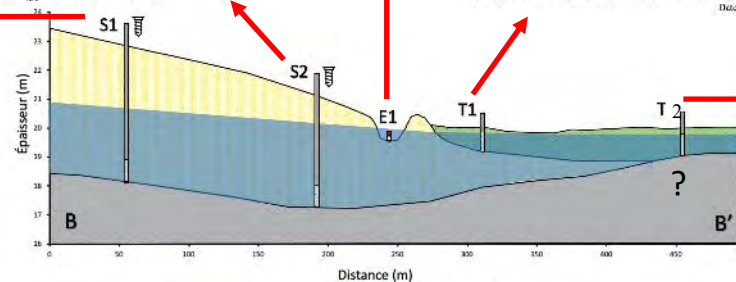
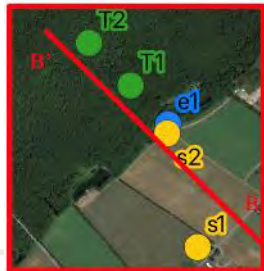
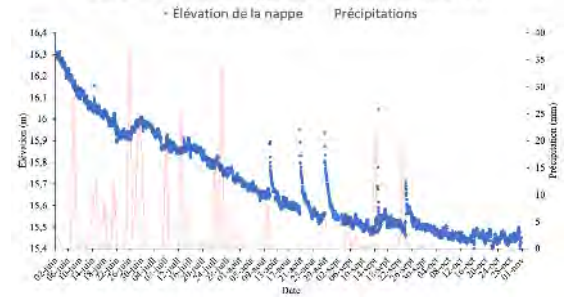
Élévation de la nappe dans le piézomètre T2



Élévation de la nappe au piézomètre S2



Élévation de la nappe dans le piézomètre T1



■ Sable ■ Argile ■ Tourbe ■ Aquifère ■ Géoprobe

Travaux planifiés pour 2023

- Validation des altitudes de toutes les stations
- Poursuite des suivis de niveaux
- Finalisation du modèle 3D de la zone d'étude
- Développement et calibration du modèle
- Quantification de la connectivité
- Sensibilité des flux à la météo et aux pompages



SUIVI HYDROMÉTRIQUE (VOLET 2) ET MODÉLISATION SWAT (VOLET 3)

ÉQUIPE IRDA

Arianne Blais-Gagnon, Colline Gombault, William Huertas et Simon Ricard

1 avril 2022



STATIONS HYDROMÉTRIQUES

- 4 stations
- Équipements (15 min):
 - HOBO (hauteur d'eau)
 - YSI (conductivité)
- Mesures ponctuelles de débits
- Pas de station sur la St-Antoine



STATIONS HYDROMÉTRIQUES



CAMPAGNES TERRAIN - OPÉRATIONS

- Année 2021

Date	Opération	Équipe
Avril (8)	installation des dispositifs et mesures de débits	IRDA
Mai (13)	comparaison des moulinets hydrologiques	UQAM et IRDA
Juillet (23)	mesures de débits	UQAM
Août (6)	mesures de débits	UQAM
Août (10)	mesures de débits et entretien des équipements	IRDA
Septembre (14)	mesures de débits	UQAM
Septembre (28)	mesures de débits	UQAM
Novembre (1 ^{er})	mesures de débits	UQAM
Novembre (16)	mesures de débits	UQAM
Novembre (30)	mesures de débits et enlèvement des sondes YSI	IRDA

CAMPAGNES TERRAIN – DÉBITS MESURÉS*

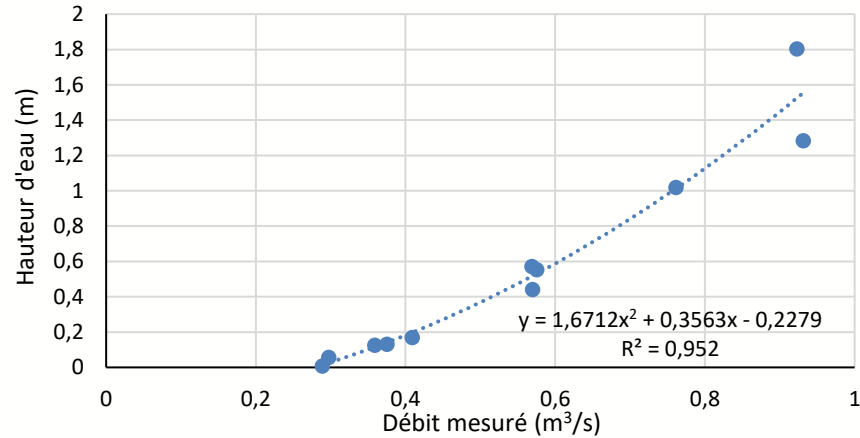
- Année 2021

Date	Saint-Joseph	Bras Sud-Ouest	Saint-Jean	Point du jour
Avril (8)	1,172	0,255	1,549	1,802
Mai (13)	0,414	0,172	0,640	0,553
Juillet (23)	0,114	0,040	0,157	0,130
Août (6)	0,010	0,015	0,026	0,056
Août (10)	0,051	0,027	0,030	0,007
Septembre (14)	0,082	0,036	0,104	0,124
Septembre (28)	0,128	0,064	0,069	0,169
Novembre (1 ^{er})	0,756	0,269	1,902	1,283
Novembre (16)	0,546	0,206	1,212	1,018
Novembre (30)	0,346	0,132	0,513	0,441
minimum	0,010	0,015	0,026	0,007
maximum	1,172	0,269	1,902	1,802
moyenne	0,362	0,122	0,620	0,558

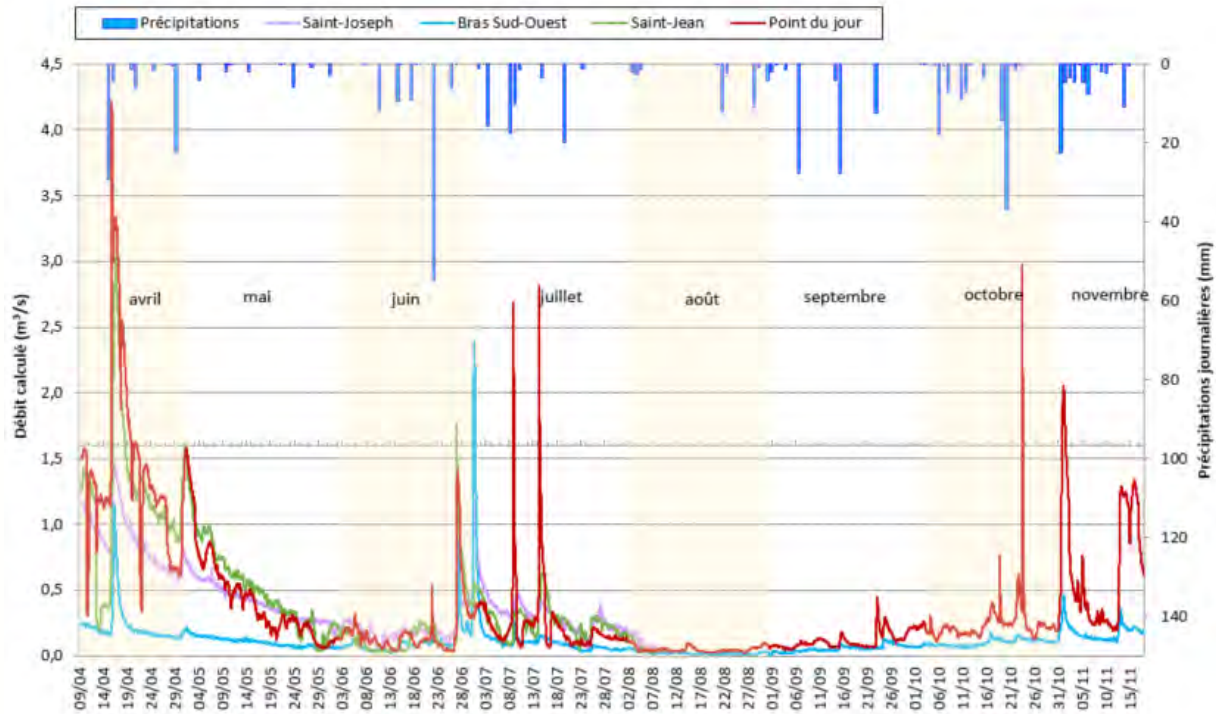
* m³/s

EXEMPLE DE COURBE DE TARAGE

Station Point du jour



HYDROMÉTRIE PRÉLIMINAIRE



CAMPAGNES TERRAIN – LA SUITE

- Année 2022

Moment ciblé	Opération	Équipe
Fonte des neiges	mesures de débits	UQAM
Après le pic de crue	installation des sondes YSI et mesures de débits	IRDA
Printemps	mesures de débits	UQAM
Été	mesures de débits et entretien des équipements	IRDA
Automne x 2	mesures de débits	UQAM
Début décembre	mesures de débits et enlèvement des sondes YSI	IRDA

MODÉLISATION SWAT - OBJECTIFS

Simuler les **bilans hydrologiques annuels** et saisonniers sur les 4 bassins principaux de la zone d'étude afin de **mieux évaluer la distribution de l'eau** dans **l'espace** (complexe tourbeux – coteaux sableux) et **le temps**, et **établir des scénarios** de gestion de la ressource en **climats actuel et futur**.

- Évaluer la recharge de l'aquifère
- Inclure les prélèvements d'irrigation dans le paramétrage

MODÉLISATION SWAT - SORTIES

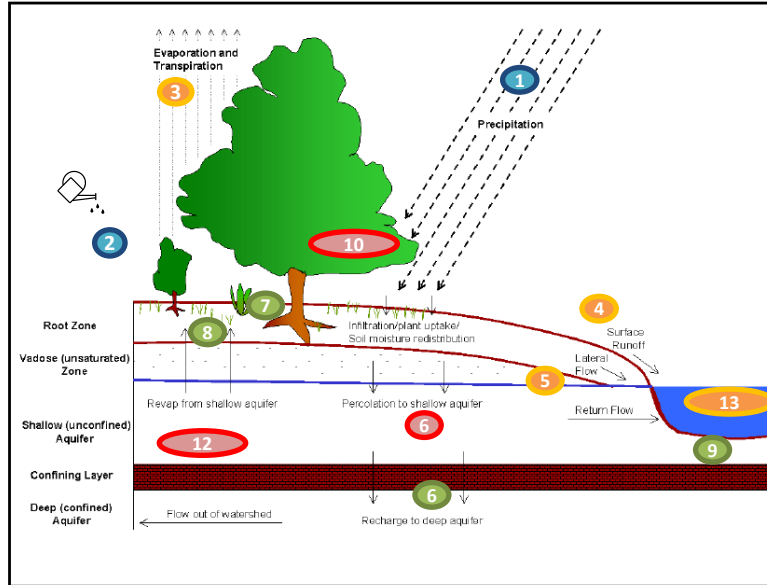


Figure 0.3: Schematic representation of the hydrologic cycle.

- : Connu et en entrée de SWAT - paramétrage
- : Mesurée/estimée – appuie calage de SWAT
- : Estimée par hypothèse - ajustement par calage pour bilan hydrique acceptable
- : Objectif – ce qu'on cherche à mieux estimer

- 1 - Précipitations (neige et fonte) } entrée
- 2 - Irrigation (selon la source) }
- 3 - Évapotranspiration potentielle et réelle
- 4 - Ruissellement de surface
- 5 - Écoulements souterrains
(Latéral + Aquifère peu profond + Drains)
- 6 - Recharge et
Stockage aquifères profonds et peu profonds
- 7 - Utilisation en eau du sol et des plantes
- 8 - Eau dans le sol (initial et final)
- 9 - Pertes par transmission (revient dans
aquifère)

10 - Stress hydrique

11 - Biomasse et rendement des
récoltes

12 - Hauteur de nappes

13 - Débits

MODÉLISATION SWAT – GRANDES LIGNES

- Mise en place du modèle

- Délimitation des bassins, sous-bassins et URH (unités de calcul principales)

- Paramétrage

- Propriété des sols, occupation du sol, opération prélèvements/irrigation

A

- Calage du modèle

- Bilan hydrique annuel à l'échelle des 4 bassins principaux de la zone d'étude
- Hydrogramme mensuel et journalier

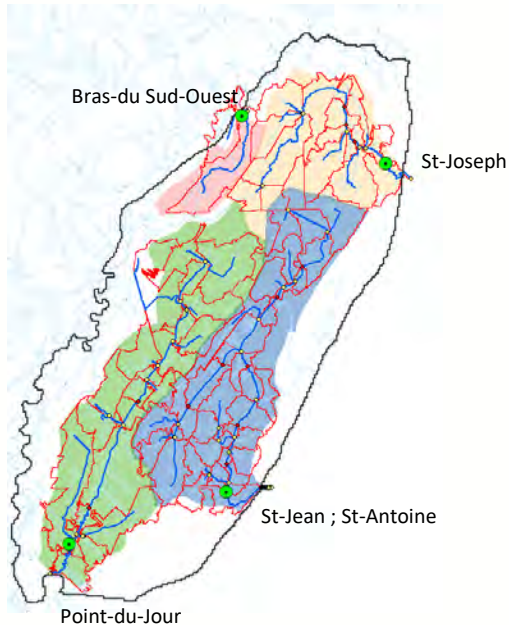
A

- Scénarios

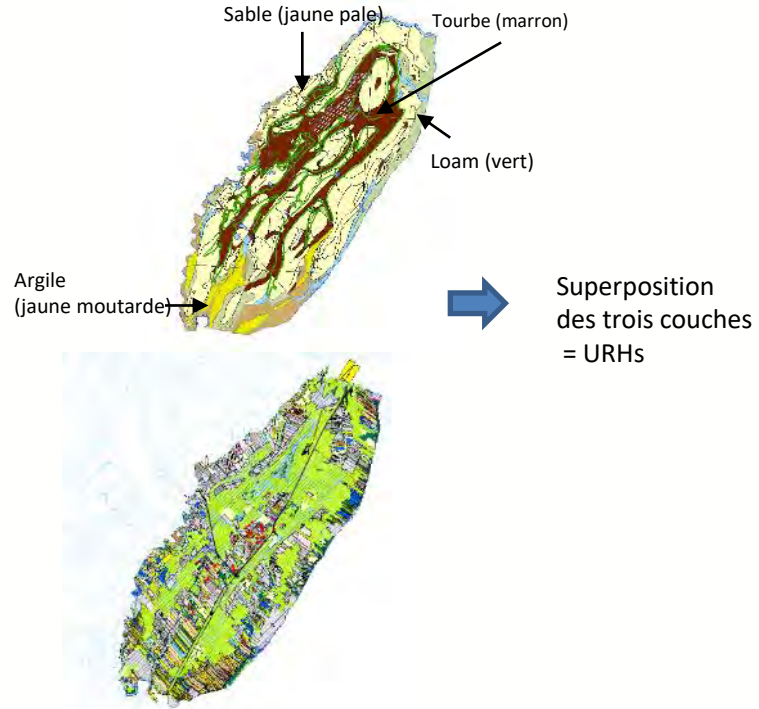
- Bilan hydrique avec irrigation (Stress, Déficit)
- Bilan hydrique sans irrigation (Disponibilité et recharge)

MODÉLISATION SWAT – MISE EN PLACE

Résultats très préliminaires



Rouge: 85 sous-bassins – délimitation préliminaire SWAT
Couleurs: Délimitation BDTQ



MODÉLISATION SWAT – PARAMÉTRAGE

Sols



- Texture
- Conductivité hydraulique
- Masse volumique apparente (BD)
- Groupe hydrologique
- Profondeur des couches
- Capacité en eau utile (AWC)

A UQAM, propriétés physico-chimiques tourbière

Occupation / irrigation



Distribution

- Type de culture
- Type d'irrigation
- Source d'irrigation
- Timing / consigne d'irrigation selon stress hydrique

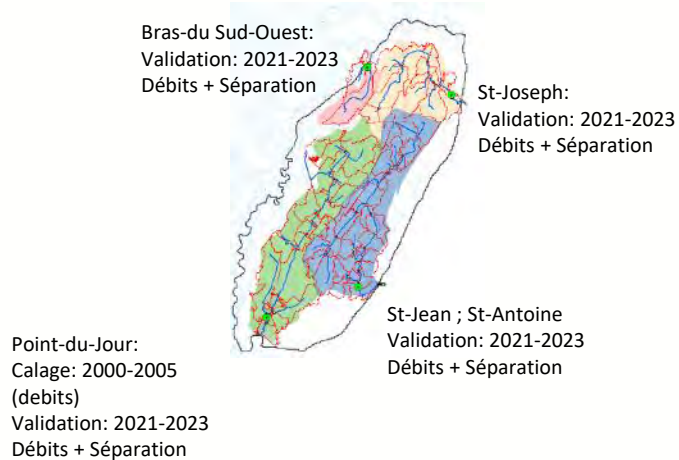
A FUPAL, sondage sur les prélèvements

A McGill, évaluation du stress déficit hydrique

MODÉLISATION SWAT – CALAGE

- Ajustement du bilan hydrique annuel **moyen**
 - Précipitations: connues (entrée du modèle)
 - Séparation des écoulements surf vs. sout: connue (mesures aux 4 stations)
 - Évapotranspiration: estimée (McGill)
 - Recharge et niveau de nappe: mesurés ponctuel (?) (UQAM)
- Ajustement des hydrogrammes journaliers et mensuels

A McGill, évaluation de l'évapotranspiration UQAM, mesures nappes, recharge (?)



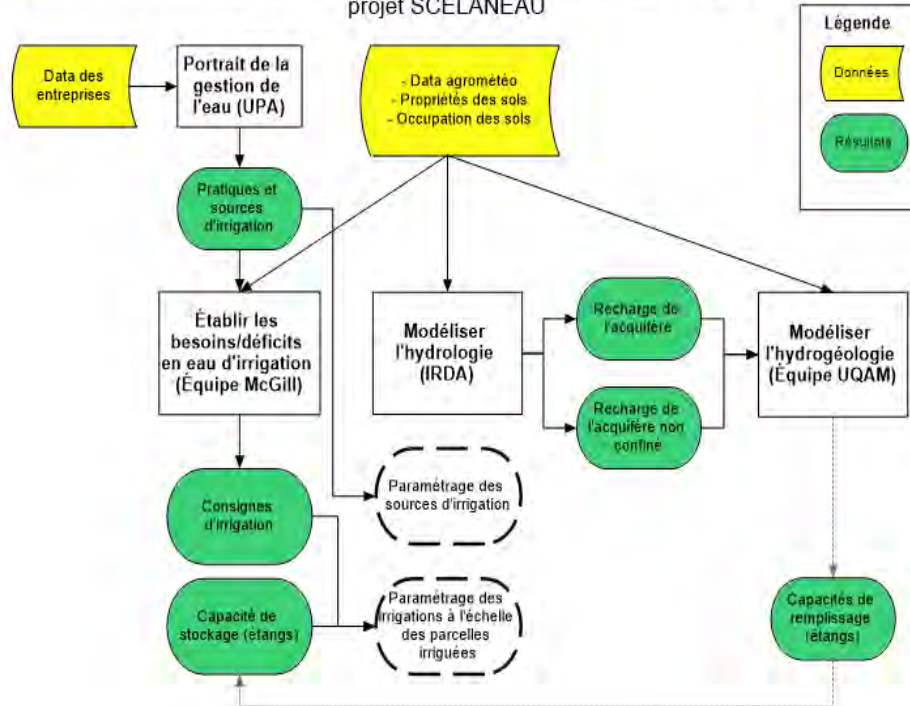
- Calage global pour les 4.
- Calage sur Point-du-jour
- Transfert des paramètres sur les 3 autres bassins et évaluation des biais et de la performance pour établir les limites.

MODÉLISATION SWAT – SCÉNARIO

- **Scénario actuel: déterminer la période de simulation**
 - [Analyse des bilans saisonniers, recharge, stress, etc.](#)
- **Scénario actuel sans prélèvements**
 - [Analyse des écoulements “naturels” et capacité en eau de la tourbière et des bassins](#)
- **Scénarios climatiques**
 - [Analyses des stress hydriques et recharges](#)

CCL ET SITUATION DANS LE PROJET

Perspectives d'arrimage des tâches, données sources et méthodes dans le cadre du projet SCELANEAU



Le partage des tâches:

- Portrait de gestion de l'eau
- Besoins et déficits en eau d'irrigation
- Modélisation de l'hydrologie de surface
- Modélisation de l'hydrogéologie

Les données sources en commun:

- Data de gestion de l'eau
- Data météo
- Data hydrométrique
- Data pédologique
- Data de l'occupation des sols

La concertation des méthodes:

- Consignes d'irrigation
- Capacité de stockage et renflouage des étangs
- Bilan hydrique-Méthode ETP
- Recharge aquifère non confiné et confiné

VOLET 1 - ENQUÊTE DES PRÉLÈVEMENTS D'EAU DES PRODUCTEURS AGRICOLES (FUPAL)

- 32 producteurs rencontrés (34 entreprises) sur 45 à 50 estimés;
- 4 911 ha « enquêté » sur 11 813 ha total cultivé (FADQ 2020 + ajout);
- Des 4 911 ha enquêté:
 - 4 750 ha irrigués dans la rotation;
 - 161 ha jamais irrigués

Cultures 2021	Nombre de producteurs rencontrés ⁴	Superficie enquêté (ha)	Superficie non enquêté (ha)	Superficie totale (ha)
Gazon	3	210		210
Petits fruits ¹	5	65	40	106
Vigne	1	11		11
Canneberges	3	256		256
Asperge	4	77		77
Arbres/arbustes	3	75	17	91
Pommes de terre	14	1 452	460	1 912
Courges	7	83		83
Maraîcher	4	189	198	388
Maïs sucré	4	41	84	125
Engrais vert non irrigué ²	17	1 584	202	1 786
Grandes cultures non irriguées ³	9	380	4 153	4 532
Culture inconnue		489	1 749	2 238
Irrigué		2 458	799	3 258
Non irrigué		1 964	4 354	6 318
Irrigation inconnue		489	1 749	2 238
TOTAL		4 911	6 902	11 813

¹ Bleuets, fraises, framboises, camerises, cerise de terre

² Seigle aut./millet, sarrasin, avoine-pois

³ Maïs, soya, céréales, haricot fin, foin

⁴ Total > à 32, car 1 producteur peut faire plusieurs cultures

VOLET 1 - SITES DE PRÉLÈVEMENT

- Les 32 producteurs exploitent 209 sites de prélèvement (irrigation et lavage).
 - 186 pour irrigation
 - 23 pour lavage et bassins de réserve

Type de prise d'eau	Nombre	%
Aqueduc	1	0%
Bassin	151	72%
Cours d'eau	45	22%
Pointe	6	3%
Puits artésien	1	0%
Puits surface	5	2%
TOTAL	209	100%

VOLET 1 - MÉTHODE D'IRRIGATION

- Principales technologies d'irrigations utilisées:
 - Enrouleurs
 - Gicleurs
 - Pivots

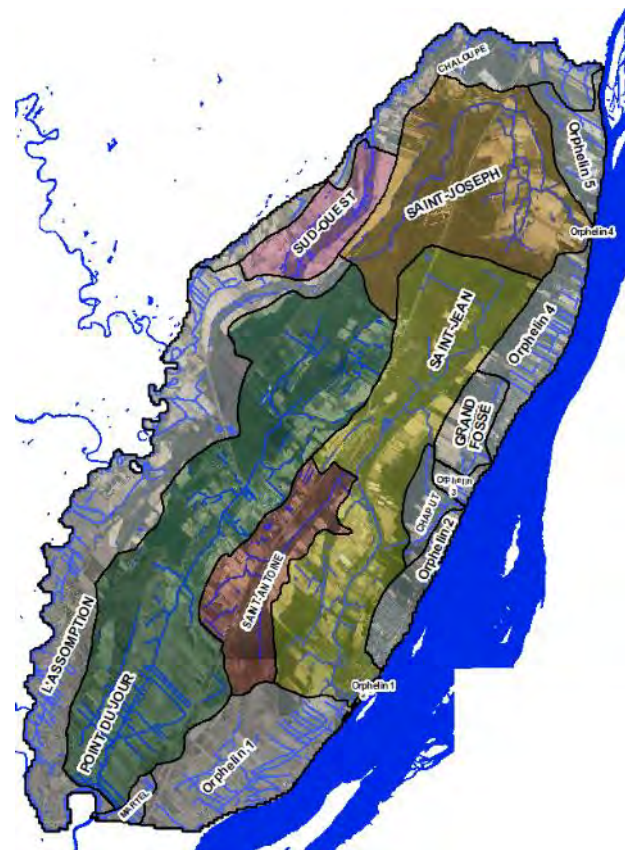
} > 87% superficie

Technologie d'irrigation utilisée	Nombre de site de prélèvement	Superficie (ha)	% superficie
Canon	1	3	0%
Gicleurs/Enrouleur/Goutte a goutte	1	7	0%
Goutte a goutte	1	6	0%
Pivot	1	9	0%
Pivot/Rampe	1	70	3%
Rampe	1	2	0%
Gicleurs/Goutte à goutte	10	115	4%
Rampe/Enrouleur/Gicleur	11	145	5%
Enrouleur	30	367	13%
Pivot/Enrouleur	32	957	34%
Gicleurs/Enrouleur	48	431	15%
Gicleurs	49	699	25%
Total	186	2 809	100%

VOLET 1 - RÉPARTITION SPATIALE

- Les bassins versants sur le territoire selon la base de données topographiques du Québec (BDTQ)

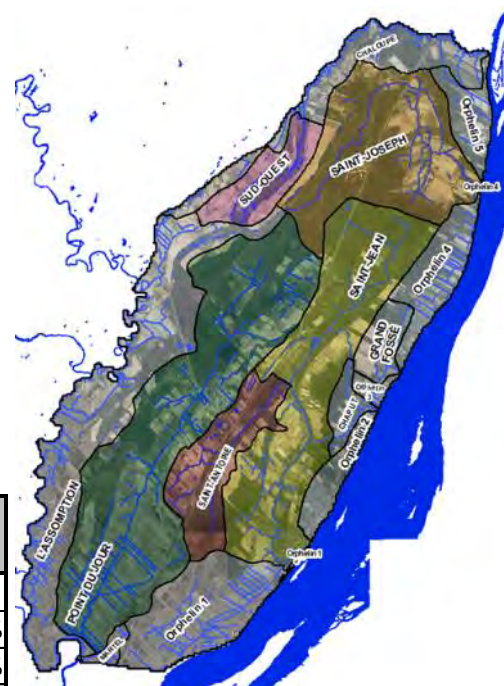
Bassin versant	Superficie cultivée (ha)	Superficie enquêtée (ha)	Nombre de site de prélèvement						TOTAL
			Aqueduc	Bassin	Cours d'eau	Pointe	Puits artésien	Puits surface	
Chaloupe	680	305		2	2	1			5
Chaput	113	68		2					2
Grand fossé	176	134		1					1
L'Assomption	1 844	607	1	25	2		1		29
Martel	103								
Orphelin 1	1 188								
Orphelin 2	96	20							
Orphelin 3	91	59							
Orphelin 4	400	15							
Orphelin 5	117	4							
Point du Jour	3 123	1 086		58	12	1		4	75
Saint-Antoine	478	277		12	4				16
Saint-Jean	1 578	901		20	15	2		1	38
Saint-Joseph	1 193	819		14	7	1			22
Sud-Ouest	634	616		17		1			18
Hors territoire visé					3				3
TOTAL	11 813	4 911	1	151	45	6	1	5	209



VOLET 1 - SUPERFICIES IRRIGUÉES

- 2 750 ha irrigués annuellement
 - 71% bassins
 - 29% cours d'eau

Type de prise d'eau	Superficie annuelle irriguée (ha)										Total (ha)	Total (%)
	CHALOUBE	CHAPUT	GRAND FOSSÉ	L'ASSOMPTION	POINT DU JOUR	SAINTE-ANTOINE	SAINTE-JEAN	SAINTE-JOSEPH	SUD-OUEST			
Aqueduc												
Bassin	36	31	77	272	590	88	225	349	281	1 947	71%	
Cours d'eau	47			23	152	84	280	214		801	29%	
Pointe												
Puits artésien												
Puits surface												
Total	83	31	77	295	742	172	505	563	281	2 748	100%	



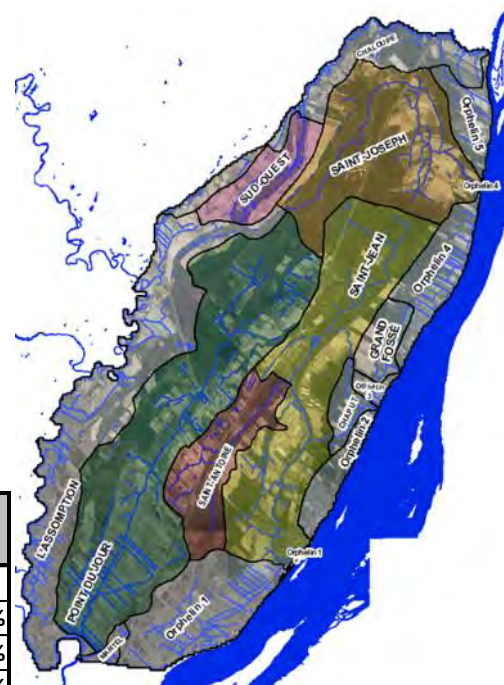
VOLET 1 - VOLUMES PRÉLEVÉS

- Prélèvement total annuel de 7,4 M m³
- Selon les producteurs rencontrés, lors des années particulièrement sèches: ↑25% et +

Type de prise d'eau	Prélèvement total annuel (m ³ /an)									Total (m ³)	Total (%)	
	CHALOUBE	CHAPUT	GRAND FOSSÉ	L'ASSOMPTION	POINT DU JOUR	SAINTE-ANTOINE	SAINTE-JEAN	SAINTE-JOSEPH	SUD-OUEST			
Aqueduc												
Bassin	90 907	74 375	374 900	561 804	1 762 888	228 865	649 806	904 380	655 966	5 303 890	71%	
Cours d'eau	130 512			38 060	325 259	250 557	919 338	463 406		2 127 132	29%	
Pointe	360				6 023		1 901	5 905	61	14 250	0%	
Puits artésien												
Puits surface					1 987					1 987	0%	
Total	221 779	74 375	374 900	599 864	2 096 157	479 422	1 571 045	1 373 691	656 027	7 447 259	100%	

Volume de lavage manquant

- Prélèvement total annuel estimé projet RADEAU = 7,8 M m³



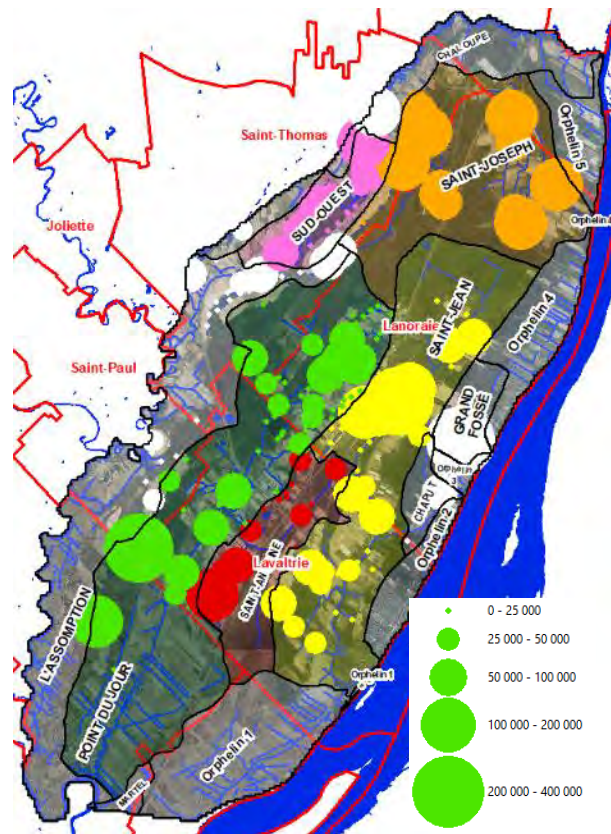
VOLET 1 - PRÉLÈVEMENTS PAR MOIS

- Ventilation des prélèvements totaux par mois

Type de prise d'eau	Prélèvement total mensuel (m³)												
	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Jun	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Total
Aqueduc													
Bassin				750	435 151	1 220 113	1 895 728	1 159 330	204 655	213 594		174 570	5 303 890
Cours d'eau					33 145	545 091	927 591	478 928	57 069	21 045		64 262	2 127 132
Pointe	587	587	587	1 473	1 503	1 503	1 646	1 649	1 651	1 715	761	587	14 250
Puits artésien													
Puits surface						22	310	690	690	277			1 987
Total	587	587	587	2 223	469 799	1 766 729	2 825 275	1 640 597	264 065	236 631	761	239 419	7 447 259
% volume total	0%	0%	0%	0%	6%	24%	38%	22%	4%	3%	0%	3%	100%

VOLET 1 - PRESSION DES PRÉLÈVEMENTS SUR LES RESSOURCES

- Répartition spatiale des prélèvements
 - Le diamètre du cercle indique un volume prélevé plus ou moins important



VOLET 1 - CARACTÉRISATION DES PRATIQUES D'IRRIGATION

- Hauteur d'irrigation moyenne annuelle par culture
- Hauteur moyenne toutes cultures confondues: 22,3 cm/an, soit 223 mm/an

Cultures 2021	Hauteur d'irrigation moyenne annuelle (cm/an)
Maraîcher	3,2
Courges	7,5
Maïs sucré	7,5
Vigne	11,4
Canneberges	13,9
Petits fruits	19,7
Asperge	22,3
Pommes de terre	22,3
Gazon	27,4
Arbres/arbustes	60,3



VOLET 1 - EXPÉRIENCE DES PRODUCTEURS

- Déclaration quant à la suffisance des ressources en eau : 19 répondants
 - 4 qui n'ont aucun problème (maraichers diversifiés et petits fruits).
 - 8 qui n'en ont pas manqué dans le passé mais qui ont craint et craignent d'en manquer (maraichers diversifiés, pommes de terre, petits fruits) : niveaux d'eau très bas dans les étangs et cours d'eau lors d'épisodes de sécheresses ces dernières années.
 - 7 qui en ont manqué au cours des dernières années (pommes de terre en majorité) : niveau trop bas dans les cours d'eau ou étang à sec.

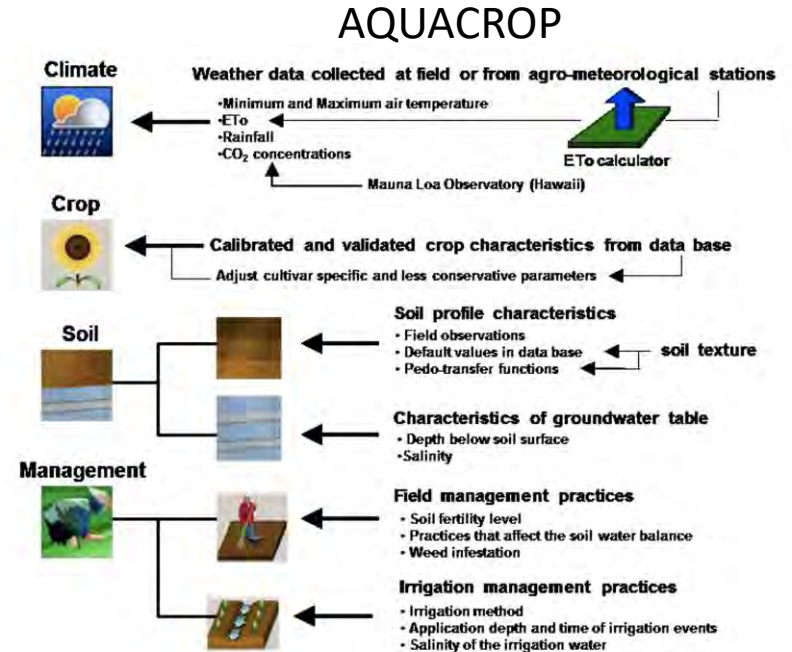
VOLET 1 - ÉVALUATION DES BESOINS EN EAU (MCGILL)

Objectifs :

- Déterminer les besoins en eau d'irrigation des principales cultures irriguées
- → Évaluer s'il serait possible de mieux gérer les ressources existantes : meilleurs calendriers d'irrigation, moment d'application, usage de capteurs d'humidité du sol...

Méthode :

- Analyse du climat passé (Meaghan Killmartin)
- Modélisation avec Aquacrop des besoins en eau actuel et futur des principales cultures irriguées



VOLET 1 - ANALYSE DU CLIMAT

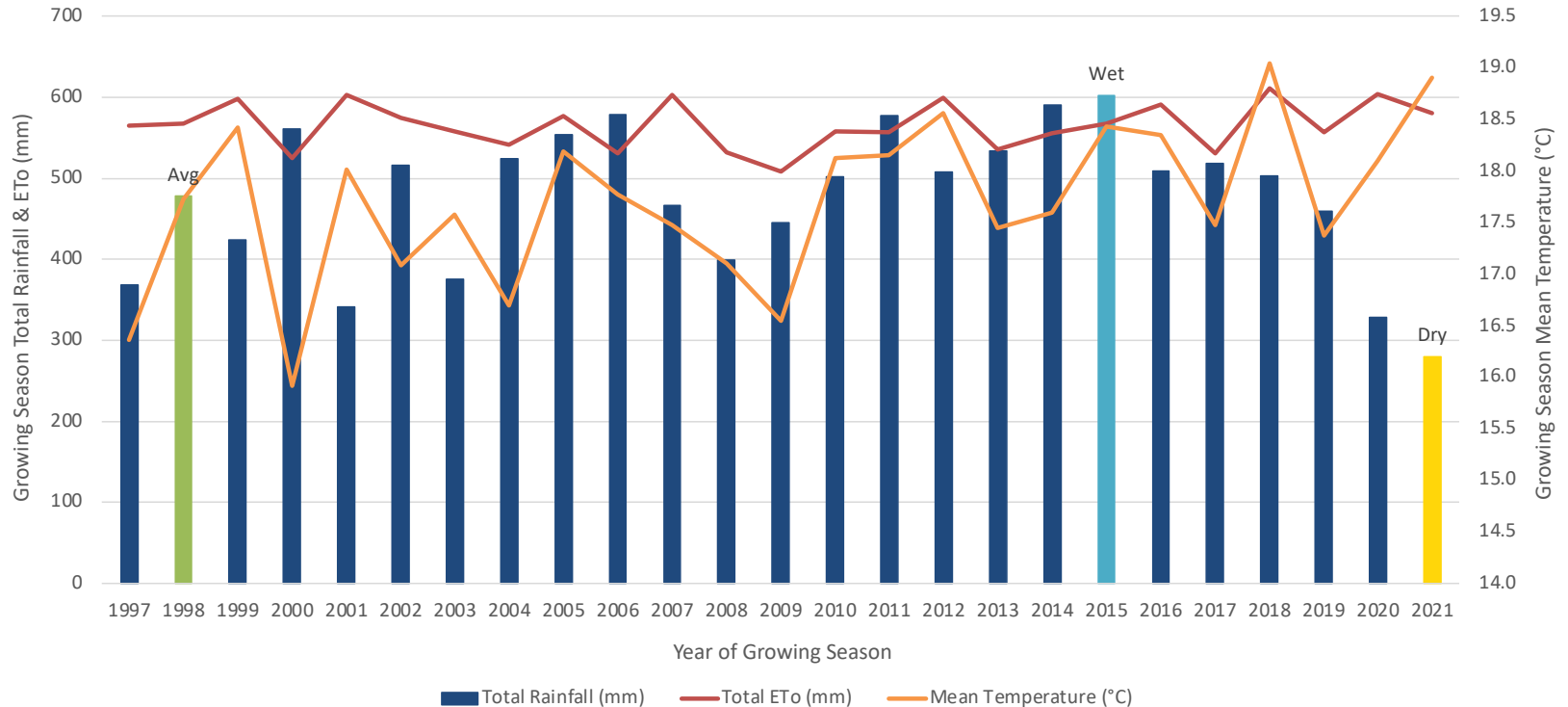
Year	Growing Season Total Rainfall (mm)	Growing Season Mean Temp (°C)	Growing Season Total ETo (mm)	Growing Season Total ETc – Potato (mm)
1997	368.5	16.4	565.8	467.0
1998	478.4	17.7	568.2	452.7
1999	423.8	18.4	598.6	478.9
2000	561.2	15.9	525.1	426.5
2001	341.6	18.0	603.7	491.0
2002	516.1	17.1	574.8	484.6
2003	375.4	17.6	558.1	457.5
2004	524.7	16.7	541.9	432.1
2005	554.6	18.2	577.3	479.5
2006	578.6	17.8	531.3	442.2
2007	466.2	17.5	603.4	473.3
2008	399.8	17.1	532.3	426.7
2009	445.2	16.6	508.3	412.4
2010	502.3	18.1	558.8	460.1
2011	577.4	18.2	557.1	464.5
2012	508.5	18.6	600.0	502.3
2013	533.6	17.5	536.0	427.7
2014	591.3	17.6	555.3	453.7
2015	602.4	18.4	567.5	445.6
2016	508.8	18.3	590.9	485.0
2017	518.3	17.5	530.7	428.9
2018	503.3	19.0	611.9	501.5
2019	459.1	17.4	557.3	468.6
2020	328.3	18.1	603.9	491.8
2021	279.9	18.9	580.8	463.0
AVG	477.892	17.7	565.6	460.7

Growing Season	(May 1-Sept 30)
Wet year	602.4
Dry year	279.9
Avg year	478.4

- Données météorologiques de l'Assomption
- Évapotranspiration potentiel (ETo) estimé par le modèle Penman-Monteith
- Évapotranspiration actuel (ETc) estimé pour la pomme de terre avec la coefficient de culture (Kc)

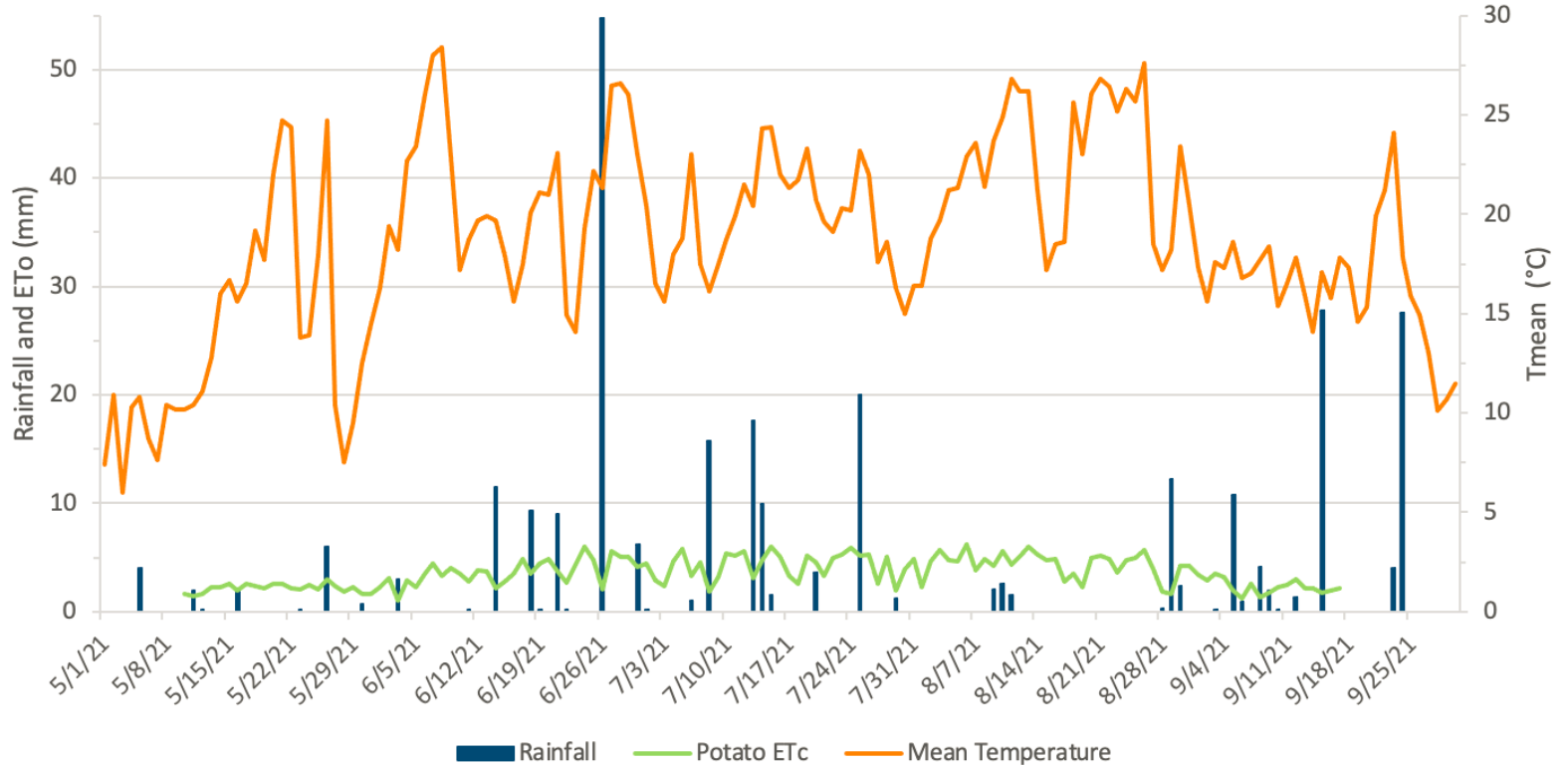
VOLET 1 - ANALYSE DU CLIMAT

Weather Data over the Growing Season (May 1 - Sept 30)
for the Last 25 Years



VOLET 1 - ANALYSE DU CLIMAT

Daily Weather Data –Dry Year (2021)



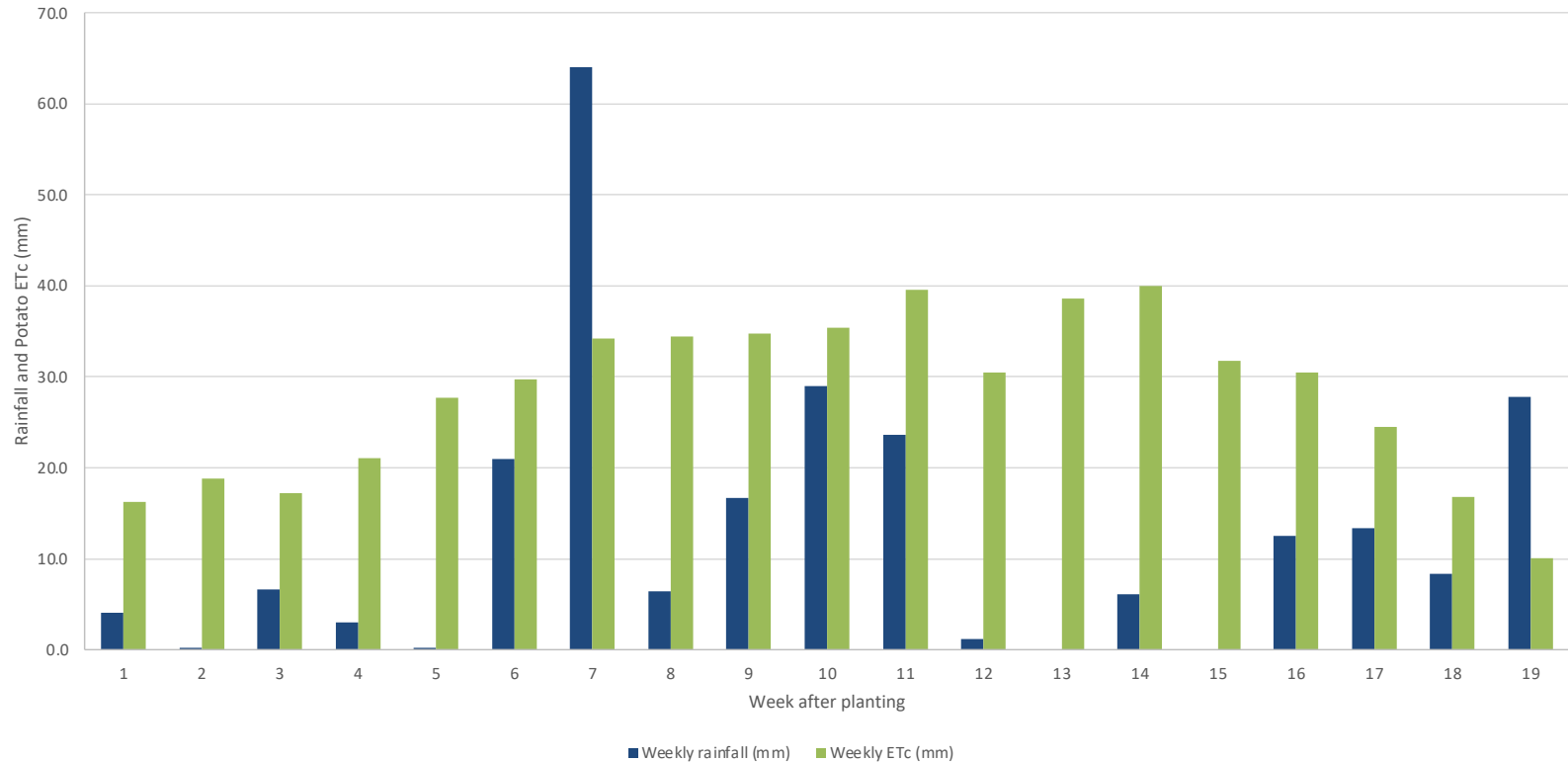
VOLET 1 - ANALYSE DU CLIMAT

Daily Potato ETc and ETo – Dry Year (2021)



VOLET 1 - ANALYSE DU CLIMAT

Weekly Rainfall and Potato ETC – Dry Year (2021)



VOLET 1 - ANALYSE DU CLIMAT

Potato Growing Season – Dry Year (2021)		
Week After Planting	Weekly Rainfall (mm)	Weekly Etc (mm)
1	4.1	16.3
2	0.2	18.9
3	6.7	17.2
4	3.0	21.0
5	0.2	27.7
6	21.0	29.7
7	64.0	34.3
8	6.4	34.4
9	16.7	34.7
10	29.0	35.4
11	23.6	39.6
12	1.2	30.5
13	0.0	38.6
14	6.1	40.0
15	0.0	31.8
16	12.5	30.5
17	13.4	24.5
18	8.4	16.8
19	27.8	10.0

Year	June-July Average daily ETc (mm)	June-July daily ETc range (mm)
1997	4.43	1.46 - 6.98
1998	3.81	1.22 - 7.02
1999	4.23	0.95 - 6.44
2000	3.88	0.65 - 6.67
2001	4.18	0.80 - 6.67
2002	4.12	0.78 - 7.56
2003	4.18	0.90 - 7.03
2004	3.93	0.65 - 6.56
2005	4.31	0.86 - 7.13
2006	4.06	0.69 - 7.59
2007	4.13	1.15 - 7.42
2008	3.77	0.95 - 7.02
2009	3.35	0.61 - 5.52
2010	4.01	0.60 - 7.67
2011	4.37	0.94 - 7.94
2012	4.55	0.80 - 8.05
2013	3.86	0.85 - 6.79
2014	4.09	1.01 - 7.02
2015	3.82	0.95 - 6.09
2016	4.25	0.73 - 7.36
2017	3.83	0.63 - 6.44
2018	4.64	0.70 - 8.74
2019	4.34	1.00 - 7.02
2020	4.56	0.70 - 7.71
2021	3.96	1.00 - 5.98
AVG	4.1	0.86 - 7.06



VOLET 1 - ANALYSE DU CLIMAT

Prochaines étapes :

Mai 2022: **Objectif 1.** Finaliser l'analyse climatique et déterminer l'évapotranspiration potentielle. Analyser les données de sol.

Juillet 2022: **Objectif 2.** Évaluer les besoins en eau d'irrigation avec le modèle Aquacrop en année moyenne et année sèche. Simuler les besoins en eau en contexte de changements climatiques (Scénarios)

Décembre 2022: **Objectif 3.** Croiser ces informations avec les données d'usage du sol (FUPAL) et de type de sol pour spatialiser les besoins en eau actuel et futur.



VOLET 4 – ÉTUDE DE SCÉNARIOS D'APPROVISIONNEMENT ET DE GESTION DE L'EAU (MCGILL)

Rappel des objectifs : Évaluer la faisabilité technico-économique, règlementaire, et environnementale de scénarios d'approvisionnement et de gestion de l'eau, alliant :

- La gestion des barrages existants et l'endiguement éventuel (où?, comment?) de certains secteurs de la tourbière afin de conserver davantage d'eau dans l'écosystème.
- L'adduction d'eau – de sources externes – rivière l'Assomption, fleuve St Laurent

En prenant en compte :

- Les conséquences potentielles sur l'écosystème tourbeux – une évaluation intégrée des impacts.
- Les conséquences et contraintes à la mise en place de telles infrastructures – qualité de l'eau, conséquences sur l'hydrologie, le fonctionnement de l'écosystème tourbeux, géochimie de l'eau de fleuve, l'évaluation intégrée des impacts.



VOLET 4 – ÉVALUATION DES BESOINS EN EAU

Méthode : intégration des informations issues des différents volets

- Prélèvements actuels (FUPAL), besoin en eau théoriques en climat actuel et en climat futur (Aquacrop): spatialisation des besoins en eau actuels et projections (en cours, décembre 2022)
- Ressources en eau (2023) :
 - Selon les résultats de l'analyse hydrogéologique (UQAM) : impacts des prélèvements dans les étangs, faisabilité de poursuivre, possibilité d'augmenter les prélèvements?
 - Selon les résultats de l'analyse hydrologique (IRDA) : impacts des prélèvements dans les cours d'eau, faisabilité de poursuivre les prélèvements (volume?), possibilité d'augmenter les prélèvements?
 - Possibilité par une régulation différentes des cours d'eau (gestion des barrages, ajout de nouveaux barrages?) de conserver davantage d'eau (faisabilité et conséquence hydrologique avec SWAT)
 - Utilisation de source d'eau alternatives : quels secteurs approvisionner avec quelle source? Quelles infrastructures nécessaires?



DÉROULEMENT/ÉCHÉANCIER DU PROJET

En continu:

- Suivi hydrométrique;
- Suivi hydrogéologique

2022:

- Poursuivre la documentation des prélèvements d'eau des producteurs agricoles (FUPAL);
- Finaliser le paramétrage SWAT et débiter la modélisation hydrologique (calibration) (IRDA);
- Paramétrage, calibration et modélisation hydrogéologique (UQAM);
- Arrimage des données entre les équipes;
- Documentation des autres préleveurs;

2023:

- Étude des scénarios de référence et climat futur et modélisation hydrologique;
- Analyse d'indicateurs des conditions de la tourbière
- Analyse de scénario d'approvisionnement d'eau, des équipements nécessaires et des coûts



AUTRES PRÉLÈVEMENTS / CAS PARTICULIER

- Autres prélèvements
 - Grands préleveurs (Entente à venir MELCC / McGill à confirmer)
 - Autres préleveurs (résidences, élevages, commerces, industries, etc)
- Sablière
 - Le propriétaire respecte son autorisation de la CPTAQ
 - Résolution de la municipalité de Lanoraie pour que le MELCC fasse enquête sur la sablière
 - La FUPAL fera des démarches auprès du MELCC pour que la sablière respecte son Certificat d'Autorisation (CA) qui ne lui permet pas de retirer de l'eau hors de son système.



Questions?

ANNEXE 6 – Rencontre de producteurs – 2023-03-14



L'Union des producteurs agricoles

PROJET SCELANEAU

Rencontre de producteurs

14 mars 2023



Ce projet est financé dans le cadre du Programme d'appui à la lutte contre les changements climatiques en agriculture découlant du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques





PLAN DE LA RENCONTRE

1- Mise à jour de l'état des connaissances à ce jour :

- Besoins en eau pour l'irrigation des cultures
- Suivi hydrologique des eaux souterraines
- Suivi hydrologique des eaux de surface

2- La réglementation actuelle du MELCCFP et les répercussions pour votre entreprise

3- Scénarios d'irrigation et piste de solution

- Bassins étanches
- Réseaux d'irrigation

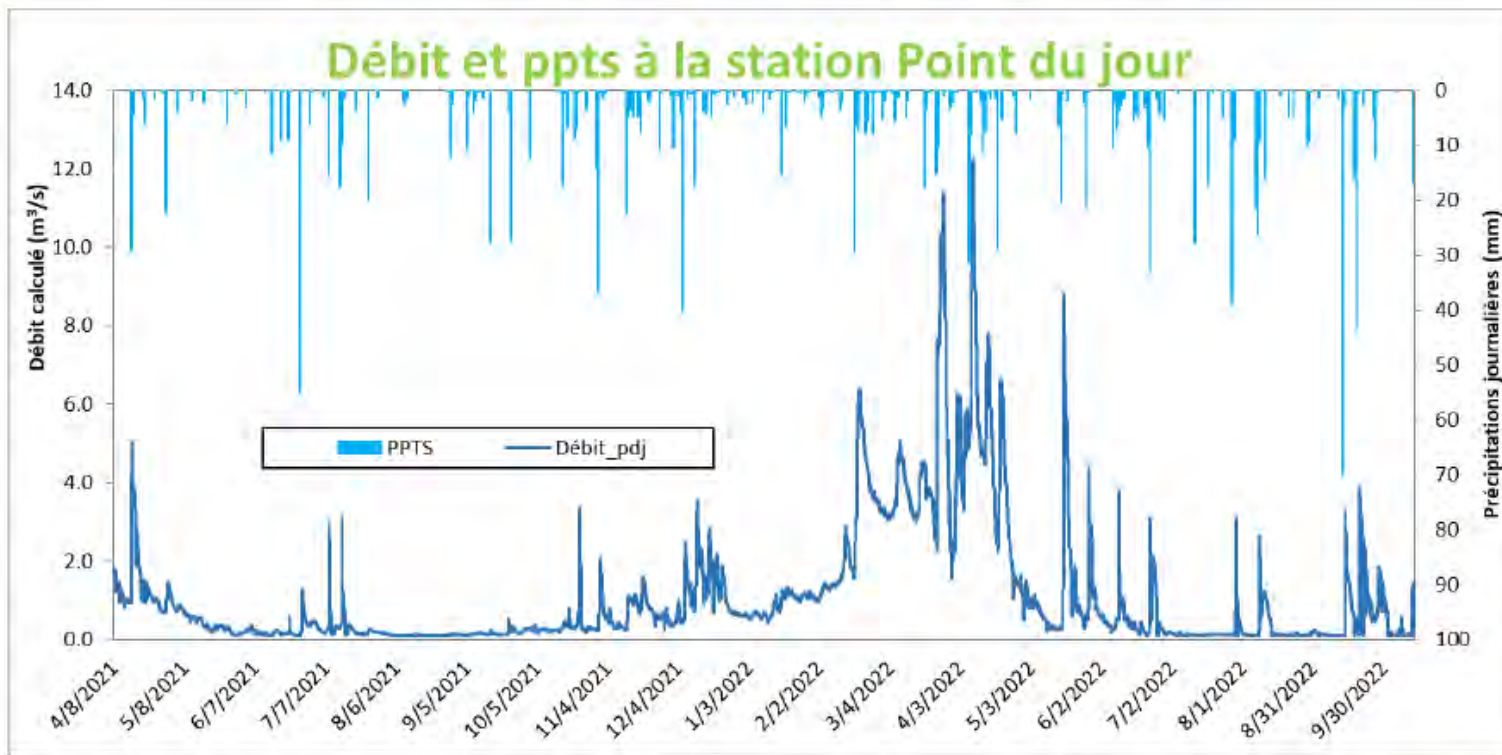
ÉTAT DES CONNAISSANCES À CE JOUR

→ Caractérisation des prélèvements d'eau

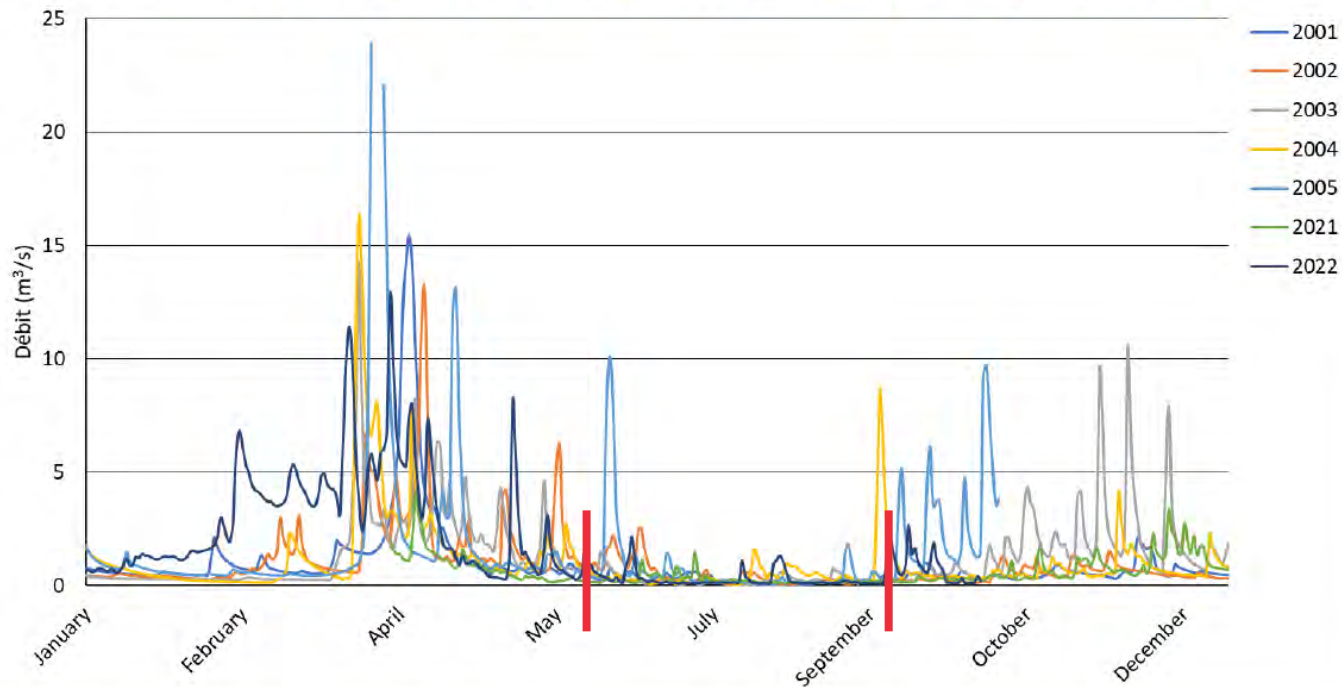
- 45 à 50 entreprises agricoles irriguent
- FADQ: 12 000 ha en culture
 - Estimation de 4 000 ha irrigué chaque année
- Caractérisation des prélèvements (2021)

Lieu de la prise d'eau	Nombre de producteur	Nombre de prise d'eau	Superficie moyenne irriguée annuellement (ha)	Volume moyen prélevé annuellement (m ³)	Volume moyen prélevé annuellement par ha (m ³ /ha)	Superficie bassin (ha)	Prl (%)
Cours d'eau *	18	42	809	2 140 843	2 646		28%
Bassin 0m-MH2022	22	64	841	1 955 593	2 325	47	26%
Bassin 0-30m-MH2022	25	53	687	2 025 093	2 948	53	27%
Bassin >30m-MH2022	19	34	455	1 429 659	3 142	29	19%
Sous-total bassin	30	151	1 983	5 410 345	8 415	129	72%
Grand total*	32	193	2 792	7 551 188	2 704		100%
					270 mm/ha/an		
Les plus critiques	40	106	1 650	4 096 436	4 971	47	54%

Débit et ppts à la station Point du jour



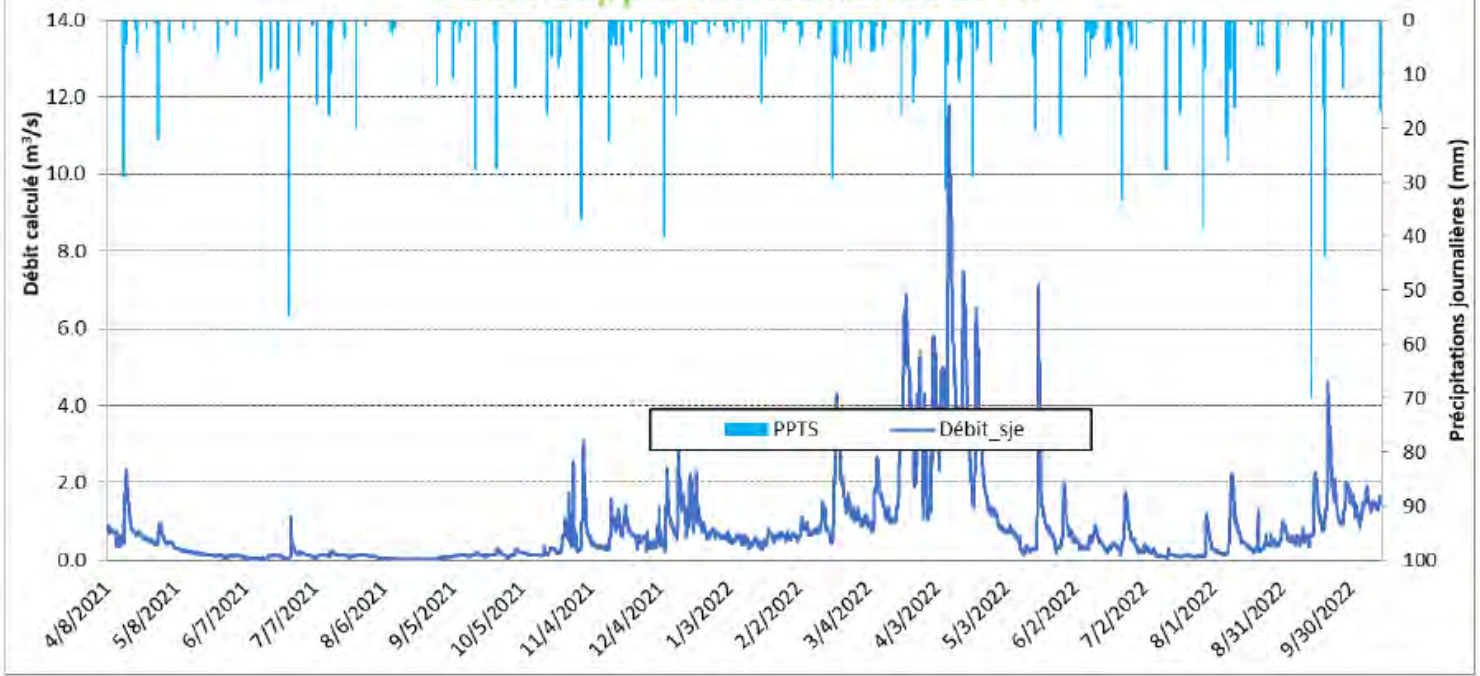
Débit station point du jour CEHQ (2001-2005) IRDA (2021-2022)



Année	Max Débit	Min Débit
2000	5.85	0.029
2001	15.45	0.0235
2002	13.23	0.0433
2003	14.3	0.038
2004	16.28	0.0339
2005	48.18	0.0411
2021	4.14	0.098
2022	12.88	0.11

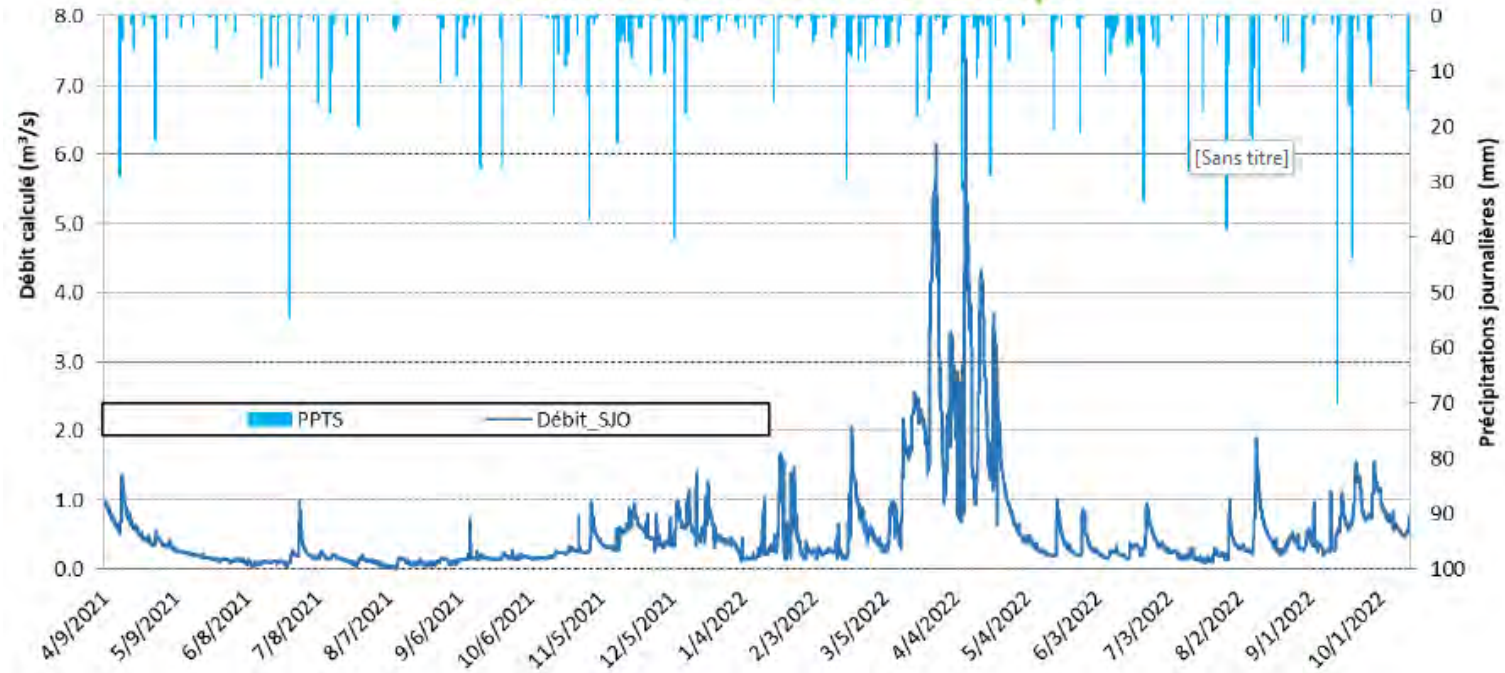


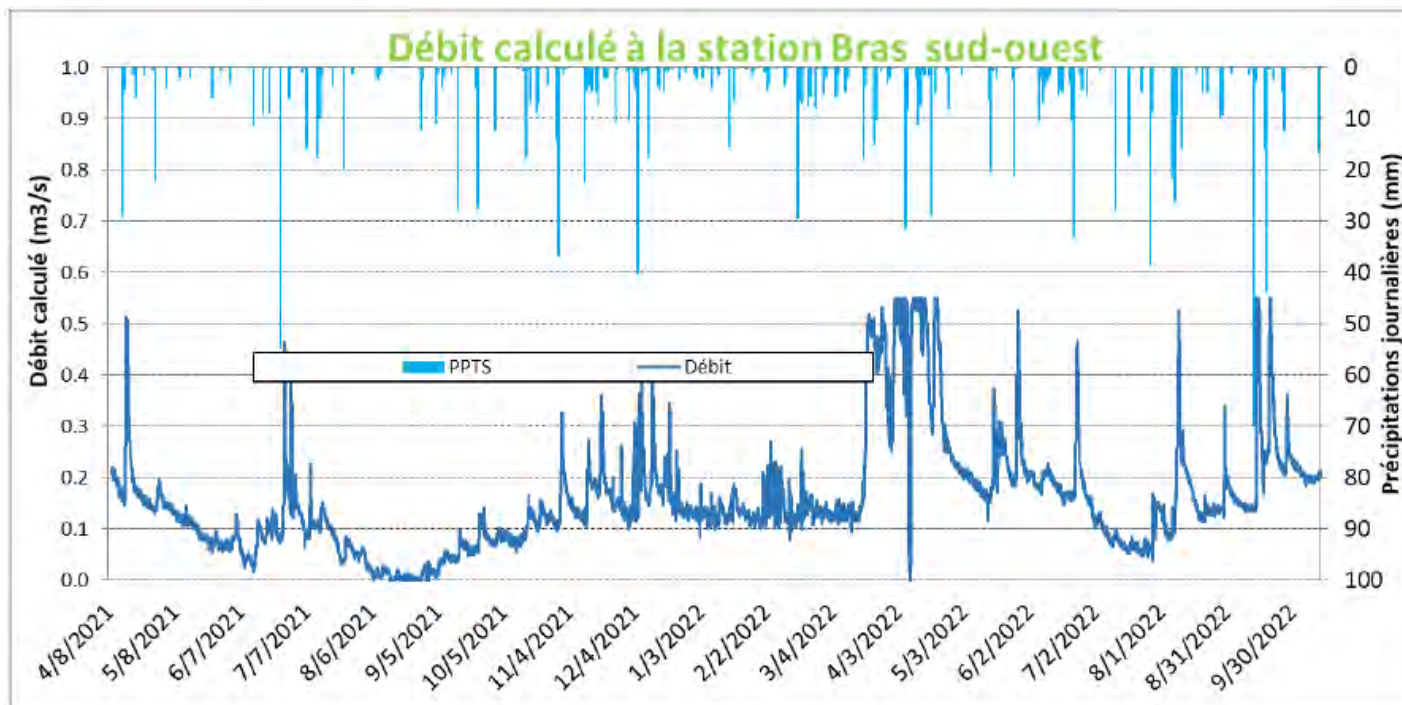
Débit et ppts à la station St-Jean





Débit calculé à la station St-Joseph





VOLUME D'ÉCOULEMENT

Volume qui coule durant l'été dans les cours d'eau (m3)

	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	TOTAL
ST JOSEPH	767 901	576 890	513 650	712 024	1 118 388	3 688 853
ST JEAN	1 468 575	770 681	421 276	696 142	1 693 690	5 050 364
POINT DU JOUR	2 267 378	969 824	621 249	475 599	1 104 101	5 438 151
BRAS DU SUD OUEST	426 870	384 246	239 396	245 477	388 968	1 684 957

Pour un total de 15 800 000 m3 environ

Lieu de la prise d'eau	Nombre de producteur	Nombre de prise d'eau	Superficie moyenne irriguée annuellement (ha)	Volume moyen prélevé annuellement (m ³)	Volume moyen prélevé annuellement par ha (m ³ /ha)	Superficie bassin (ha)	Prl (%)
Cours d'eau *	18	42	809	2 140 843	2 646		28%

Soit 14% du débit total des cours d'eau qui est prélevé durant l'été

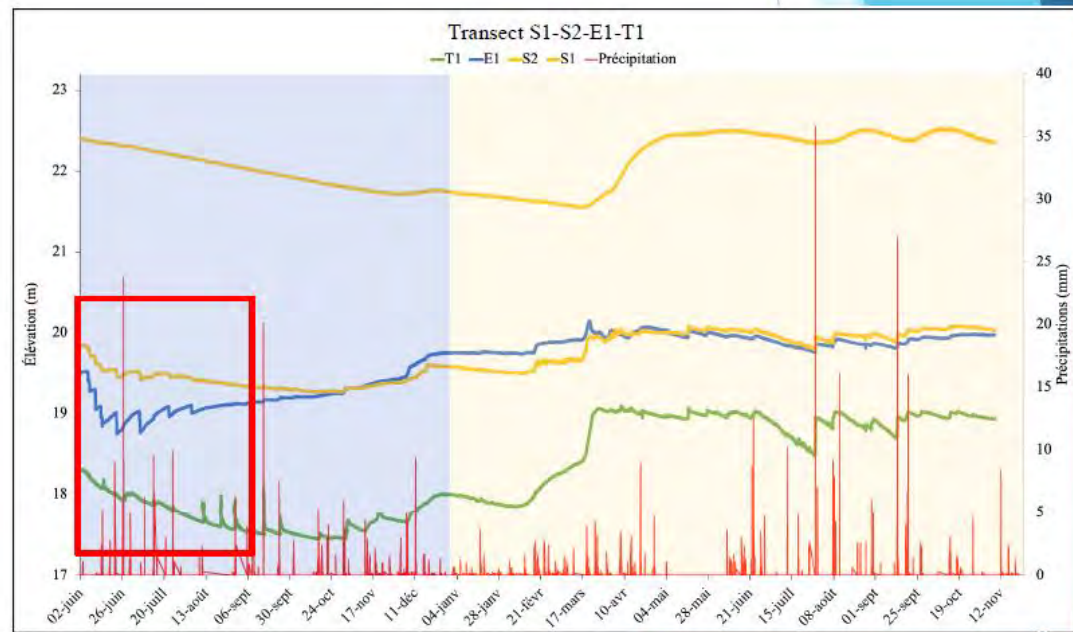


2022

- Pas d'irrigation
- Recharge observée lors des précipitations
- Niveau dans la tourbière descend plus rapidement que dans le sable et l'étang pendant le mois de juillet

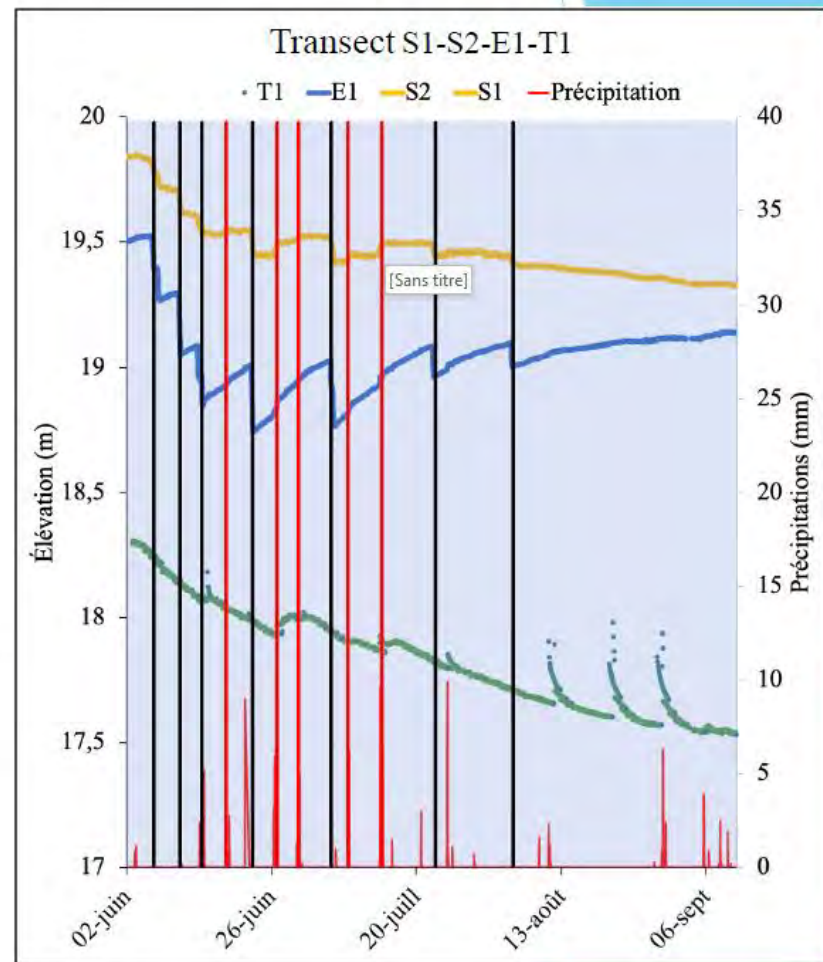
2021

- Champs irrigués de juin à août
- Baisse de la nappe dans le S2 observée lors des pompages
- Niveau dans la tourbe diminue progressivement au cours de l'été
- Recharge de la nappe lors des précipitations





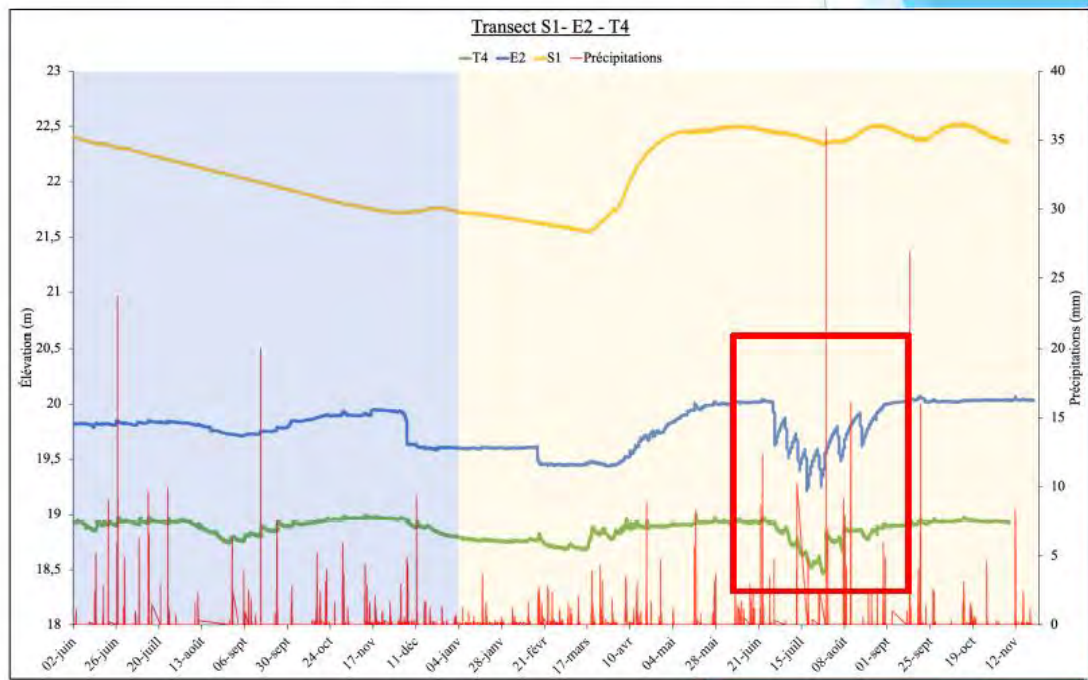
- Niveau dans le sable baisse lors des pompages en raison de la proximité de l'étang
- Remontée observée après les pompages (retour d'eau provenant du sable)
- Chaque évènement de recharge associé à une précipitation
- Impact des pompages dans la tourbe non observable directement 150 m
- Diminution graduelle au cours de l'été





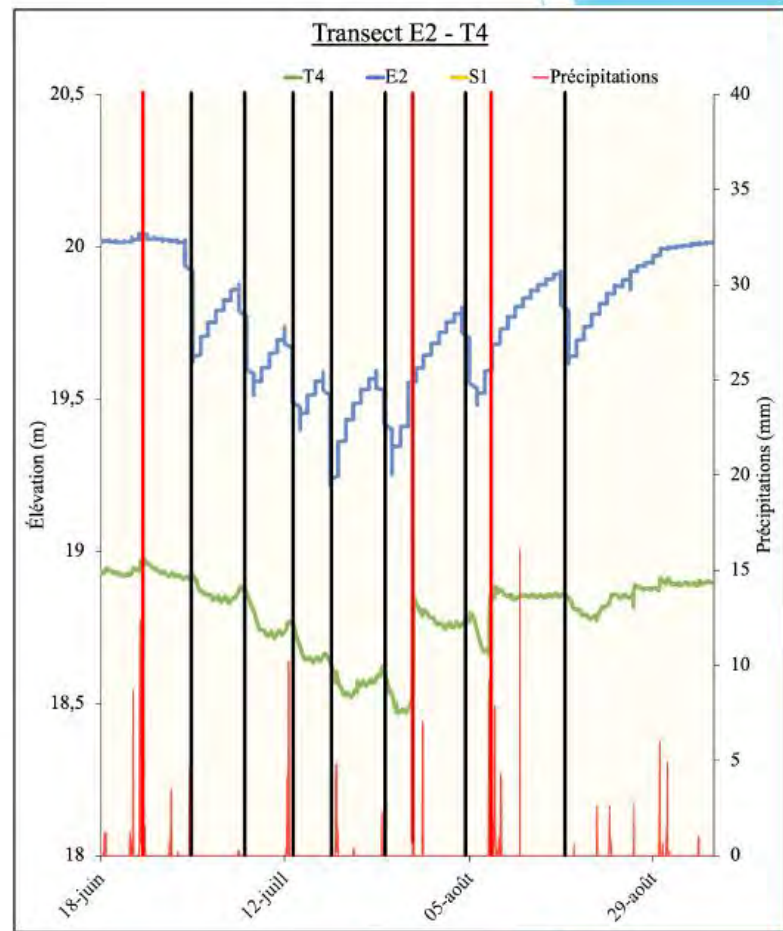
2021

- Pas d'irrigation
- Niveau dans la tourbe diminue au cours du mois d'août
- Recharge observée lors des précipitations dans l'étang et le sable
- Baisse du niveau de ~0,30m autour du 10 décembre



2022

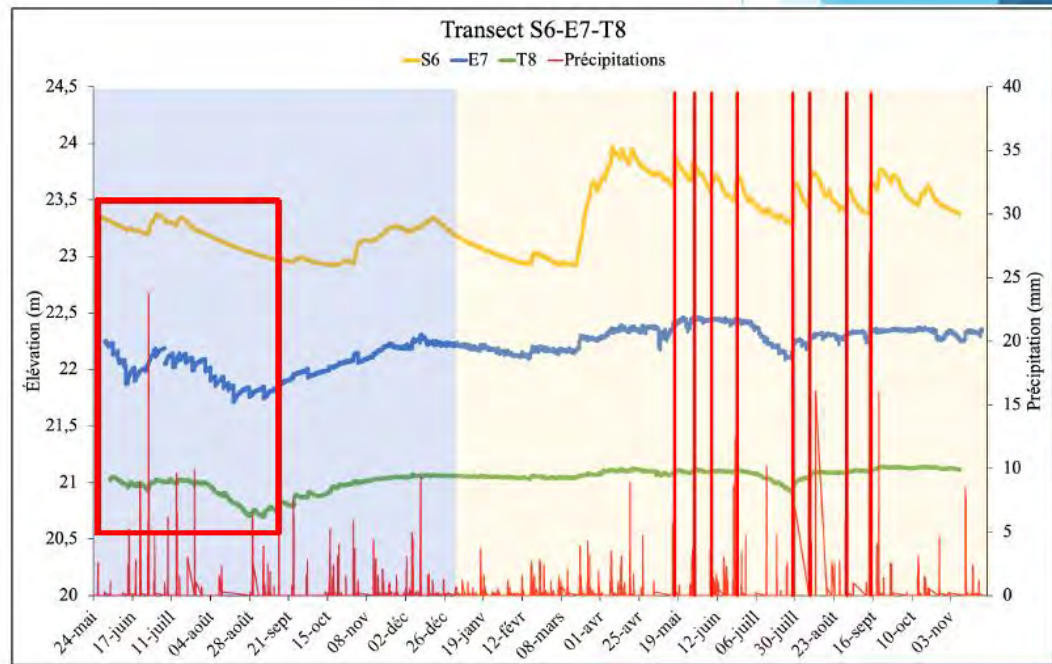
- Champs irrigués de juin à septembre
- Niveau dans la tourbière diminue lors des pompages 20 m
- En faisant baisser le niveau dans l'étang, l'apport d'eau à la tourbière diminue et le niveau baisse malgré le fait que l'étang reste à un niveau plus élevé



- Piézomètre dans la tourbière à ~20m de l'étang
- Remontée observée après les pompages dans l'étang et dans la tourbe (associée au retour d'eau provenant du sable)
- Certains évènements de recharge associés à des précipitations
- Impact des pompages dans la tourbe observable directement 20 m

2021

- Champs irrigués de juin à septembre
- Niveau dans la tourbe diminue au mois d'août et septembre (moins de précipitations)
- Recharge de la nappe associée aux précipitations dans la tourbe et l'étang mais moins dans le sable

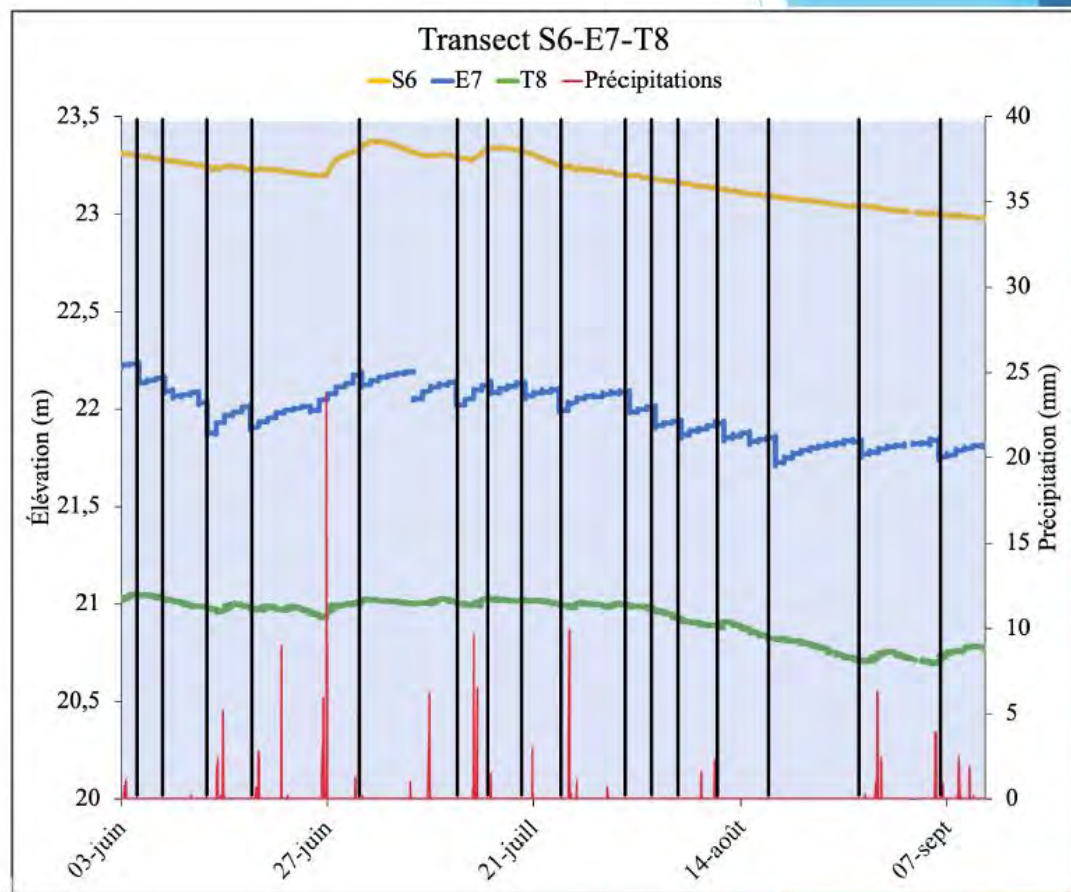


2022

- Pas d'irrigation
- Recharge plus prononcée dans le sable lors des précipitations
- Niveau dans le sable, l'étang et dans la tourbière diminue pendant le mois de juillet lors d'une période plus chaude et sèche



- Remontée observée dans l'étang après les pompages
- (retour d'eau provenant du sable)
- Impact des pompages dans la tourbe peu observable 42 m
- Impact des précipitations peu observable dans le sable sauf lors des plus gros événements pluvieux
- Impact minimale des précipitations dans la tourbe



Écoulement dans le coteau pendant les périodes de pompages

- Niveau dans le sable et dans la tourbe diminue à proximité des étangs lors des pompages
- L'effet des pompages est observé jusqu'à une distance de 20 à 30m
- L'élévation de la majorité des étangs reste supérieur au niveau des étangs pendant toute l'année et ce même pendant les pompages
- Les étangs sont alimentées par l'eau dans le sable
- Lorsque le niveau dans les étangs baisse, l'eau provenant du sable est intercepté par les étangs et réduit l'apport d'eau à la tourbière

Recharge de la nappe associé à l'irrigation

- Recharge associée à l'irrigation trop petite pour être détectée par la méthode WTF
- Recharge associée à l'irrigation peu observable dans les chroniques de niveaux



Réponses du MELCCFP



RENCONTRE TENUE LE 20 JUIN 2022

En présence de :

- MAPAQ régional et provincial
- MELCCFP régional et provincial
 - Direction des politiques de l'eau
 - Direction de la gestion intégrée de l'eau (DGIE)
 - Direction de l'eau potable et des eaux souterraines (DEPES)

Questions écrites envoyées par avance : Réponses par écrit en octobre 2023



LES PRÉLÈVEMENTS (PRL) EN GÉNÉRAL

- Pas de clause de droit acquis de prl d'eau.
- Pas de priorité accordée aux prélèvements d'eau existants par rapport aux nouveaux prélèvements. En cas de ressource hydrique limitée, les prélèvements existants devront être réduits pour accommoder de nouveaux prélèvements.
- 31.76 (LQE): ...la ressource en eau... doit... satisfaire en priorité les besoins de la population en matière de santé, salubrité, sécurité civile et alimentation en eau potable et également viser à concilier les besoins:
 - des écosystèmes aquatiques, a des fins de protection
 - **de l'agriculture**, de l'aquaculture, de l'industrie, de la production d'énergie et des autres activités humaines, dont celles liées aux loisirs et au tourisme.

PRL EN COURS D'EAU

Lieu du prl.	Nb. de site de prl.	Volume annuel prl. (M m ³)	% prl total
En cours d'eau	42	2,1	28%

- Pas de refus d'office pour une autorisation de prl d'eau en cours d'eau.
- Demande d'autorisation en tenant compte d'un prélèvement maximum de 15% du Q_{2-7} (débit moyen sur 7 jours d'une récurrence de 2 ans).
- Possibilité d'imposer un débit réservé en période estivale ($Q_{50 \text{ août}}$) (débit médian du mois d'août), débit réservé pour l'alimentation de toutes les espèces de poissons du 1^{er} juin au 30 sept.

PRL EN COURS D'EAU (SUITE)

Lieu du prl.	Nb. de site de prl.	Volume annuel prl. (M m ³)	% prl total
En cours d'eau	42	2,1	28%

- Demande d'autorisation des prl d'eau de surface doit aussi prendre en compte l'effet des prl d'eau en bassin, car cette eau fera potentiellement résurgence dans les cours d'eau.
- Prl dans les barrages actuels assujettis à une autorisation.
- La construction de nouveaux barrages n'est pas recommandée par le MELCCFP.

PRL EN BASSIN

Lieu du prl.	Nb. de site de prl.	Volume annuel prl. (M m ³)	Superficie bassin (ha)	% prl total
Bassins à 0m d'un MH2022	64	2,0	47	26%
Bassins à 0-30m d'un MH2022	53	2,0	53	27%
Bassins à > 30m d'un MH2022	34	1,4	29	19%

MH = milieu humide



PRL EN BASSIN

- La distance du bassin d'irrigation par rapport au MH ne constitue pas un critère d'acceptation automatique d'une autorisation (si à plus de 30m) ou de refus (si dans le MH).
- Le ministre peut décider d'assortir l'autorisation de conditions ou de restrictions afin de minimiser les effets du prl.
- La connaissance de l'état des ressources en eau dans le secteur SCELANEAU est fragmentaire, très peu de préleveur ont procédé à la déclaration de leur prl depuis le 31 mars 2012. Donc, difficile au ministère de définir le volume d'eau qui sera autorisé à long terme.
- (31.79.1-LQE) Le ministre peut refuser la délivrance, la modification ou le renouvellement de l'autorisation de prl d'eau, s'il est d'avis que ce refus sert l'intérêt du public. Le ministre peut aussi modifier de sa propre initiative une autorisation de prl d'eau après émission.
 - Préavis d'au moins 15 jours pour présenter vos observations.
 - La collaboration des producteurs est nécessaire afin de prévoir des mesures de mitigation ou d'adaptation pour assurer une gestion durable de la ressource.



PRL EN BASSIN

- Pas d'étude hydrogéologique requise, mais un **rapport technique** est demandé.
 - Signé par un professionnel
- Définir le scénario de prl et son caractère raisonnable de prl
- Évaluation des effets du prl sur les autres usagers des propriétés voisines et sur les milieux humides à proximité
 - si des effets sont constatés, les moyens qui seront pris pour minimiser les impacts sur voisins et MH.
- Le demandeur doit démontrer que le prl ne cause aucun **impact négatif significatif, individuel ou cumulatif**, sur la qualité ou la quantité des eaux du bassin et que des efforts sont déployés pour conserver l'eau.
- Si impact sur le milieu difficile à quantifier, un **suiti** peut être demandé pour documenter les effets sur le milieu avec seuil à ne pas dépasser (ex.: rabattement maximal des eaux souterraines à un site d'observation). Le producteur devra réduire les prl si l'eau descend en dessous d'un seuil.



PRL EN BASSIN

- En bref...
 - Ce n'est pas un « non » catégorique, mais difficile d'évaluer les chances que tous les prélèvements soient autorisés
 - Quelle est la probabilité qu'un prélèvement dans un étang situé à proximité ou dans la tourbière soit autorisé?
 - Quel sera le coût et le risque pour les producteurs?



AUTRES POINTS

- Le MELCCFP met beaucoup d'espoir sur les conclusions du projet SCELANEAU...
- Les résultats pourraient être une référence pour les professionnels et le MELCCFP, mais ne peuvent pas se substituer aux demandes d'autorisation individuelles.
- Pour les prélèvements existants en 2014, puisqu'ils sont considérés comme ayant déjà été autorisés, peuvent se poursuivre pendant que le MELCCFP analyse vos demandes d'autorisation (ex.: en 2025).
- À mot couvert, le MELCCFP serait ouvert à envisager des stratégies alternatives qui minimiseraient l'impact sur le milieu : par exemple, des bassins d'irrigation étanches remplis au printemps depuis les cours d'eau lorsque les débits sont plus importants.



DATE D'ÉCHÉANCE – DEMANDE D'AUTORISATION

Article 364 (REAFIE): ... les prélèvements d'eau (existants avant le 14 août 2014 et n'ayant pas fait l'objet de modification) ... sont réputés valides, jusqu'au :

- 2° 14 août 2025 pour les prl ≥ 5000 m³/jr;
- 3° 14 août 2026 pour les prl ≥ 1500 et < 5000 m³/jr
- 4° 14 août 2026 pour les prl ≥ 600 et < 1500 m³/jr
- 5° 14 août 2026 pour les prl ≥ 200 et < 600 m³/jr
- 6° 14 août 2026 pour les prl < 200 m³/jr

Pour calculer le volume moyen par jour:

Article 166 du REAFIE:

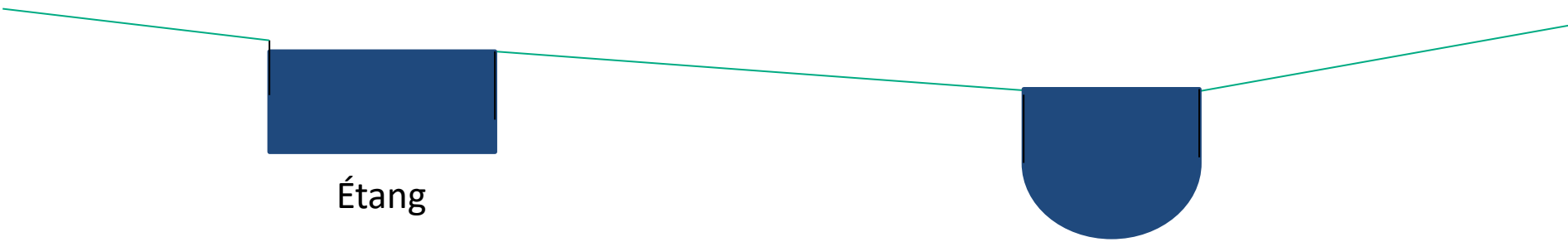
Le volume moyen d'eau prélevé ou consommé par jour est calculé en fonction d'une période de 90 jours consécutifs pendant laquelle le prélèvement est maximal;



SCÉNARIOS



MAI



Étang

Cours d'eau



MAI

Irrigation



Étang



Cours d'eau

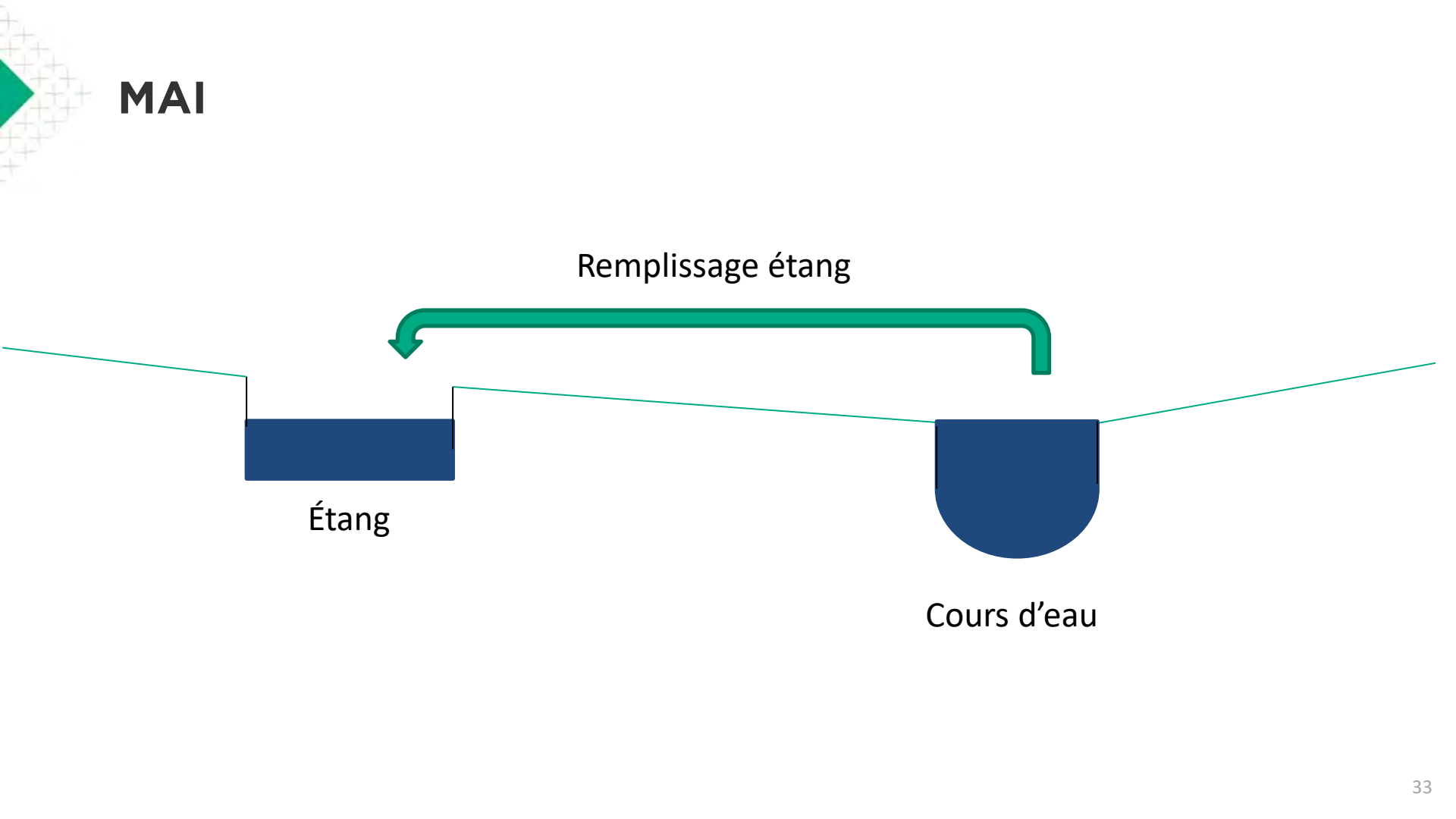


MAI

Remplissage étang

Étang

Cours d'eau



JUIN

Irrigation



Étang



Cours d'eau

JUIN

Irrigation



Étang

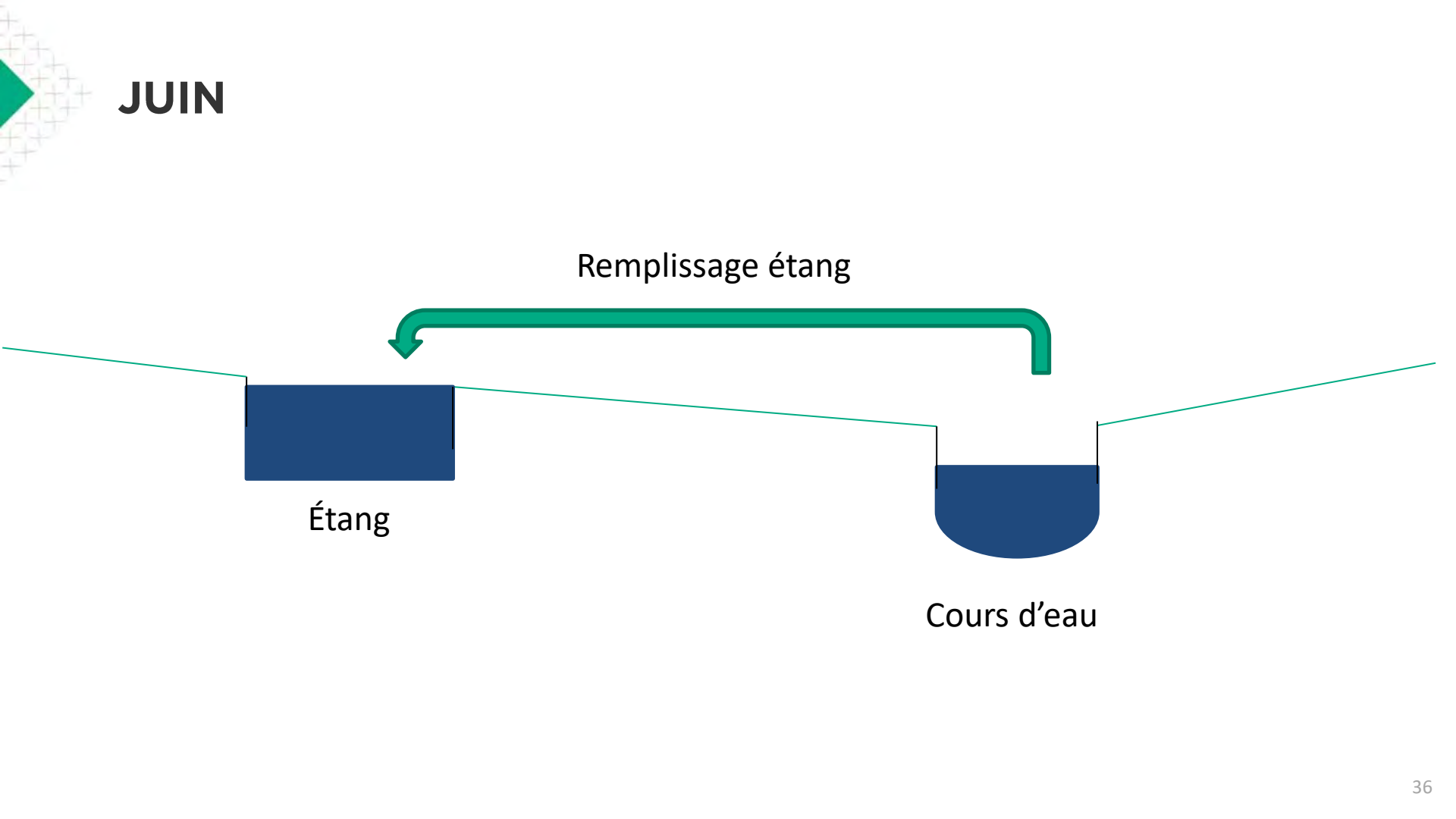
Cours d'eau

JUIN

Remplissage étang

Étang

Cours d'eau



JUILLET

Irrigation



Étang

Cours d'eau

JUILLET

Remplissage étang



Étang

Cours d'eau

AOÛT

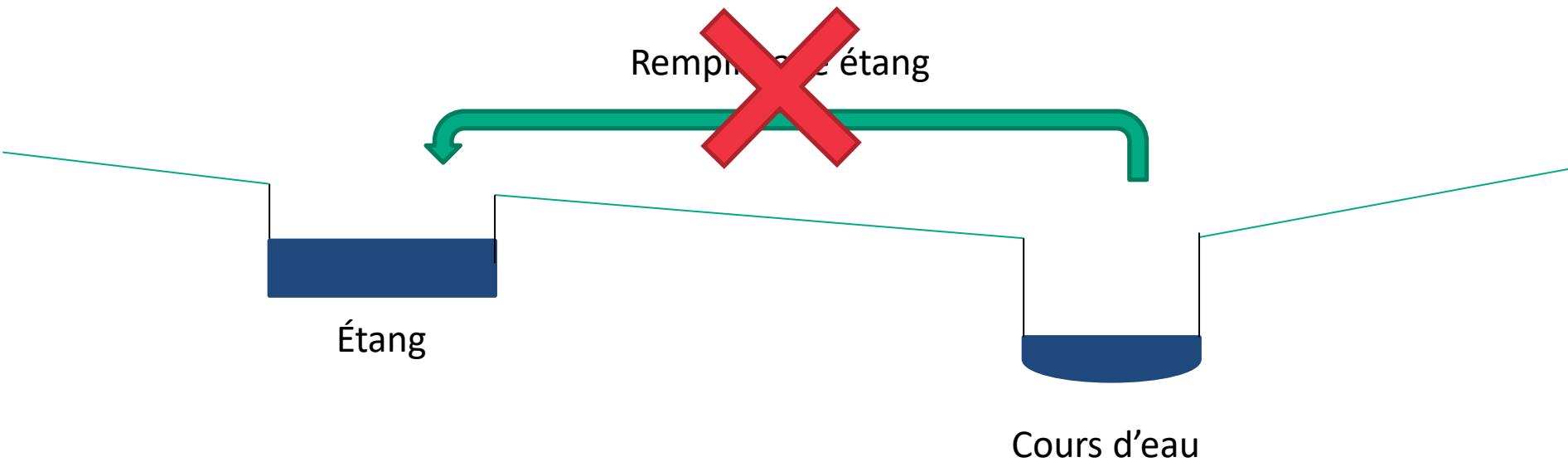
Irrigation



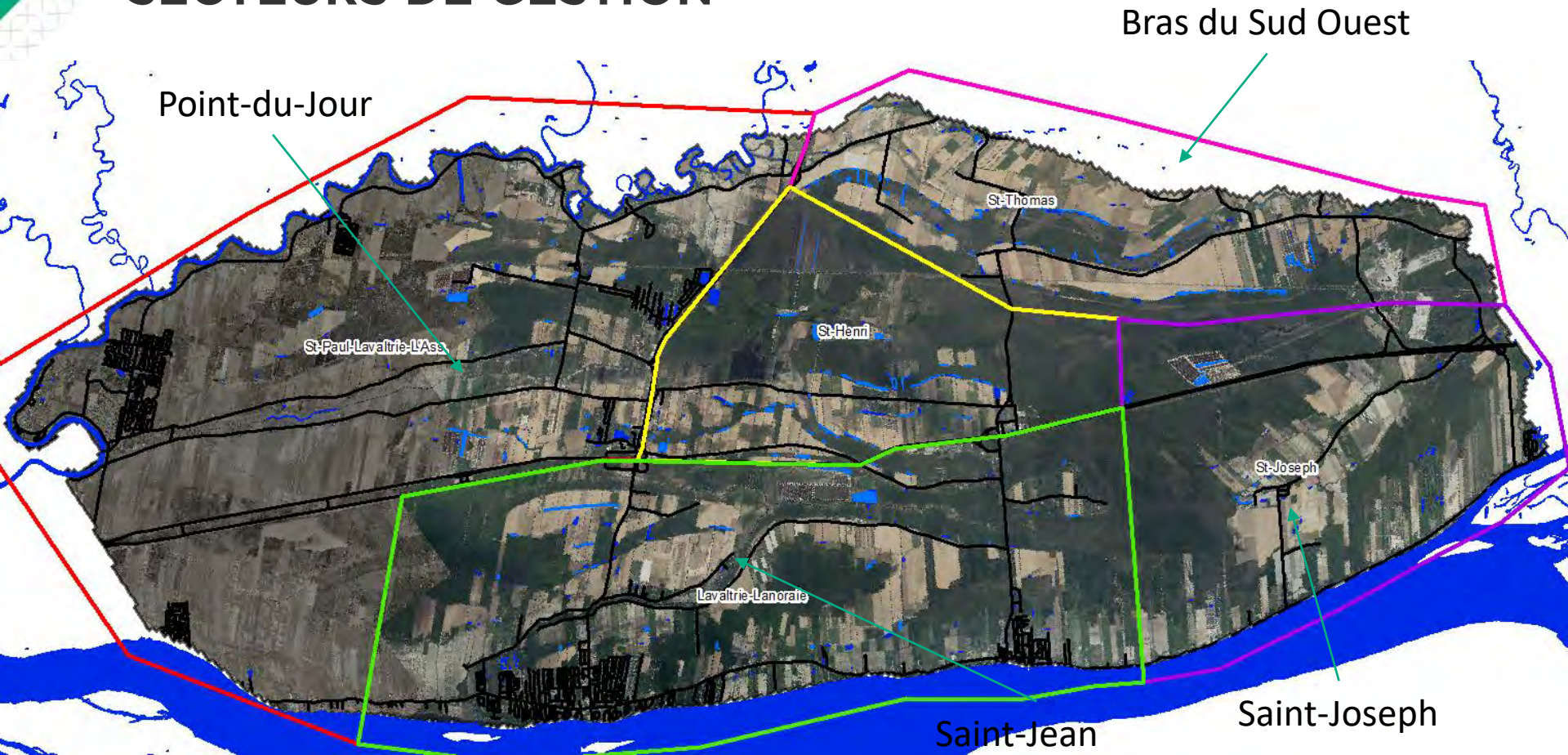
Étang

Cours d'eau

AOÛT



SECTEURS DE GESTION



SECTEUR ST-JOSEPH

	Bassin	Cours d'eau	Total général
Nombre de prise d'eau	5	7	12
Superficie annuelle irriguée (ha).	139	214	353
Superficie Bassin d'irrigation (m ²).	68 588	0	68 588
Volume annuel prélevé (m ³).	403 711	463 406	867 117
Volume prélevé en Mai (m ³)	36 329	0	36 329
Volume prélevé en Juin (m ³)	55 108	92 399	147 507
Volume prélevé en Juillet (m ³)	136 102	236 020	372 122
Volume prélevé en Août (m ³)	88 997	134 987	223 984

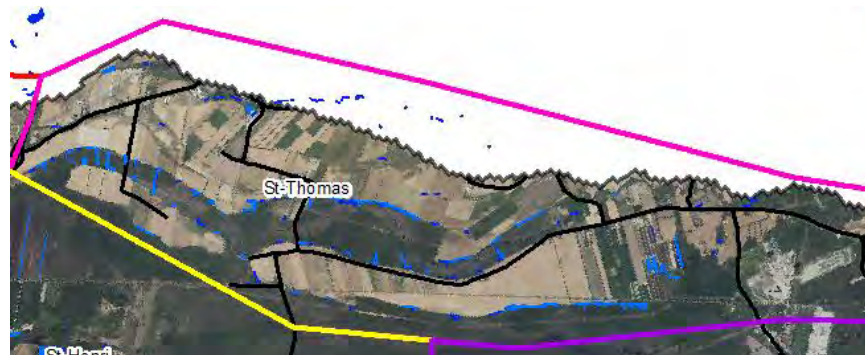


- Le volume prélevé dans le cours d'eau en été est trop élevé : **83%** du débit d'étiage
- 210 000m³ de réserve (étang) : 25% des besoins stockés, la recharge des étangs permet d'atteindre 50% des prélèvements
- Aval de la tourbière? Impact moins important?
- 37 000 m³ situé à proximité immédiate des milieux humides : autorisation?
- Volume qui pourrait (15% du débit hors période d'étiage?) être prélevé dans le cours d'eau durant l'été : 500 000 m³
- 200 000 m³ manquant au minimum : nécessité d'avoir davantage de réserves (étangs)

SECTEUR ST-THOMAS

	Bassin	Cours d'eau	Total général
Nombre de prise d'eau	49	4	53
Superficie annuelle irriguée (ha).	773	114	888
Superficie Bassin d'irrigation (m ²).	356 087	0	356 087
Volume annuel prélevé (m ³).	1 763 130	267 600	2 030 730
Volume prélevé en Mai (m ³)	96 802	0	96 802
Volume prélevé en Juin (m ³)	356 004	39 881	395 885
Volume prélevé en Juillet (m ³)	684 350	97 103	781 453
Volume prélevé en Août (m ³)	494 591	111 599	606 190

- Prélèvements dans la rivière Chaloupe
- 614 000 m³ de réserve (étang) dont les 2/3 sont à proximité immédiate des milieux humides : autorisation?
- 200 000 m³ de réserve utilisable (à étanchéifier) ? = 10% des besoins
- Zone de forte intensité de prélèvement : autorisation?
- Volume qui pourrait (15% du débit hors période d'étiage?) être prélevé dans le cours d'eau (Bras du Sud Ouest) durant l'été : 250 000 m³
- 1 600 000 m³ manquant au minimum : réserves et source d'eau alternative ?



SECTEUR ST-HENRI

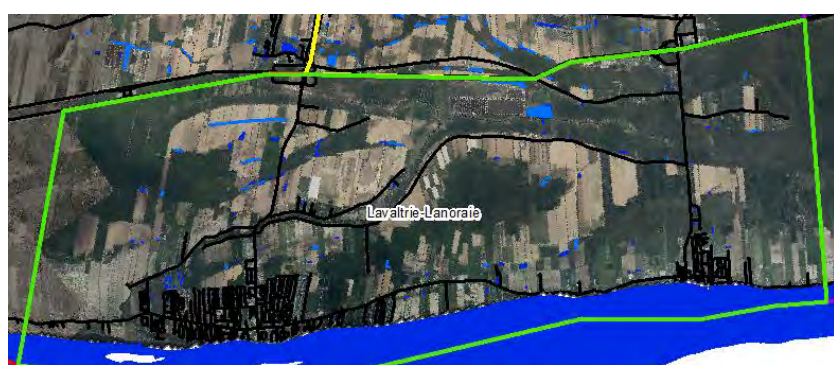
	Bassin	Cours d'eau	Total général
Nombre de prise d'eau	55	4	59
Superficie annuelle irriguée (ha).	479	57	536
Superficie Bassin d'irrigation (m ²).	353 159	0	353 159
Volume annuel prélevé (m ³).	1 277 118	68 713	1 345 831
Volume prélevé en Mai (m ³)	180 559	2 558	183 116
Volume prélevé en Juin (m ³)	286 692	14 553	301 245
Volume prélevé en Juillet (m ³)	411 842	36 981	448 822
Volume prélevé en Août (m ³)	317 093	14 622	331 714



- 1 315 000 m³ de réserve (étang) dont les près de 90% ne sont pas à proximité immédiate des milieux humides.
- Zone de forte intensité de prélèvement : étanchéifier les étangs?
- 1 160 000 m³ de réserve utilisable = 85% des besoins
- 200 000 m³ manquant au minimum : réserves additionnelles ?

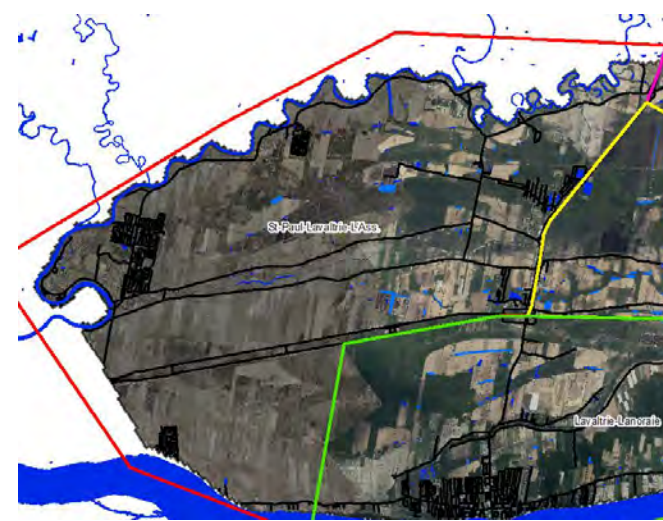
SECTEUR LAVALTRIE-LANORAIE

	Bassin	Cours d'eau	Total général
Nombre de prise d'eau	22	18	40
Superficie annuelle irriguée (ha).	328	313	642
Superficie Bassin d'irrigation (m ²).	305 877	0	305 877
Volume annuel prélevé (m ³).	1 092 371	1 033 128	2 125 499
Volume prélevé en Mai (m ³)	34 305	9 384	43 689
Volume prélevé en Juin (m ³)	344 300	339 909	684 209
Volume prélevé en Juillet (m ³)	400 634	463 476	864 110
Volume prélevé en Août (m ³)	155 136	192 943	348 079



- Le volume prélevé dans le cours d'eau en été est trop élevé : **75%** du débit d'étiage
- 560 000m³ de réserve (étang) : 25% des besoins stockés, la recharge des étangs permet d'atteindre 50% des prélèvements
- Aval de la tourbière? Impact moins important?
- 150 000 m³ situé à proximité immédiate des milieux humides : autorisation?
- Volume qui pourrait (15% du débit hors période d'étiage?) être prélevé dans le cours d'eau durant l'été : 500 000 m³
- 1 200 000 m³ manquant au minimum : source alternative? Fleuve?

SECTEUR ST-PAUL-LAVALTRIE-ST-SULPICE-L'ASSOMPTION



	Bassin	Cours d'eau	Total général
Nombre de prise d'eau	21	11	32
Superficie annuelle irriguée (ha).	278	151	429
Superficie Bassin d'irrigation (m ²).	209 539	0	209 539
Volume annuel prélevé (m ³).	925 465	346 606	1 272 071
Volume prélevé en Mai (m ³)	107 011	1 348	108 360
Volume prélevé en Juin (m ³)	180 215	73 965	254 180
Volume prélevé en Juillet (m ³)	277 500	156 035	433 534
Volume prélevé en Août (m ³)	118 213	104 623	222 835

- Le volume prélevé dans le cours d'eau en été est trop élevé : **82%** du débit d'étiage
- 405 000m³ de réserve (étang) : 33% des besoins stockés, la recharge des étangs permet d'atteindre 75% des prélèvements
- Aval de la tourbière? Impact moins important?
- Très peu d'étangs situés à proximité immédiate des milieux humides
- Volume qui pourrait (15% du débit hors période d'étiage?) être prélevé dans le cours d'eau durant l'été : 650 000 m³
- 250 000 m³ manquant au minimum : davantage d'étangs? Rivière l'Assomption?

ANNEXE 7 – Réponses du MELCCFP aux questions, projet SCELANEAU

PAR COURRIEL

Le 24 octobre 2022

Monsieur Charles Bergeron, agr.
Directeur du Service d'aménagement et d'environnement
Fédération de l'UPA de Lanaudière
110, rue Beaudry Nord
Joliette (Québec)
J6E 6A5
cbergeron@upa.qc.ca

OBJET : Réponses aux questions soulevées dans le document préparatoire à la rencontre entre le MELCC, le MAPAQ et les coordonnateurs du projet SCELANEAU

Monsieur Bergeron,

À la demande des coordonnateurs du projet SCELANEAU, la Direction de l'eau potable, des eaux souterraines et de surface (DEPESS) du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) a préparé les réponses aux questions formulées dans le « document préparatoire à une rencontre souhaitée entre le MELCC - MAPAQ - coordonnateurs projet SCELANEAU ».

Les coordonnateurs du projet SCELANEAU souhaitent examiner des scénarios pour déterminer la façon dont la réglementation concernant les autorisations de prélèvement d'eau à des fins d'irrigation sera appliquée lorsque les producteurs du complexe tourbeux de Lanoraie déposeront leurs demandes d'autorisation à partir de 2025. En fonction des réponses qui seront apportées à différentes situations types, ils veulent être en mesure de réaliser des scénarios plus précis et réalistes quant aux lieux de prélèvement et volumes d'eau qui pourront être prélevés à partir des sources actuellement utilisées, et quant aux lieux et volumes qui devront être comblés par d'autres sources. Les réponses de la DEPESS aux questions sont détaillées, ci-après, en annexe.

Veuillez agréer, Monsieur Bergeron, l'assurance de nos meilleurs sentiments.

Le directeur,



Simon Guay

p. j. Annexe 1
c. c. Dominic Brochu, Sylvestre Delmotte, Simon Ricard, Marie Larocque

...2

ANNEXE 1

Réponses aux questions soulevées dans le document préparatoire à la rencontre entre le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC), le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) et les coordonnateurs du projet SCELANEAU

QUESTIONS

Situation n° 1 :

Plusieurs producteurs déposent leurs demandes pour obtenir l'autorisation de poursuivre les prélèvements qu'ils réalisent actuellement dans les cours d'eau (ex. : rivière Saint-Jean), en amont des barrages gérés par la MRC. Selon les informations présentées ci-dessus.

Question : Les prélèvements pourront-ils être autorisés au même niveau que ceux réalisés actuellement?

Réponse :

Il est toujours possible que les prélèvements soient autorisés au même niveau, mais la décision doit tenir compte des problèmes d'approvisionnement qui sont déjà apparents dans le secteur. Il n'existe pas de clause de droit acquis de prélèvement d'eau au Québec. Les prélèvements d'eau de surface sont donc autorisés en fonction de la disponibilité de l'eau naturelle dans le secteur et des pressions exercées sur celle-ci. Dans le cas d'une pression trop forte des prélèvements sur la disponibilité de l'eau en période d'étiage, des demandes d'autorisation de prélèvement d'eau pourraient être refusées ou être acceptées sous certaines conditions d'exploitation. Ultimement, ce sont les paramètres de l'article 31.76 de la Loi sur la qualité de l'environnement (LQE) qui dictent l'acceptabilité de l'autorisation de prélèvement, dont la conciliation des usages de l'eau, y compris ceux des écosystèmes aquatiques.

Question : Sinon, pouvons-nous nous baser sur une autorisation théorique de 15 % d'un étiage « naturel » estimé (tel qu'exposé ci-dessus)?

Réponse :

Oui. Actuellement, l'indicateur 15 % du Q₂₋₇ (débit moyen sur sept jours d'une récurrence de deux ans) est utilisé pour évaluer la pression des prélèvements d'eau sur les débits d'étiage. Cet indicateur se base sur la comparaison du cumul de la consommation d'eau, c'est-à-dire la part du prélèvement qui n'est pas retourné au milieu, avec le Q₂₋₇ de la période de prélèvement visée (ex. : Q₂₋₇ estival pour un prélèvement agricole). Pour l'irrigation, on considère généralement qu'il y a une consommation de 90 % du volume prélevé (https://pubs.usgs.gov/sir/2007/5197/pdf/SIR2007-5197_low-res_all.pdf).

Question : À l'extrême, doit-on supposer, pour d'autres considérations (débits d'étiage « naturels » des cours d'eau faibles, faune, etc.), qu'aucun prélèvement ne sera autorisé dans ces petits cours d'eau?

Réponse :

L'importance des étiages observés ne dépend pas uniquement de la faiblesse du ruissellement. L'eau captée dans les bassins à des fins d'irrigation représente autant d'eau d'infiltration, donc de recharge des eaux souterraines, qui est interceptée avant de

faire résurgence dans le réseau hydrographique de surface. Il s'agit probablement d'un élément important qui explique l'importance des étiages. Ainsi, l'autorisation des prélèvements d'eau de surface doit aussi prendre en compte l'effet des prélèvements d'eau en bassin.

Toutefois, il est peu probable qu'aucun prélèvement d'eau ne soit autorisé sur l'ensemble du complexe tourbeux de Lanoraie. Les résultats du projet SCELANEAU pourraient contribuer à déterminer le seuil de prélèvement à autoriser sur le territoire. La contribution du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) pourrait aussi être nécessaire pour cibler les zones et les périodes où un débit seuil doit être respecté pour assurer le maintien des habitats aquatiques.

Question : Serait-il possible, au niveau réglementaire, d'implanter de nouveaux barrages pour capter un plus grand volume d'eau?

Réponse :

En vertu de la Loi sur la qualité de l'environnement (LQE), certains ouvrages de retenue sont considérés comme des prélèvements d'eau et sont donc assujettis à une autorisation en vertu du 2^e paragraphe du 1^{er} alinéa de l'article 22 de la LQE. L'article 31.74 définit préalablement un prélèvement d'eau comme « toute action de prendre de l'eau de surface ou de l'eau souterraine par quelque moyen que ce soit », excluant de cette définition « un ouvrage destiné à retenir l'eau ». Toutefois, ce même article indique, notamment pour l'application de la sous-section 2 de la section V du 1^{er} chapitre de la LQE, que ces mêmes ouvrages destinés à retenir l'eau sont inclus dans la définition de « prélèvement d'eau »; par conséquent, ils deviennent subordonnés à l'autorisation du ministre. Ceci fait en sorte que les ouvrages destinés à retenir l'eau, sur le territoire de l'Entente sur les ressources en eaux durables du bassin des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent, pourraient aussi être assujettis à une autorisation de prélèvement d'eau en vertu du 2^e paragraphe du 1^{er} alinéa de la LQE.

De plus, la construction d'un barrage nécessite l'obtention préalable d'une autorisation ministérielle en vertu du 4^e paragraphe du 1^{er} alinéa de l'article 22 de la LQE, en plus de celle du MFFP et du ministère des Pêches et des Océans du Canada (MPO) dans certains cas.

Toutefois, la construction de nouveaux barrages n'est pas recommandée par le ministère. En effet, ces ouvrages peuvent avoir des impacts négatifs sur l'environnement, notamment les suivants :

- Obstacle à la libre circulation de l'eau;
- Limite l'accès aux zones de reproduction pour les poissons et provoquant la mort de nombreux individus, même lorsqu'il y a des passes migratoires;
- Modification du régime hydrologique du cours d'eau :
 - Perturbation des conditions écologiques en amont et en aval (réduction de la quantité d'eau dans le bassin versant en aval);
 - Diminution des capacités d'autoépuration;
 - Modification des processus d'érosion;
 - Accumulation des sédiments en amont du barrage.

De plus, en vertu de l'article 46.0.4 de la LQE, outre les éléments prévus à l'article 24 pour l'analyse des impacts d'un projet sur la qualité de l'environnement, le ministre prend également en considération les éléments suivants :

1° **Les caractéristiques et les fonctions écologiques des milieux visés** et celles du bassin versant auquel ils appartiennent, de même que les perturbations ou pressions anthropiques subies par ces milieux;

2° **La possibilité d'éviter de porter atteinte aux milieux humides et hydriques** dans le cadre de la réalisation du projet et, le cas échéant, les espaces disponibles aux fins du projet ailleurs sur le territoire de la municipalité régionale de comté concernée;

3° La capacité des milieux visés à se rétablir ou la possibilité de les restaurer en tout ou en partie une fois le projet achevé;

4° Les éléments prévus dans un plan directeur de l'eau, un plan de gestion intégrée du Saint-Laurent ou un plan régional des milieux humides et hydriques élaborés en vertu de la Loi affirmant le caractère collectif des ressources en eau et favorisant une meilleure gouvernance de l'eau et des milieux associés (chapitre C-6.2), ainsi que les objectifs de conservation prévus dans un plan métropolitain de développement, dans un schéma d'aménagement et de développement, dans toute mesure de contrôle intérimaire ou dans un règlement adopté par une municipalité régionale de comté en application de la Loi sur l'aménagement et l'urbanisme (chapitre A-19.1).

Par ailleurs, il est important de mentionner qu'en vertu de l'article 46.0.6 de la LQE, le ministre peut refuser de délivrer une autorisation relative à un projet dans des milieux humides et hydriques :

1° **lorsque le demandeur n'a pas démontré à sa satisfaction qu'il ne peut, pour les fins de son projet, éviter de porter atteinte aux milieux;**

2° **s'il est d'avis que les mesures d'atténuation proposées par le demandeur ne permettent pas de réduire au minimum les impacts du projet sur les milieux ou le bassin versant auquel ils appartiennent;**

3° **s'il est d'avis que le projet porte atteinte aux fonctions écologiques et à la biodiversité des milieux ou du bassin versant auquel ils appartiennent;**

4° le demandeur refuse de payer la contribution financière exigée en vertu du premier alinéa de l'article 46.0.5.

Pour ces raisons, nous sommes d'avis que la construction de barrages devrait être considérée comme une solution de dernier recours.

Situation n° 2 :

Plusieurs producteurs déposent leurs demandes pour obtenir l'autorisation de poursuivre les prélèvements qu'ils réalisent actuellement dans des étangs d'irrigation situés dans les coteaux sableux, qui sont donc en lien avec la nappe phréatique de surface, mais situés à plus de 30 mètres des milieux humides.

Question : Selon notre compréhension de la réglementation actuelle, ces producteurs doivent obtenir une autorisation, mais la demande d'autorisation ne nécessite pas d'études hydrologiques ou hydrogéologiques.

Réponse :

Dans la situation n° 2, décrite dans le paragraphe précédent, on considère qu'il s'agit d'un prélèvement d'eau souterraine, du fait de l'existence d'un lien hydraulique entre l'étang et la nappe phréatique. Les prélèvements d'eau souterraine sont assujettis à

l'article 169 du Règlement sur l'encadrement d'activités en fonction de leur impact sur l'environnement (REAFIE).

Selon l'article 169 du REAFIE, une étude hydrogéologique n'est pas requise dans cette situation. Cependant, un rapport technique est demandé. **Les éléments exigés dans le rapport technique dépendent du volume d'eau prélevé** et sont détaillés aux paragraphes 5° et 6° de l'article 169, soit :

5° un rapport technique sur le scénario de prélèvement d'eau, signé par un professionnel, comportant une évaluation de la capacité de chacune des installations de prélèvement d'eau concernées à répondre aux besoins en eau identifiés et visant à démontrer le caractère raisonnable du prélèvement;

6° pour les prélèvements d'eau souterraine suivants, le rapport technique visé par le paragraphe 5 doit aussi contenir une évaluation des effets du prélèvement d'eau sur les installations de prélèvement d'eau souterraine d'autres usagers situés sur les propriétés voisines et sur les milieux humides situés à proximité et, si des effets sont constatés, les moyens qui seront pris pour minimiser les impacts sur les usagers et les milieux humides concernés;

a) un prélèvement d'eau dont le volume journalier moyen d'eau prélevée est égal ou supérieur à 379 000 litres lorsqu'il est effectué, par un producteur agricole, pour l'élevage des animaux visé à l'article 2 du Règlement sur les exploitations agricoles (chapitre Q-2, r. 26), pour la culture des végétaux et des champignons et pour l'acériculture ou lorsqu'il est effectué pour l'exploitation d'un site d'étang de pêche ou d'un site aquacole;

b) un prélèvement d'eau dont le volume journalier moyen d'eau prélevée est égal ou supérieur à 75 000 litres mais inférieur à 379 000 litres lorsqu'il est effectué pour toute autre fin.

Ainsi, **le paragraphe 6°, portant sur les effets d'un site de prélèvement d'eau souterraine, s'applique, si le volume journalier moyen d'eau prélevé par le producteur agricole, à l'ensemble de ses sites de prélèvement d'eau (souterraine ou de surface; voir l'article 167 du REAFIE), est égal ou supérieur à 379 000 litres (par. 6°, a).**

Question : Dans ce cas-ci :

Les prélèvements pourront-ils être autorisés dans les étangs, considérant qu'ils sont à plus de 30 mètres des milieux humides?

Réponse :

Pour qu'un prélèvement d'eau à partir d'un bassin d'irrigation soit exempté de l'autorisation ministérielle (paragraphe 2° du 1^{er} alinéa de l'article 22 de la LQE), il doit respecter les critères du paragraphe 2° de l'article 173 du REAFIE. Le critère « fondamental » à considérer est que le bassin doit constituer l'unique site de prélèvement d'eau du producteur agricole. La majorité des producteurs recourant à plusieurs sites de prélèvement d'eau ou prélevant plus de 379 000 litres/jour, l'exemption ne s'applique pas. À partir du moment où le prélèvement d'eau est assujéti à l'autorisation ministérielle, la distance entre le bassin et le milieu humide ne constitue pas un critère déterminant, c'est-à-dire dont le respect fera en sorte que le ministre délivrera « automatiquement l'autorisation ».

Dans le cas présent, les prélèvements pourront être autorisés dans les étangs sous réserve du respect des exigences de l'article 169, paragraphes 5° et 6°, en fonction du volume prélevé.

Question : Les producteurs agricoles devront-ils fournir d'autres informations, par exemple sur l'impact des prélèvements des étangs sur la nappe de surface?

Réponse :

Le prélèvement d'eau du producteur agricole étant probablement supérieur au débit moyen de 379 000 litres/jour, en vertu des dispositions du paragraphe 6° de l'article 169 du REAFIE, le rapport technique visé par le paragraphe 5° de l'article 169 du REAFIE visant à définir le scénario de prélèvement et son caractère raisonnable devra également contenir une évaluation des effets du prélèvement d'eau sur les installations de prélèvement d'eau souterraine d'autres usagers situés sur les propriétés voisines, et une évaluation de ses effets sur les milieux humides situés à proximité. Par ailleurs, si des effets sont constatés, le rapport devra préciser les moyens qui seront pris pour minimiser ces impacts sur les usagers et les milieux humides concernés. Il revient au professionnel qui signe ce rapport de mettre en œuvre les moyens qu'il juge nécessaire pour réaliser cette évaluation.

Outre le respect des conditions déjà indiquées, ajoutons que tout nouveau prélèvement ou toute augmentation d'un prélèvement existant localisé sur le territoire de l'Entente sur les ressources en eaux durables du bassin des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent impliquant une quantité moyenne d'eau de 379 000 litres ou plus par jour, ou une quantité ou une consommation déterminée par règlement du gouvernement, ne peut être autorisé que si toutes les conditions de l'article 31.95 de la LQE sont respectées. Le demandeur doit démontrer, entre autres, que le prélèvement ne cause aucun impact négatif significatif, individuel ou cumulatif, sur la quantité ou la qualité des eaux du bassin (31.95 (2)), que des efforts sont déployés pour conserver l'eau (31.95 (3)) et que les volumes prélevés sont raisonnables (31.95 (4 a à e)). Des documents justificatifs pourraient être demandés pour répondre à l'ensemble des conditions prescrites dans cet article.

Le projet SCELANEAU offre l'occasion d'établir ce qui constituerait une exploitation durable, équitable et efficace des ressources en eau de la région. Le professionnel mandaté par le producteur agricole devrait normalement s'appuyer sur les résultats de ce projet pour établir le scénario de prélèvement et évaluer ses effets sur les autres usagers et le milieu humide.

Question : Quels seront les critères utilisés pour définir le volume d'eau qui sera autorisé?

Réponse :

L'article 31.76 de la Loi sur la qualité de l'environnement (LQE) énonce les éléments que le ministre de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques doit considérer lorsqu'il exerce son pouvoir d'autorisation des prélèvements d'eau. Cet article lui donne le pouvoir d'autorisation « relatif à un prélèvement d'eau qui doit être exercé de manière à assurer la protection des ressources en eau, notamment en favorisant une gestion durable, équitable et efficace de ces ressources ainsi qu'en prenant en compte le principe de précaution et les effets des changements climatiques ». Le ministre doit donc tenir compte des besoins actuels et futurs de tous les usagers, existants et potentiels.

De plus, l'article 31.79.1 de la LQE permet « au gouvernement ou au ministre, selon le cas, de refuser la délivrance, la modification ou le renouvellement de l'autorisation relative à un prélèvement d'eau, s'il est d'avis que ce refus sert l'intérêt public. Ils peuvent aussi modifier de leur propre initiative une autorisation relative à un prélèvement d'eau pour le même motif ».

La situation vécue dans la région de Lanoraie démontre que l'autorisation d'un prélèvement d'eau doit prendre en considération les conditions à l'échelle régionale. Présentement, notre connaissance de l'état des ressources en eau dans le secteur est fragmentaire. Très peu d'utilisateurs ont procédé à la déclaration de leurs prélèvements d'eau dans la région. Par conséquent, il est difficile pour le MELCC de définir le volume d'eau qui sera autorisé à long terme.

Le projet SCÉLANEAU offre l'occasion d'établir ce qui constituerait une exploitation durable, équitable et efficace des ressources en eau de la région. Bien que la responsabilité des producteurs agricoles soit d'abord de fournir l'information exigée à l'article 169, paragraphes 5^o et 6^o, en fonction du volume prélevé, le professionnel mandaté par le producteur agricole devrait normalement s'appuyer sur les résultats de ce projet pour établir le scénario de prélèvement et évaluer ses effets sur les autres usagers et le milieu humide. De même, lors de l'analyse de la demande d'autorisation, le ministre va prendre en considération les résultats du projet SCÉLANEAU pour rendre sa décision.

Un consensus semble exister parmi l'ensemble des usagers du secteur sur le fait que les ressources en eau subissent une forte pression. À titre préventif, il sera nécessaire aux usagers de collaborer et de prévoir des mesures de mitigation ou d'adaptation pour assurer une gestion durable de la ressource, notamment dans la perspective où le gouvernement ou le ministre jugeraient nécessaire d'appliquer l'article 31.79.1.

Situation n° 3 :

Plusieurs producteurs déposent leurs demandes pour obtenir l'autorisation de poursuivre les prélèvements qu'ils réalisent actuellement dans des étangs d'irrigation situés dans les coteaux sableux, qui sont donc en lien avec la nappe phréatique de surface, mais situés à moins de 30 mètres des milieux humides (tourbières). Selon notre compréhension de la réglementation actuelle, ces producteurs devront demander une autorisation et fournir les résultats d'études qui démontrent les impacts des prélèvements sur le milieu.

Question : Dans ce cas-ci :

Est-ce que notre compréhension de la réglementation est exacte?

Réponse :

Oui, votre compréhension de la réglementation est exacte.

Comme il a été mentionné précédemment, le critère des 30 mètres n'est pas déterminant pour décider si un prélèvement d'eau peut ou non être autorisé. Le débit moyen prélevé par un producteur agricole étant probablement supérieur à 379 000 litres/jour, la demande d'autorisation devra être accompagnée du rapport technique dont le contenu est défini aux paragraphes 5^o et 6^o de l'article 169 du REAFIE.

Le projet SCÉLANEAU offre l'occasion d'établir ce qui constituerait une exploitation durable, équitable et efficace des ressources en eau de la région. Comme il a été

mentionnée dans le commentaire précédent, le professionnel mandaté par le producteur agricole devrait normalement s'appuyer sur les résultats de ce projet pour établir le scénario de prélèvement et évaluer ses effets sur les autres usagers et le milieu humide.

Question : Si l'étude montre que l'eau prélevée dans les étangs est de l'eau qui, sinon, aurait rejoint la tourbière via des écoulements latéraux (tel que les résultats de 2021 semblent l'indiquer), quelle va être la position du ministère? Ces prélèvements pourront-ils être autorisés? Comment seront définis les volumes à prélever qui seront autorisés?

Réponse :

Tel qu'il a été mentionné en introduction du document (réponse à la situation n° 1), l'eau prélevée à des fins d'irrigation ne réalimente pas la tourbière. De plus, des étiages importants sont observés dans les cours d'eau. En conséquence, les prélèvements d'eau réalisés par l'entremise des bassins ont des impacts. Le projet SCELANEAU offre l'occasion d'établir ce qui constituerait une exploitation durable, équitable et efficace des ressources en eau de la région. Il devra viser à établir les scénarios de prélèvement d'eau permettant une exploitation durable, équitable et efficace des ressources en eau.

Si l'étude technique indique que l'eau prélevée dans les étangs a un impact significatif sur la tourbière, le rapport doit décrire les moyens qui seront pris pour minimiser les impacts sur les usagers et les milieux humides concernés. Des mesures de mitigation devront être proposées par le producteur agricole. Dans la perspective où ces mesures de mitigation paraissent satisfaisantes, elles pourront par exemple faire l'objet d'un suivi en vue du renouvellement de l'autorisation. Le ministre pourrait alors décider d'assortir l'autorisation de conditions ou de restrictions afin de minimiser ces effets et de préserver le milieu humide, comme le lui permettent les articles 31.79.1 et 31.80 de la LQE. Cependant, dans le cas où les mesures de mitigation sont jugées inadéquates, le producteur agricole devra modifier son projet de prélèvement d'eau.

Situation n° 4 :

Plusieurs producteurs déposent leurs demandes pour obtenir l'autorisation de poursuivre les prélèvements qu'ils réalisent actuellement dans des étangs d'irrigation situés en partie ou en totalité dans les milieux humides (tourbières). Selon notre compréhension de la réglementation actuelle, ces producteurs devront demander une autorisation et fournir les résultats d'études qui démontrent les impacts des prélèvements sur le milieu.

Question : Dans ce cas-ci :

Est-ce que notre compréhension de la réglementation est exacte?

Réponse :

Oui, votre compréhension de la réglementation est exacte.

Un producteur agricole qui fait une demande d'autorisation de prélèvement d'eau souterraine doit répondre dans un rapport technique aux exigences de l'article 169, paragraphes 5° et 6°, en fonction du volume d'eau prélevé.

Question : Est-ce que la loi prévoit la possible autorisation de prélèvements dans des milieux humides, ou, à partir du moment où le prélèvement a lieu dans le milieu humide, il est automatiquement refusé?

Réponse :

Le fait qu'un prélèvement d'eau s'effectue au sein d'un milieu humide ne constitue pas un critère automatique de refus. Ce sont les effets du prélèvement d'eau sur le milieu humide qui détermineront s'il peut ou non être autorisé. Au lieu de refuser la délivrance de l'autorisation, le ministre pourrait décider d'assortir l'autorisation de conditions ou de restrictions afin de minimiser ces effets et de préserver le milieu humide, comme le lui permettent les articles 31.79.1 et 31.80 de la LQE.

Question : Si les études démontrent que l'eau prélevée dans les étangs a un impact sur le milieu, mais qu'il est difficile ou impossible de quantifier cet impact, quelle va être la position du ministère? Ces prélèvements pourront-ils être autorisés? Comment seront définis les volumes à prélever qui seront autorisés?

Réponse :

Comme il a été précisé précédemment, au lieu de refuser la délivrance de l'autorisation, le ministre peut décider d'assortir l'autorisation de conditions ou de restrictions afin de minimiser ces effets et de préserver le milieu humide, comme le lui permettent les articles 31.79.1 et 31.80 de la LQE. Par exemple, dans une situation où il est difficile de quantifier l'impact subi par le milieu, un suivi pourrait être demandé afin de documenter les effets du prélèvement. Ce suivi pourrait également s'accompagner d'un seuil à ne pas dépasser (ex. : rabattement maximal des eaux souterraines à un site d'observation préétabli), c'est-à-dire en-dessous duquel le producteur agricole devra réduire son prélèvement d'eau.

Dans la perspective où les mesures de mitigation proposées paraissent satisfaisantes (ex : suivi), elles pourront par exemple servir à appuyer une demande de renouvellement de l'autorisation. Cependant, dans le cas où les mesures de mitigation sont jugées inadéquates, le producteur agricole devra modifier son projet de prélèvement d'eau.

Autres questions :

Question : Est-ce que le rapport de l'étude SCÉLANEAU sera reconnu par le ministère et suffisant sans autres études à fournir par les producteurs lors de leur demande d'autorisation de prélèvement d'eau dans le complexe tourbeux de Lanoraie?

Réponse :

Oui, selon les résultats de l'étude SCÉLANEAU, le rapport pourrait servir de référence tant pour le professionnel qui préparera le rapport technique exigé par le REAFIE que pour le ministre lors de l'analyse de la demande d'autorisation.

L'information issue du rapport de l'étude du projet SCÉLANEAU sera donc examinée par le MELCC. Cependant, puisqu'aucun résultat n'est disponible présentement, il est impossible de se prononcer sur la pertinence de l'information. Cependant, il est prévu que les résultats présentés dans le rapport auront un caractère régional, ce qui sera très utile aux producteurs agricoles pour connaître l'eau dont ils disposent et les impacts possibles sur leurs voisins et l'environnement, ainsi que pour appuyer, le cas échéant, les demandes d'autorisation des prélèvements d'eau à long terme (renouvellement).

Les exigences de l'article 169, paragraphes 5° et 6°, en fonction du volume prélevé, ont une portée plutôt locale. En ce sens, elles ne soustrairont pas les producteurs agricoles à l'obligation de soumettre un rapport technique. Toutefois, ce rapport pourra sans doute s'appuyer sur certaines conclusions du rapport d'étude.

Question : Dans le cas où de l'eau serait importée de l'extérieur du complexe tourbeux (ex. : fleuve Saint-Laurent, rivière L'Assomption, rivière La Chaloupe) pour alimenter des bassins d'irrigation étanches, est-ce que l'étanchéification des bassins d'irrigation actuelle nécessiterait une autorisation du ministère et d'autres études pour ces bassins :

- o Situés à plus de 30 mètres des milieux humides?
- o Situés à moins de 30 mètres des milieux humides?
- o Situés en partie ou en totalité dans les milieux humides?

Réponse :

L'autorisation de prélèvement d'eau s'applique à un prélèvement d'eau effectué dans le milieu (eau de surface et/ou eau souterraine). Advenant une cessation du prélèvement d'eau dans les bassins en raison d'une alimentation extérieure à la propriété (ex. : le producteur agricole serait desservi par un système de distribution d'eau, tel un aqueduc), les dispositions de l'article 31.83 de la LQE s'appliqueraient :

« 31.83. Le titulaire d'une autorisation relative à un prélèvement d'eau doit informer le ministre, dans le délai prescrit par règlement, de la cessation définitive de son prélèvement.

Le ministre peut imposer au titulaire toute mesure :

- 1° pour éviter de porter atteinte aux droits d'autres utilisateurs;
- 2° pour éviter le rejet de contaminants dans l'environnement;
- 3° pour assurer le démantèlement d'équipements et d'installations;
- 4° pour assurer un suivi environnemental.

La cessation définitive du prélèvement d'eau emporte l'annulation de plein droit de l'autorisation visant ce prélèvement, à l'exception, le cas échéant, de toute mesure qui y est prévue concernant cette cessation. Toutefois, le ministre peut, sur demande du titulaire, maintenir l'autorisation en vigueur pour la période et aux conditions qu'il fixe. »

Comme il a été précisé précédemment, à l'exception du contexte particulier d'application du paragraphe 2° de l'article 173 du REAFIE, le critère des 30 mètres n'est pas déterminant pour établir si le prélèvement d'eau a ou non des effets sur le milieu humide.

Dans tous les cas, l'abandon des bassins ou leur transformation en structure de stockage de l'eau devra être réalisé de manière à minimiser les effets sur le milieu humide. Si seulement une partie des bassins d'un producteur agricole est abandonnée ou transformée en structure de stockage de l'eau, l'autorisation de prélèvement d'eau pourrait prévoir les exigences (ex. : conditions) requises pour minimiser l'effet sur le milieu humide.

Dans le cadre d'une demande d'autorisation, il pourrait être nécessaire de documenter les caractéristiques d'étanchéisation en considérant que les bassins étanches sont partie intégrante du système de prélèvement d'eau. L'ampleur de cette documentation sera évaluée par le MELCC au cas par cas, puisqu'elle dépend de la superficie considérée et du mode d'étanchéisation (i.e., membrane vs argile).

Question : Est-ce que la situation est différente pour une étanchéification avec de l'argile vs avec une membrane étanche?

Réponse :

La question de l'étanchéification d'un bassin se pose dans le contexte de son utilisation à des fins de stockage de l'eau. La nécessité et la manière de le faire découleraient de l'objectif poursuivi : minimiser les pertes d'eau par infiltration, voire minimiser des effets négatifs pour le milieu humide. Le degré d'étanchéité pourra être établi en fonction de l'épaisseur et de la nature du matériel imperméable utilisé ou des caractéristiques de la membrane.

Question : Dans le cas où de l'eau serait importée de l'extérieur du complexe tourbeux (ex. : fleuve Saint-Laurent, rivière L'Assomption, rivière La Chaloupe) pour alimenter des bassins d'irrigation étanches, quels sont les contenus et critères d'acceptation d'une demande d'autorisation pour un prélèvement d'eau collectif? Qui fait la demande?

Réponse :

Le responsable du prélèvement d'eau « collectif » devra faire la demande d'autorisation. Dans le cas d'un prélèvement d'eau « collectif », il y aurait probablement lieu, pour les producteurs agricoles concernés, de former une copropriété ou une coopérative. Une telle association ne servirait pas uniquement à déterminer le responsable du prélèvement d'eau, c'est-à-dire le producteur qui soumettrait une demande d'autorisation, mais également à déterminer le partage de l'eau prélevée entre les producteurs agricoles. Un notaire serait la personne à consulter pour déterminer le mode d'association à privilégier.

Question : Si plusieurs producteurs déposent leur demande d'autorisation en même temps, est-ce que le ministère sera en mesure de répondre à la demande et dans quel délai? Pendant cette attente d'autorisation, est-ce que les producteurs peuvent poursuivre les prélèvements tels qu'ils se font actuellement?

Réponse :

Le MELCC s'engage à examiner dans un délai raisonnable les demandes d'autorisation de prélèvement d'eau. Cependant, comme le précise le dernier alinéa de l'article 364 du REAFIE :

« Un prélèvement d'eau peut se poursuivre après sa période de validité tant que la délivrance d'un renouvellement ou d'une nouvelle autorisation n'a pas été effectuée. »

En ce sens, les prélèvements existants avant 2014 sont considérés comme ayant déjà été autorisés.

Question : Comment le ministère gèrera-t-il les demandes d'autorisation sur le territoire du complexe tourbeux? De manière individuelle ou collective?

Réponse :

Le MELCC analysera les demandes d'autorisation de prélèvement d'eau en fonction de la méthode retenue par chaque producteur agricole (individuelle ou collective).

Cependant, comme il a été indiqué précédemment, le projet SCELANEAU offre l'occasion d'établir ce qui constituerait une exploitation durable, équitable et efficace des ressources en eau de la région de Lanoraie. Il serait donc souhaitable que l'information issue de ce projet soit utilisée par le professionnel mandaté par le producteur agricole

pour préparer le rapport technique décrivant le scénario de prélèvement et, le cas échéant, l'évaluation de ses effets sur les autres usagers et les milieux humides.

Question : Quels sont les critères d'évaluation pour autoriser ou refuser une demande d'autorisation de prélèvement d'eau? Et pour définir les volumes autorisés?

Réponse :

Comme il a été mentionné précédemment, les demandes d'autorisation de prélèvement d'eau soumis par les producteurs agricoles seront examinées par le MELCC selon le volume prélevé au regard des exigences de l'article 169, paragraphes 5° et 6°.

Les rapports techniques ont une portée plutôt locale. Il serait donc souhaitable que l'information issue du projet SCELANEAU soit utilisée par le professionnel mandaté par le producteur agricole pour établir le scénario de prélèvement et évaluer ses effets sur les autres usagers et les milieux humides.

Le MELCC pourrait utiliser cette information pour estimer les volumes à autoriser en fonction des connaissances du moment. De plus, comme il a été précisé précédemment, au lieu de refuser la délivrance de l'autorisation, le ministre peut décider d'assortir l'autorisation de conditions ou de restrictions, dans le cas d'incertitudes ou afin de minimiser ces effets et de préserver les milieux humides, comme le lui permettent les articles 31.79.1 et 31.80 de la LQE.

Question : Lorsqu'un producteur a obtenu du ministère une autorisation de prélèvement pour une durée de 10 ans, est-ce que ce ministère peut, avec ou sans préavis, modifier une autorisation avant l'échéance pour réduire le volume autorisé?

Réponse :

Oui. Voir l'article 31.79.1 de la LQE :

« 31.79.1. Le gouvernement ou le ministre, selon le cas, peut refuser la délivrance, la modification ou le renouvellement de l'autorisation relative à un prélèvement d'eau s'il est d'avis que ce refus sert l'intérêt public.

Ils peuvent aussi modifier de leur propre initiative une autorisation relative à un prélèvement d'eau pour le même motif.

Avant de prendre une décision en vertu du présent article, le gouvernement doit accorder au demandeur ou au titulaire de l'autorisation un délai d'au moins 15 jours pour présenter ses observations écrites.

Également, avant de prendre une décision en vertu du présent article, le ministre doit notifier à l'intéressé le préavis prescrit par l'article 5 de la Loi sur la justice administrative (chapitre J-3) et lui accorder un délai d'au moins 15 jours pour présenter ses observations. »

Question : Est-ce qu'il y a une différenciation entre eau souterraine libre de surface et eau souterraine de profondeur (sous une couche de matériaux imperméables)? Comme ce qui est observé au niveau du complexe tourbeux de Lanoraie. L'article 169 du REAFIE (paragraphe 7) fait référence à « **eau souterraine** ». Est-ce qu'il y a une définition de « eau souterraine »?

Réponse :

Une eau prélevée sous la surface du sol, donc avant son émergence à la surface, est considérée comme une eau « souterraine ». Dans le cas d'un bassin d'irrigation, s'il n'est

pas étanche, il doit être considéré comme un puits à large diamètre, c'est-à-dire que l'abaissement du niveau de l'eau dans le bassin va créer un « point bas » qui favorisera l'écoulement d'eau souterraine vers le bassin. Une fois le pompage terminé, le niveau d'eau dans le bassin va poursuivre sa remontée, jusqu'à l'équilibre avec les eaux souterraines présentes au pourtour du bassin.

Question : En parallèle du projet SCELANEAU (financé par le MAPAQ 2021-2024) et l'ajout récent de piézomètre dans le Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ) par le MELCC, est-ce que ce dernier serait ouvert de financer, conjointement avec le MAPAQ, des études complémentaires pour mieux comprendre le comportement de l'eau souterraine dans le complexe tourbeux?

Réponse :

Le MELCC serait intéressé à poursuivre la réalisation d'études pour mieux comprendre le comportement de l'eau souterraine dans le complexe tourbeux, notamment dans un contexte de changements climatiques. Les connaissances acquises permettraient de tendre vers une gestion durable, équitable et efficace de l'exploitation des ressources en eau de ce territoire. Ces connaissances seraient utiles tant pour les usagers de la ressource que pour le ministre lorsqu'il doit rendre une décision relative à une demande d'autorisation de prélèvement d'eau. Cela dit, le mécanisme de financement est à définir.

ANNEXE 8 – Présentation St-Rémi – 2023-12-07



L'Union des producteurs agricoles

PROJET SCELANEAU

ÉVALUATION DE SCÉNARIO DE GESTION INTÉGRÉE ET
SOUTENABLE DE L'EAU DANS LE COMPLEXE TOURBEUX
DE LANORAIE

Présenté aux Journées horticoles et grandes cultures de Saint-Rémi
7 décembre 2023

Dominic Brochu, agr., agent en agroenvironnement
Fédération de l'UPA de Lanaudière



Ce projet est financé dans le cadre du Programme d'appui à la lutte
contre les changements climatiques en agriculture découlant du Plan
d'action 2013-2020 sur les changements climatiques



McGill
UNIVERSITY





PLAN DE LA PRÉSENTATION

1. Description et Objectifs du projet
2. Contexte et enjeux de la tourbière de Lanoraie
3. Démarche de collecte de données
4. Connaissances acquises
5. Les producteurs dans tout ça?
6. Les constats
7. La suite...

DESCRIPTION DU PROJET SCELANEAU

2021-2024

Projet financé par le MAPAQ dans le cadre du Programme d'appui à la lutte contre les changements climatiques en agriculture (PALCCA)

Collaboration entre FUPAL, Sylvestre Delmotte, UQAM, McGill et IRDA



Ce projet est financé dans le cadre du Programme d'appui à la lutte contre les changements climatiques en agriculture découlant du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques



OBJECTIFS DU PROJET SCELANEAU

Assurer la pérennité de la ressource en eau à des fins d'irrigation des cultures tout en maintenant les fonctions écologiques du complexe tourbeux de Lanoraie et en tenant compte du contexte des changements climatiques.

Spécifiquement, le projet vise à:

- 1- Documenter les prélèvements d'eau;
- 2- Caractériser, comprendre et modéliser la dynamique hydrologique et hydrogéologique du complexe tourbeux;
- 3- Évaluer la faisabilité (technico-économique et environnementale) de diversifier les sources d'approvisionnement en eau pour les producteurs:
 - Endiguement sur certains cours d'eau;
 - Prélever l'eau dans certaines rivières à proximité ou au fleuve Saint-Laurent via un aqueduc collectif.

CONTEXTE ET ENJEUX DE LA TOURBIÈRE DE LANORAIE

- Conflit d'usage;
- Manque d'eau pour irrigation;
- Aqueduc municipal;
- Assèchement de la tourbière;
- Pertes des fonctions hydrologiques et écologiques du milieu;
- Accentuation des enjeux avec les changements climatiques;
- Appréhension des producteurs face aux demandes d'autorisation de prélèvement d'eau dès 2025.

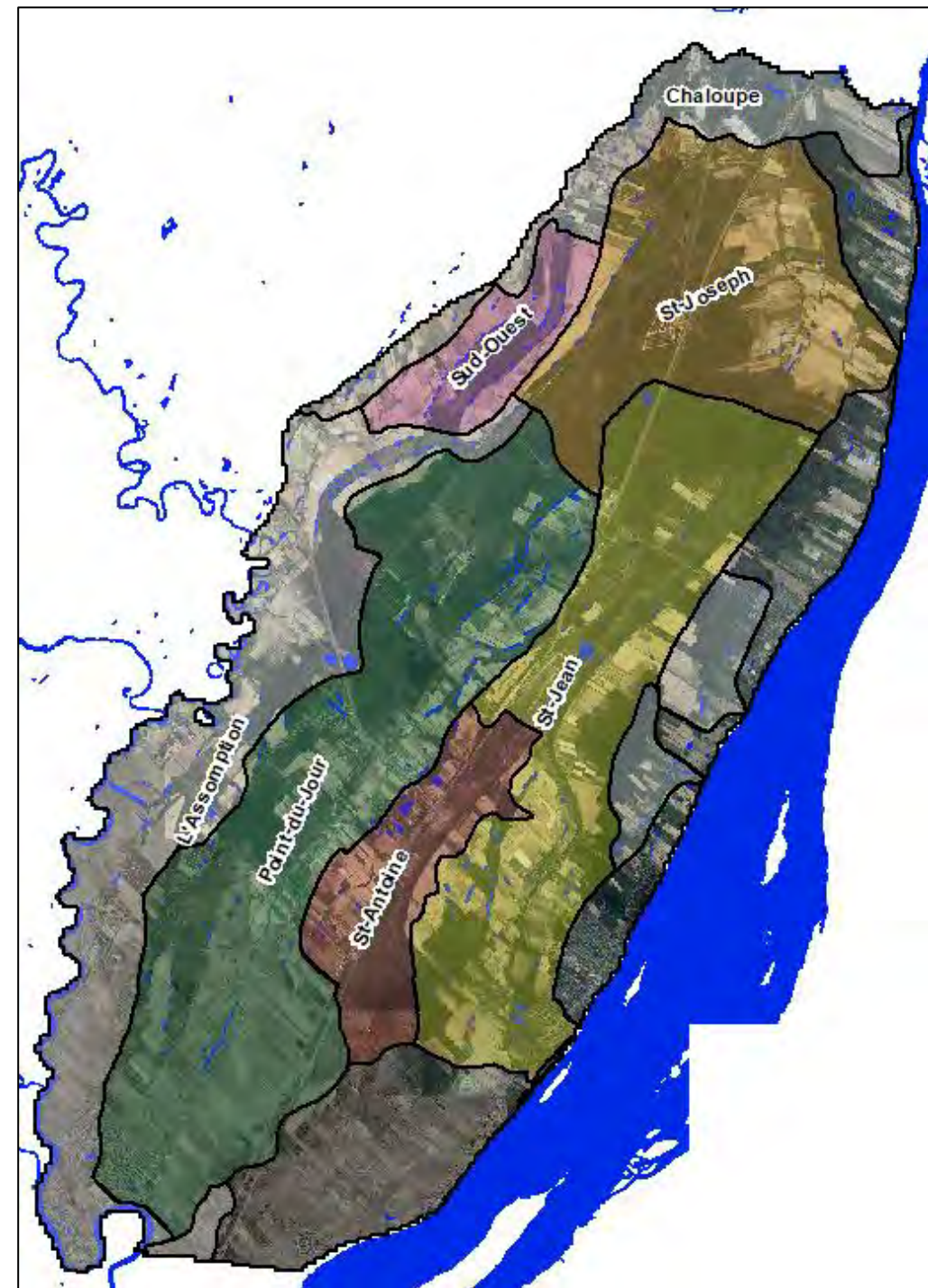




DÉMARCHE DE COLLECTE DE DONNÉES

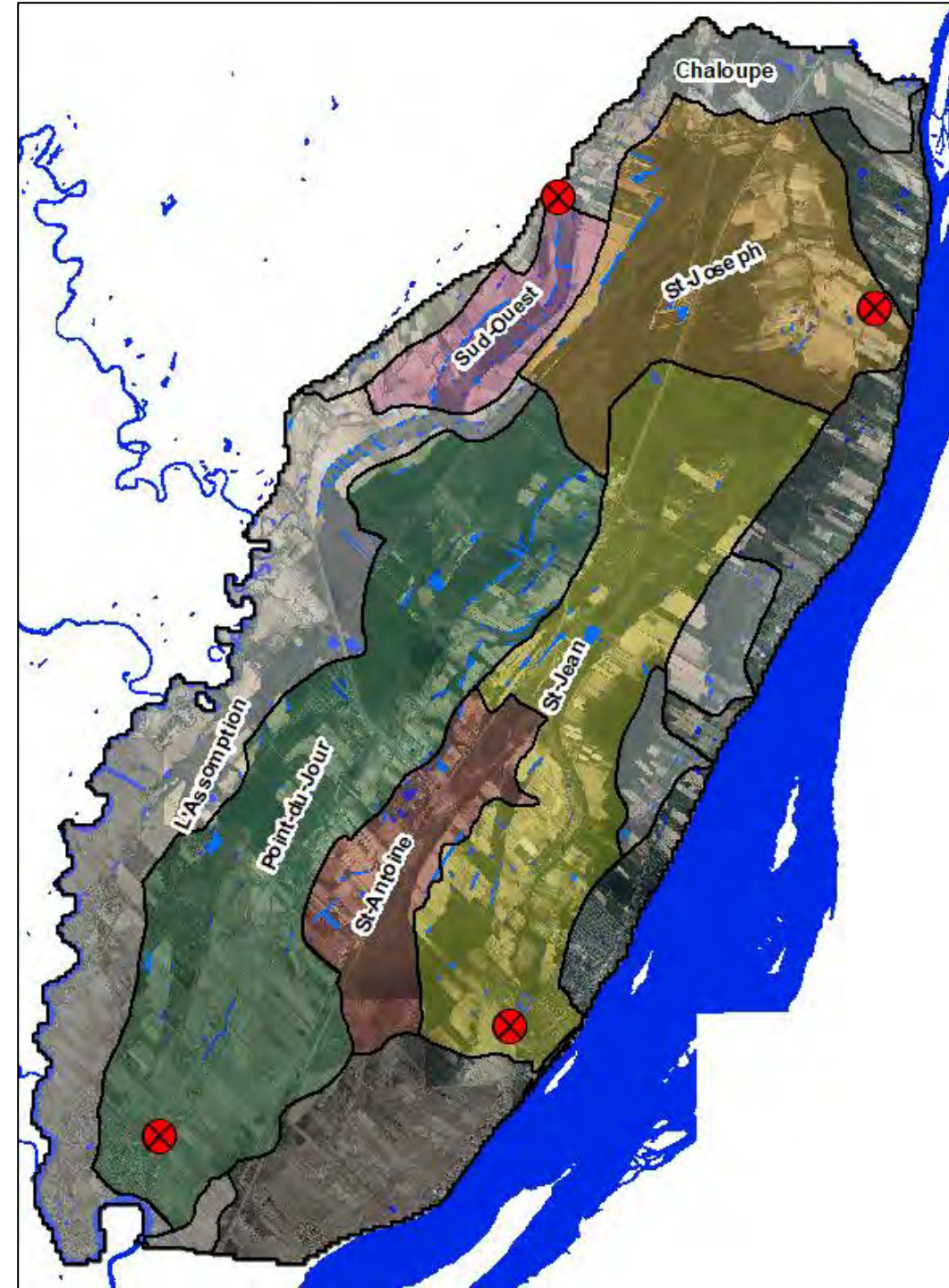
CARACTÉRISATION DES PRÉLÈVEMENTS D'EAU (FUPAL)

- Caractérisation des prélèvements;
 - Géoréférencement des sites de prélèvements;
 - Habitude d'irrigation en année normale (par mois);
 - Cultures, rotations, superficies irriguées, dimension des bassins, etc.;
 - Appréhension face au manque d'eau dans le futur
- Sensibilisation et mobilisation



SUIVIS HYDROMÉTRIQUES 2021-2023 (IRDA)

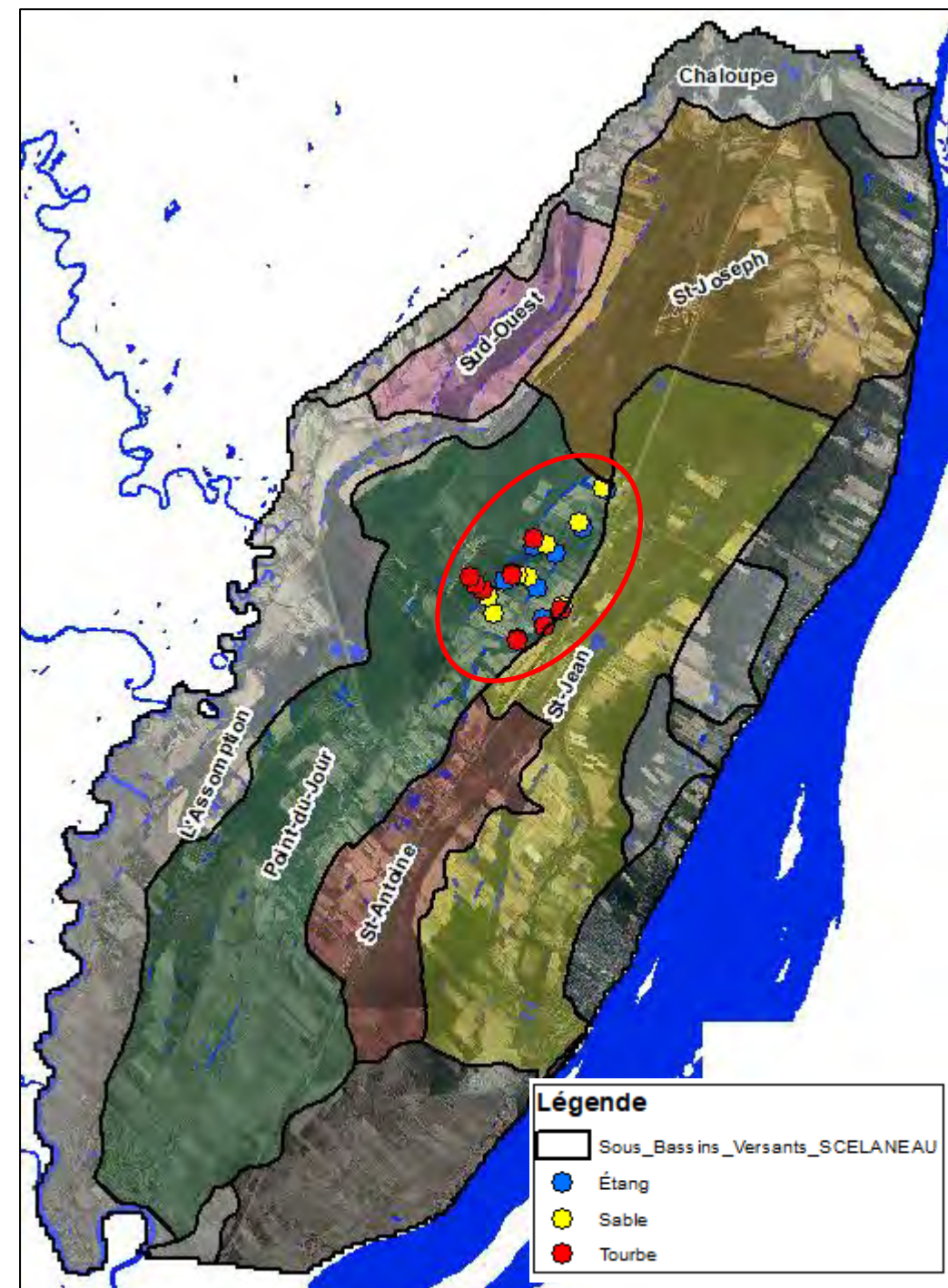
- 4 stations
 - Bras Sud-Ouest
 - St-Joseph
 - St-Jean (incluant St-Antoine)
 - Point du Jour
- Équipements (15 min):
 - HOBO (hauteur d'eau)
 - YSI (conductivité)
- Mesures ponctuelles de débits
- Pas de station sur la St-Antoine



SUIVIS HYDROGÉOLOGIQUES 2021-2023 (UQAM)

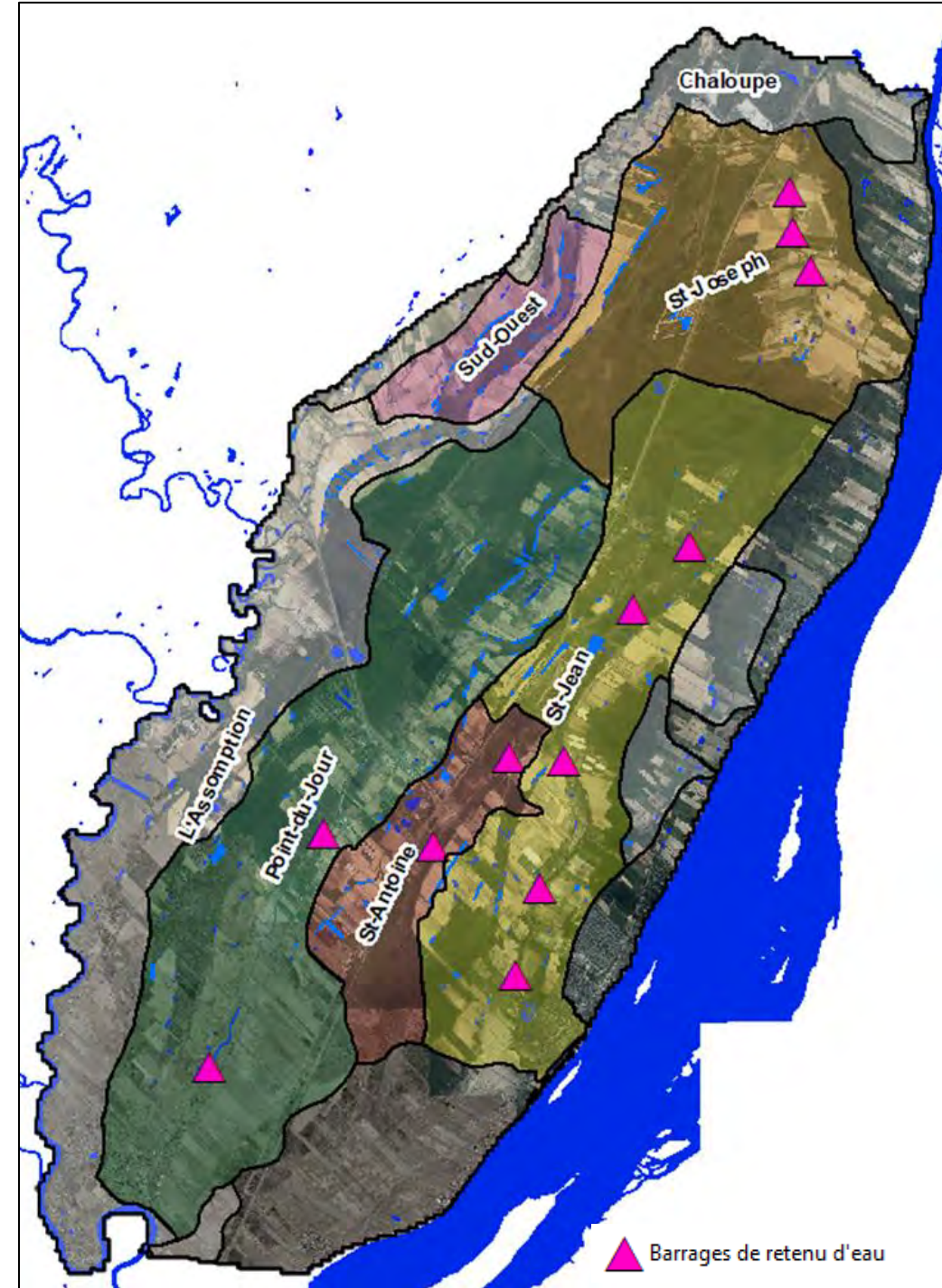
Coteau St-Henri

- 9 piézomètres et sondes dans la tourbe;
- 9 piézomètres et sondes dans les parcelles;
- 9 sondes dans les bassins d'irrigation



ÉVALUATION DE SCÉNARIO D'APPROVISIONNEMENT ALTERNATIF (MCGILL)

- Présence de 12 barrages de retenue d'eau
 - Possibilité d'ajouter des barrages
- Possibilité d'aqueduc du fleuve Saint-Laurent ou rivière L'Assomption:
 - L'ensemble des besoins;
 - Une partie des besoins
- Technique, économique, environnemental

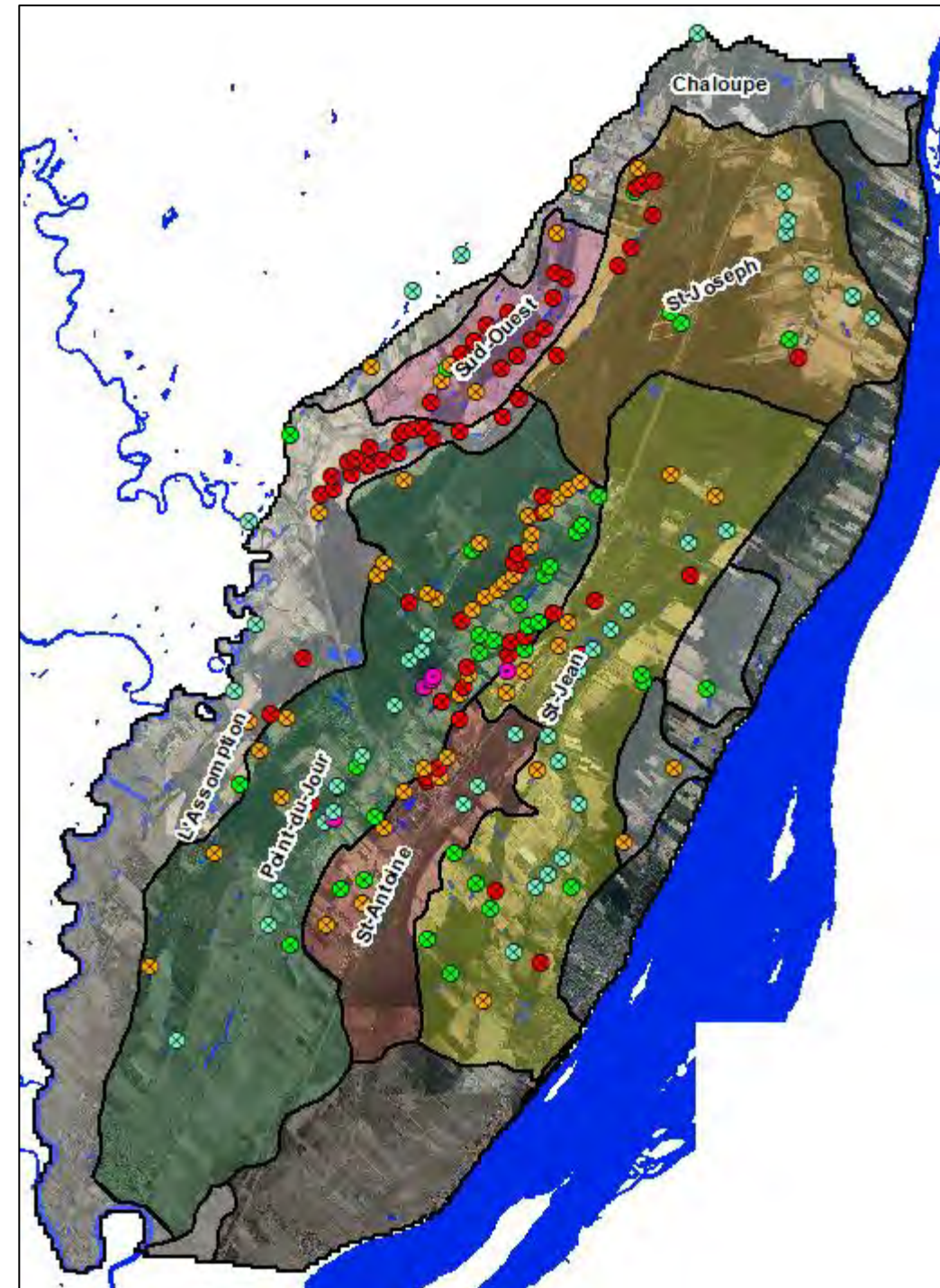




LES CONNAISSANCES ACQUISES

CARACTÉRISATION DES PRÉLÈVEMENTS D'EAU (FUPAL)

- 34 entreprises caractérisées sur 45 à 50
- 209 sites de prélèvement d'eau, dont 193 pour irrigation:
 - 72% bassin d'irrigation
 - 28% cours d'eau
- Prélèvement total annuel de 7,5 M m³
 - 84% en juin, juillet et août
 - 10% en mai et septembre
- Lors des années particulièrement sèches, ↑25% et +



LES PRÉLÈVEMENTS LES PLUS CRITIQUES

Même si le MELCCFP nous mentionne que:

- Pas de refus d'office pour une demande de prélèvement en cours d'eau;
- La distance du bassin d'irrigation par rapport à un milieu humide (MH) ne constitue pas un critère d'acceptation automatique d'une autorisation (si à plus de 30m) ou de refus (si dans le MH)

Lieu de la prise d'eau	Nombre de producteur	Nombre de prise d'eau	Superficie moyenne irriguée annuellement (ha)	Volume moyen prélevé annuellement (m ³)	Volume moyen prélevé annuellement par ha (m ³ /ha)	Superficie bassin (ha)	Prl (%)
Cours d'eau *	18	42	809	2 140 843	2 646		28%
Bassin 0m-MH2022	22	64	841	1 955 593	2 325	47	26%
Bassin 0-30m-MH2022	25	53	687	2 025 093	2 948	53	27%
Bassin >30m-MH2022	19	34	455	1 429 659	3 142	29	19%
Sous-total bassin	30	151	1 983	5 410 345	8 415	129	72%
Grand total*	32	193	2 792	7 551 188	2 704		100%
					270 mm/ha/an		
Les plus critiques	40	106	1 650	4 096 436	4 971	47	54%

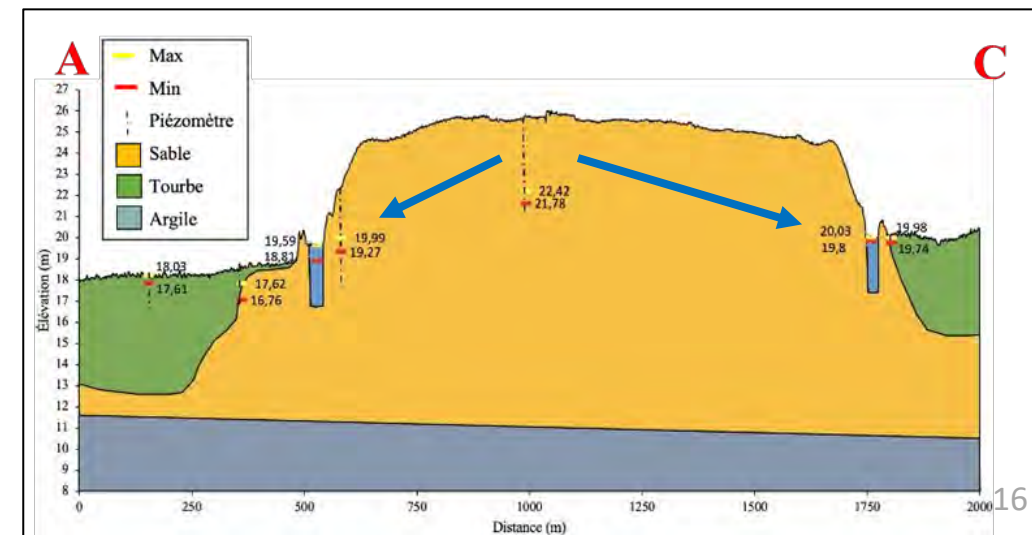
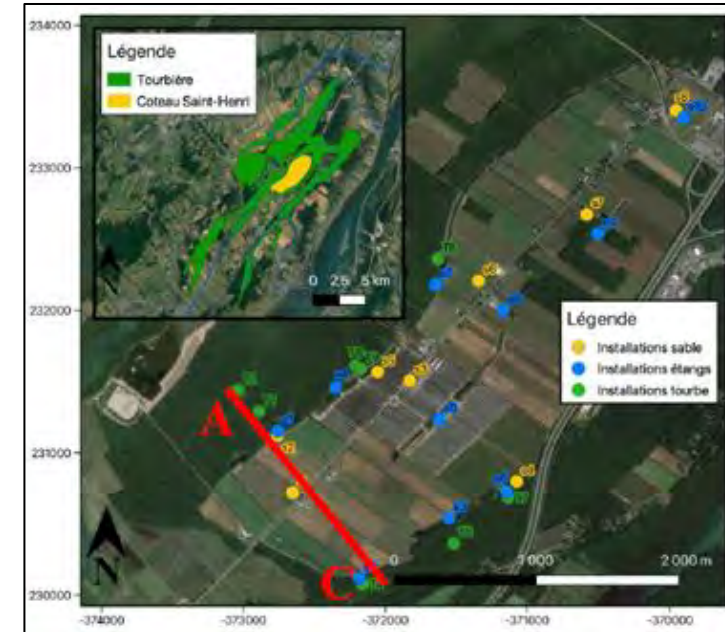
SUIVIS HYDROMÉTRIQUES 2021-2023 (IRDA)

- Débits mesurés influencés par les prélèvements;
- Calcul de débit d'étiage théorique avant les prélèvements;
 - Juillet et août: les prélèvements en cours d'eau représentent de 30 à 80% des débits d'étiage.
 - MELCCFP: moins de 15% du débit
- Estimation des débits d'étiage de récurrence 2 ans sur 7 jours consécutifs ($Q_{2,7}$);
- Estimation des $Q_{2,7}$ en climat futur (2050): -20%;
- Seulement 3 ans de suivis:
 - Calibration des modèles peu performante
 - Modèle hydrologique peu performant



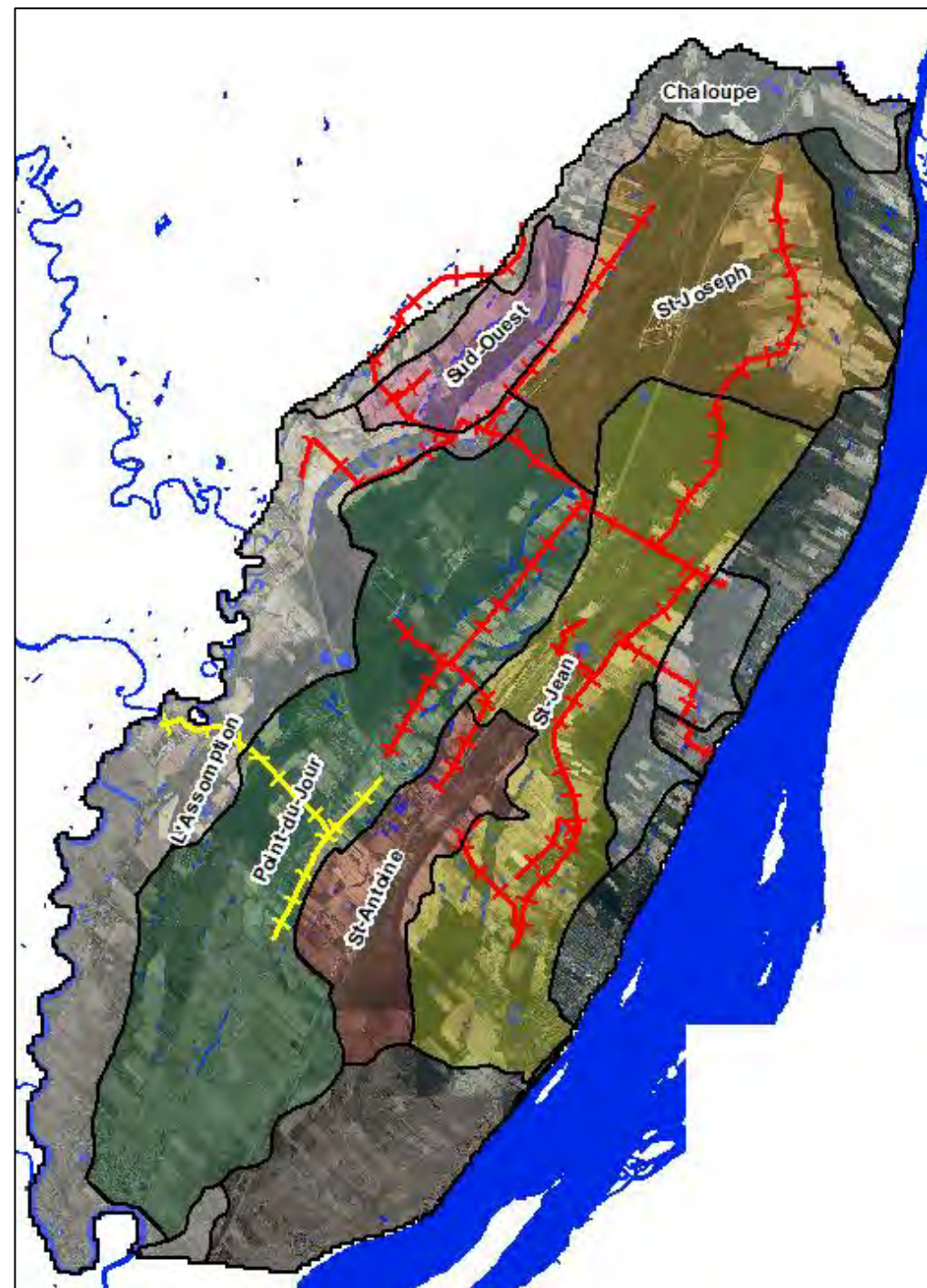
SUIVIS HYDROGÉOLOGIQUES 2021-2023 (UQAM)

- Bassins d'irrigation alimentés par les coteaux;
- L'eau intercepté par bassins, réduit l'apport d'eau à la tourbière;
- La tourbière exerce une pression d'eau qui contribue à maintenir le niveau de la nappe dans le coteau;
- Niveau d'eau dans le sable et la tourbière diminue à proximité des bassins lors des pompages;
- L'effet des pompages : 20 à 30 m;
- Peu ou pas de recharge de la nappe associée à l'irrigation;
- 3 ans de suivis, trop court.



SCÉNARIOS D'APPROVISIONNEMENT EN EAU (MCGILL)

- Endiguement sur certains cours d'eau:
 - Pas recommandé par le MELCCFP;
 - Nécessite une autorisation
- Aqueduc collectif provenant du fleuve Saint-Laurent:
 - En cours d'analyse, mais peu d'attente
 - Évaluation sommaire: >90 km de pipeline



LES PRODUCTEURS DANS TOUT ÇA?

1 rencontre annuelle

Bon taux de participation

Stress généralisé:

- Demande de CA, août 2025;
- Précarité de prélèvement
 - Cours d'eau vs 15% débit d'étiage;
 - Bassin vs proximité de la tourbière;
- Complexité, temps d'analyse et coût (10000-15000\$) des demandes de CA;
- Fragilité d'une autorisation;
- Conflits entre producteurs appréhendés;
- Sentiment d'urgence: solutions d'approvisionnement vs 2025



CONSTATS

Tout ça va trop vite!
2025 est trop vite.
Personne ne sera prêt pour 2025.

Peu de données sur 3 ans;
Trop de questions en suspens!
Besoin en eau de la tourbière vs sa pérennité?
État actuel de la tourbière? Réversible?





La suite... SCELANEAU - 2

MELCCFP:

- Beaucoup d'espoir conclusion SCELANEAU-1;
- Intérêt à poursuivre la recherche

Les projets à venir:

- Poursuivre suivi des eaux de surface et souterraine et modélisation intégrée eaux de surface et souterraine // Documentation de l'historique de l'écologie de la tourbière et de son état actuel;
- Mesurer les prélèvements et évaluer des solutions alternatives d'approvisionnement en eau:
 - Aqueducs collectifs par secteur;
 - Bassins étanches et remplissage:
 - Seulement au printemps (>100% besoins);
 - Tout au long de l'année à faible débit (<100% besoins)



Questions?

ANNEXE 9 – Présentation Comité tourbière – 2024-04-05



L'Union des producteurs agricoles

PROJET SCELANEAU

ÉVALUATION DE SCÉNARIO DE GESTION INTÉGRÉE ET SOUTENABLE DE L'EAU DANS LE COMPLEXE TOURBEUX DE LANORAIE

Présenté au Comité tourbière de Lanoraie
5 avril 2024

Dominic Brochu, agr., agent en agroenvironnement
Fédération de l'UPA de Lanaudière



Ce projet est financé dans le cadre du Programme d'appui à la lutte contre les changements climatiques en agriculture découlant du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques





PLAN DE LA RENCONTRE

1. Description et objectifs du projet
2. Contexte et enjeux de la tourbière de Lanoraie
3. Démarche de collecte de données et connaissances acquises :
 - Caractérisation des prélèvements d'eau des producteurs
 - Suivi hydrologique des eaux de surface
 - Suivi hydrologique des eaux souterraines
 - Besoins en eau pour l'irrigation des cultures
4. Scénarios d'irrigation et piste de solution
 - Bassins étanches
 - Réseaux d'irrigation

DESCRIPTION DU PROJET SCELANEAU

2021-2024

Projet financé par le MAPAQ dans le cadre du Programme d'appui à la lutte contre les changements climatiques en agriculture (PALCCA)

Collaboration entre FUPAL, Sylvestre Delmotte, UQAM, McGill et IRDA



Ce projet est financé dans le cadre du Programme d'appui à la lutte contre les changements climatiques en agriculture découlant du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques



OBJECTIFS DU PROJET SCELANEAU

Assurer la pérennité de la ressource en eau à des fins d'irrigation des cultures tout en maintenant les fonctions écologiques du complexe tourbeux de Lanoraie et en tenant compte du contexte des changements climatiques.

Spécifiquement, le projet vise à:

- 1- Documenter les prélèvements d'eau;
- 2- Caractériser, comprendre et modéliser la dynamique hydrologique et hydrogéologique du complexe tourbeux;
- 3- Évaluer la faisabilité (technico-économique et environnementale) de diversifier les sources d'approvisionnement en eau pour les producteurs:
 - Endiguement sur certains cours d'eau;
 - Prélever l'eau dans certaines rivières à proximité ou au fleuve Saint-Laurent via un aqueduc collectif.

CONTEXTE ET ENJEUX DE LA TOURBIÈRE DE LANORAIE

- Conflit d'usage;
- Manque d'eau pour irrigation;
- Aqueduc municipal;
- Assèchement de la tourbière;
- Pertes des fonctions hydrologiques et écologiques du milieu;
- Accentuation des enjeux avec les changements climatiques;
- Appréhension des producteurs face aux demandes d'autorisation de prélèvement d'eau dès 2025;
- Sablière: pompage d'eau hors des bassins vers le CD Point-du-Jour en 2021 (ensuite ?)

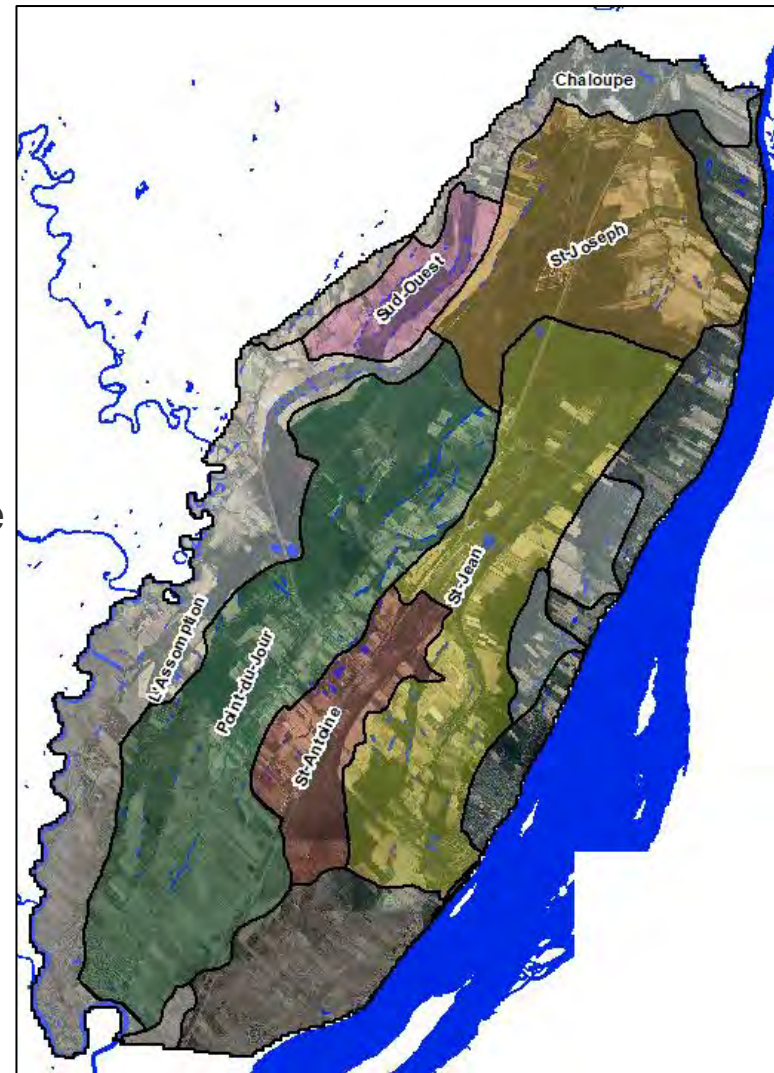




DÉMARCHE DE COLLECTE DE DONNÉES ET CONNAISSANCES ACQUISES

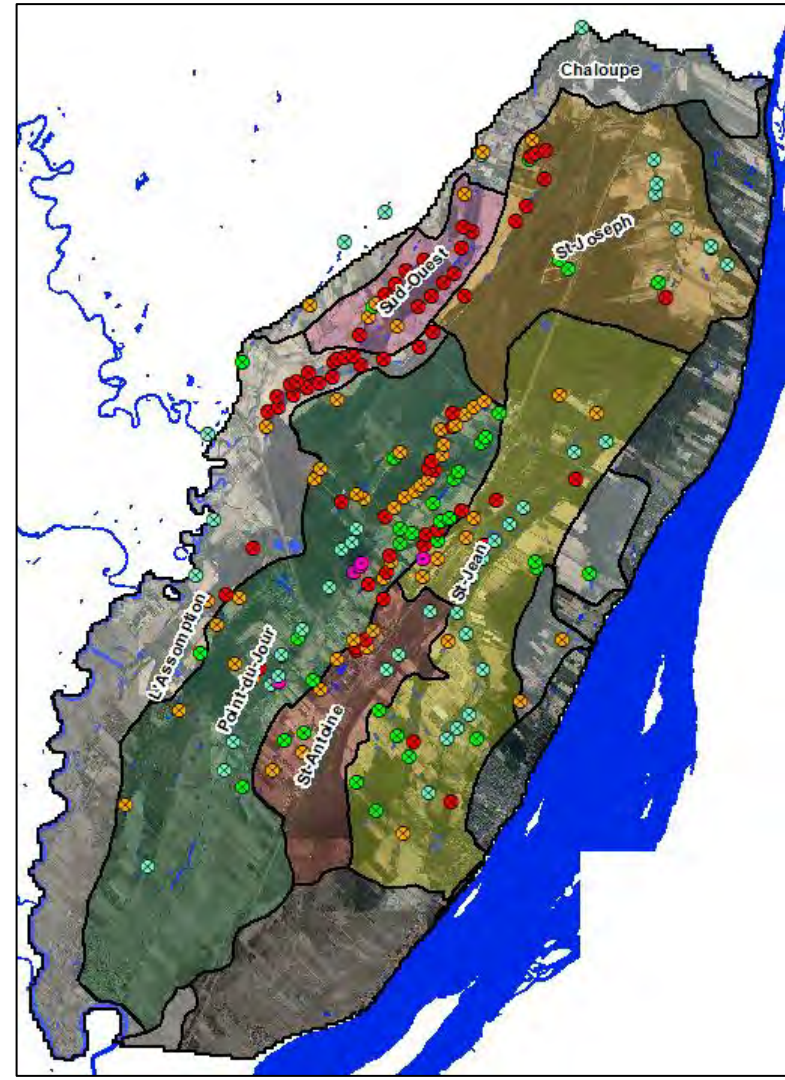
CARACTÉRISATION DES PRÉLÈVEMENTS D'EAU (FUPAL)

- Caractérisation des prélèvements;
 - Géoréférencement des sites de prélèvements;
 - **Habitude d'irrigation** en année normale (par mois);
 - Cultures, rotations, superficies irriguées, dimension des bassins, etc.;
 - Appréhension face au manque d'eau dans le futur
- Sensibilisation et mobilisation des producteurs



CARACTÉRISATION DES PRÉLÈVEMENTS D'EAU (FUPAL)

- 34 entreprises caractérisées sur 45 à 50
- 209 sites de prélèvement d'eau, dont 193 pour irrigation:
 - 72% bassin d'irrigation
 - 28% cours d'eau
- Environ 4 000 ha irrigué annuellement
- Prélèvement total annuel de 7,5 M m³
 - 84% en juin, juillet et août
 - 10% en mai et septembre
- Lors des années particulièrement sèches, ↑25% et +



LES PRÉLÈVEMENTS LES PLUS CRITIQUES

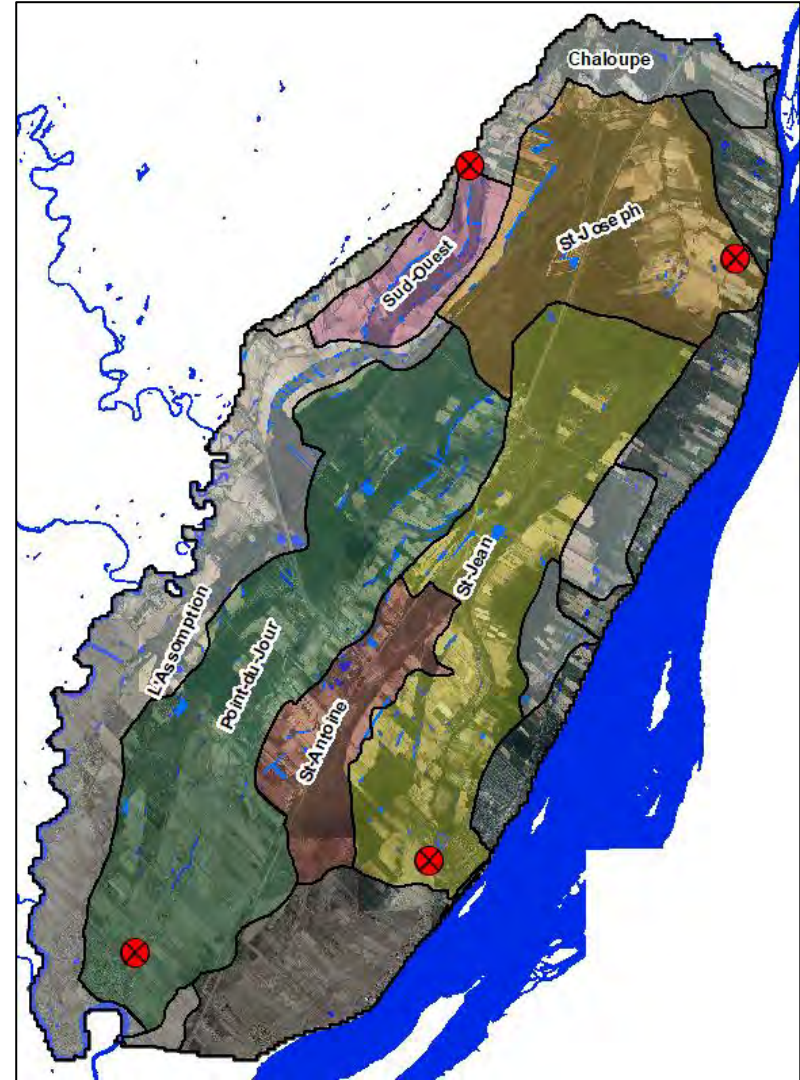
Même si le MELCCFP nous mentionne que:

- Pas de refus d'office pour une demande de prélèvement en cours d'eau;
- La distance du bassin d'irrigation par rapport à un milieu humide (MH) ne constitue pas un critère d'acceptation automatique d'une autorisation (si à plus de 30m) ou de refus (si dans le MH)

Lieu de la prise d'eau	Nombre de producteur	Nombre de prise d'eau	Superficie moyenne irriguée annuellement (ha)	Volume moyen prélevé annuellement (m ³)	Volume moyen prélevé annuellement par ha (m ³ /ha)	Superficie bassin (ha)	Prl (%)
Cours d'eau *	18	42	809	2 140 843	2 646		28%
Bassin 0m-MH2022	22	64	841	1 955 593	2 325	47	26%
Bassin 0-30m-MH2022	25	53	687	2 025 093	2 948	53	27%
Bassin >30m-MH2022	19	34	455	1 429 659	3 142	29	19%
Sous-total bassin	30	151	1 983	5 410 345	8 415	129	72%
Grand total*	32	193	2 792	7 551 188	2 704		100%
					270 mm/ha/an		
Les plus critiques	40	106	1 650	4 096 436	4 971	47	54%

SUIVIS HYDROMÉTRIQUES 2021-2023 (IRDA)

- 4 stations
 - Bras Sud-Ouest
 - St-Joseph
 - St-Jean (incluant St-Antoine)
 - Point du Jour
- Équipements (15 min):
 - HOBO (hauteur d'eau)
- Mesures ponctuelles de débits
- Débits mesurés influencés par les prélèvements



ÉTAT DES CONNAISSANCES À CE JOUR

→ Suivi hydrologique eau de surface - IRDA

Mesures de débits (m³/s) au cours de l'été 2021

Année 2021

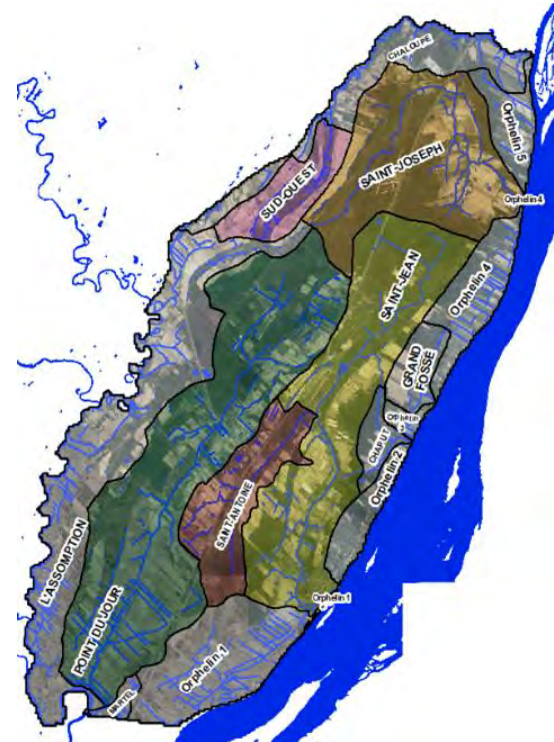
Date	Saint-Joseph	Bras Sud-Ouest	Saint-Jean	Point du jour
Avril (8)	1,172	0,255	1,549	1,802
Mai (13)	0,414	0,172	0,640	0,553
Juillet (23)	0,114	0,040	0,157	0,130
Août (6)	0,010	0,015	0,026	0,056
Août (10)	0,051	0,027	0,030	0,007
Septembre (14)	0,082	0,036	0,104	0,124
Septembre (28)	0,128	0,064	0,069	0,169
Novembre (1 ^{er})	0,756	0,269	1,902	1,283
Novembre (16)	0,546	0,206	1,212	1,018
Novembre (30)	0,346	0,132	0,513	0,441
minimum	0,010	0,015	0,026	0,007
maximum	1,172	0,269	1,902	1,802
moyenne	0,362	0,122	0,620	0,558

* m³/s

ESTIMATION DES DÉBITS D'ÉTIAGE « NATURELS »

Estimation des débits d'étiage « naturels » des cours d'eau à partir des prélèvements caractérisés chez les producteurs:

2021		St-Joseph	Sud-Ouest	St-Jean + St-Antoine	Point-du-Jour
Mai	Débit d'étiage mesuré (m ³ /s) (IRDA)	0,414	0,172	0,640	0,553
	Débit d'étiage calculé (m ³ /s) (IRDA + prl prod)			0,651	0,555
	% prélevé			1,7%	0,4%
Juillet	Débit d'étiage mesuré (m ³ /s) (IRDA)	0,114	0,040	0,157	0,130
	Débit d'étiage calculé (m ³ /s) (IRDA + prl prod)	0,202		0,336	0,185
	% prélevé	44%		53%	30%
Août	Débit d'étiage mesuré (m ³ /s) (IRDA)	0,010	0,015	0,026	0,007
	Débit d'étiage calculé (m ³ /s) (IRDA + prl prod)	0,060		0,104	0,038
	% prélevé	83%		75%	82%



Les prélèvements en cours d'eau doivent être inférieur à 15% du débit d'étiage

VOLUME D'ÉCOULEMENT

Volume qui coule durant l'été dans les cours d'eau (m³) (données de 2021 seulement)

	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	TOTAL
ST JOSEPH	767 901	576 890	513 650	712 024	1 118 388	3 688 853
ST JEAN	1 468 575	770 681	421 276	696 142	1 693 690	5 050 364
POINT DU JOUR	2 267 378	969 824	621 249	475 599	1 104 101	5 438 151
BRAS DU SUD OUEST	426 870	384 246	239 396	245 477	388 968	1 684 957

Pour un total de 15 800 000 m³ environ

Lieu de la prise d'eau	Nombre de producteur	Nombre de prise d'eau	Superficie moyenne irriguée annuellement (ha)	Volume moyen prélevé annuellement (m ³)	Volume moyen prélevé annuellement par ha (m ³ /ha)	Superficie bassin (ha)	Prl (%)
Cours d'eau *	18	42	809	2 140 843	2 646		28%

Soit 13,5% du débit total des cours d'eau qui est prélevé durant l'été

SUIVIS HYDROMÉTRIQUES 2021-2023 (IRDA)

- Calibration du modèle hydrologique SWAT (2021-2022);
- Reconstitution des débits avec ce modèle des observations météorologiques 1995-2015;
- Estimation des $Q_{2,7}$ avec les données 1995-2015;

- Seulement 3 ans de suivis:
 - Calibration du modèle peu performante;
 - Modélisation hydrologique (SWAT) peu performante;
 - Module d'irrigation SWAT corrompu.



SUIVIS HYDROMÉTRIQUES 2021-2023 (IRDA)

- Synthèse des valeurs de $Q_{2,7}$ plus conservatrices:

Tableau 11. Synthèse des valeurs de $Q_{2,7}$ plus conservatrices.

Bassin	$Q_{2,7}$ (m ³ /s)	Période	Méthode
Saint-Jean	0.027	Annuelle	Reconstitution historique
Saint-Joseph	0.032	Estivale	Relation empirique
Bras-du-Sud-Ouest	0.007	Estivale	Relation empirique
Point-du-Jour	0.062	Estivale	Relation empirique

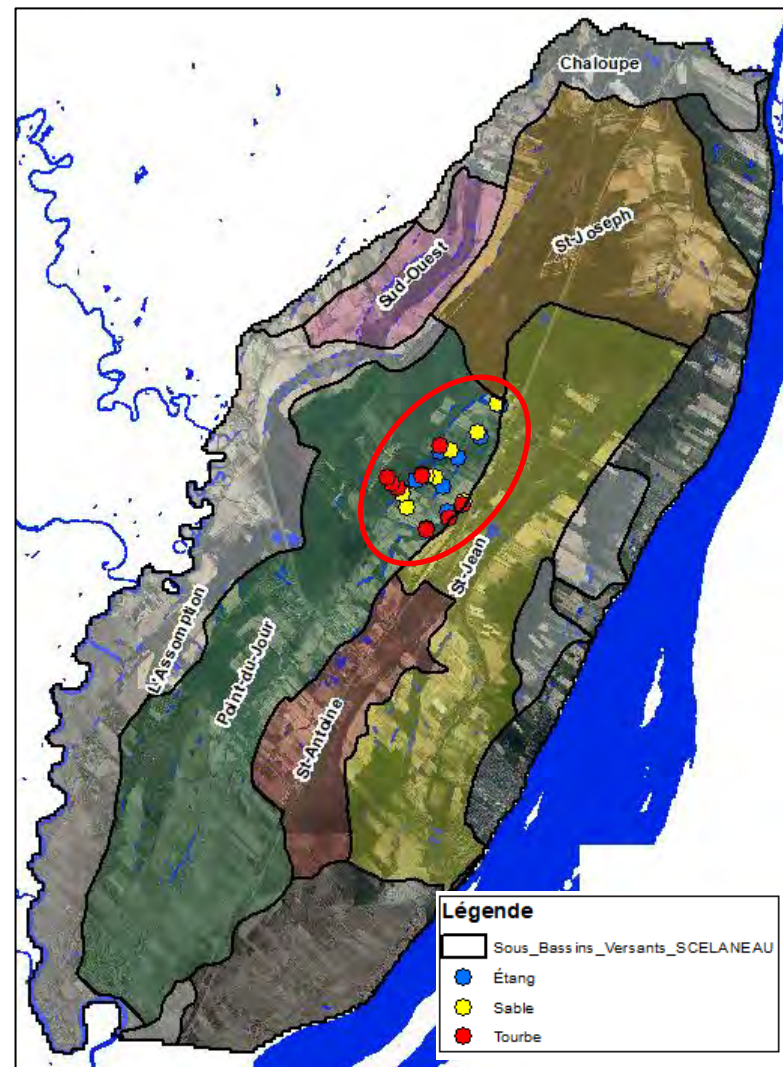
- Estimation des $Q_{2,7}$ en climat futur (2050): -20%;



SUIVIS HYDROGÉOLOGIQUES 2021-2023 (UQAM)

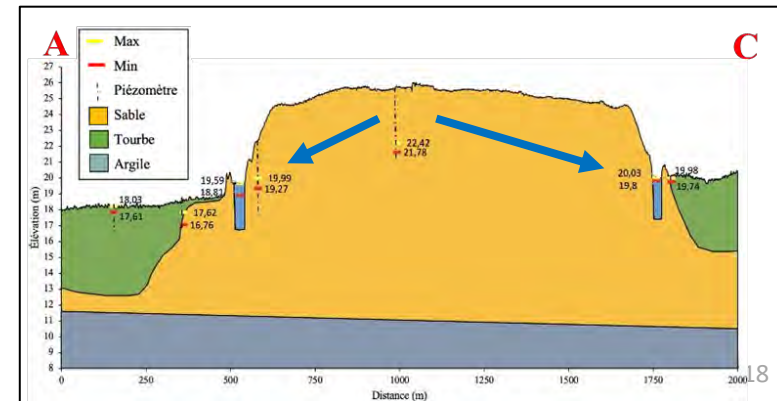
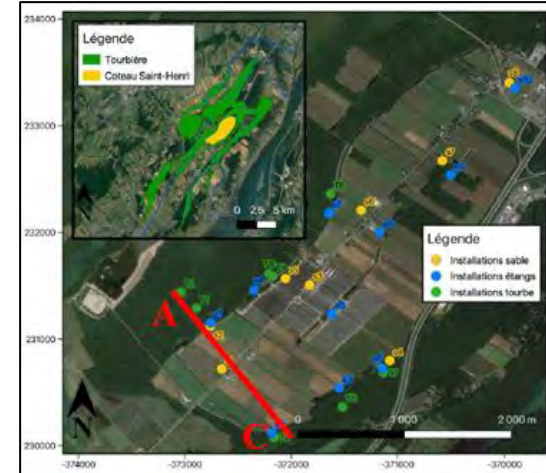
Coteau St-Henri

- 9 piézomètres et sondes dans la tourbe;
- 9 piézomètres et sondes dans les parcelles;
- 9 sondes dans les bassins d'irrigation



SUIVIS HYDROGÉOLOGIQUES 2021-2023 (UQAM)

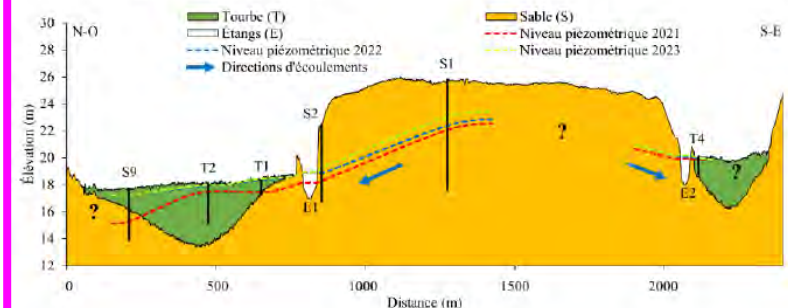
- Bassins d'irrigation alimentés par les coteaux;
- L'eau intercepté par bassins, réduit l'apport d'eau à la tourbière;
- L'eau dans la tourbière exerce une pression qui contribue à maintenir le niveau de la nappe dans le coteau;
- Niveau d'eau dans le sable et la tourbière diminue à proximité des bassins lors des pompages;
- La zone d'influence des pompages dans un étang d'irrigation s'étend au-delà de 30m dans le coteau, et probablement au-delà de 150m dans la tourbière.
- Peu ou pas de recharge de la nappe associée à l'irrigation.



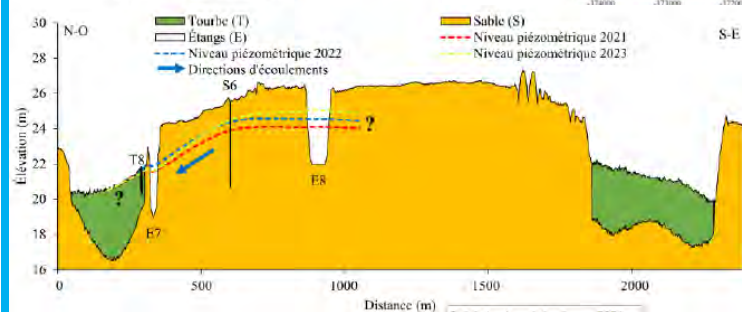
SUIVIS HYDROGÉOLOGIQUES 2021-2023 (UQAM)



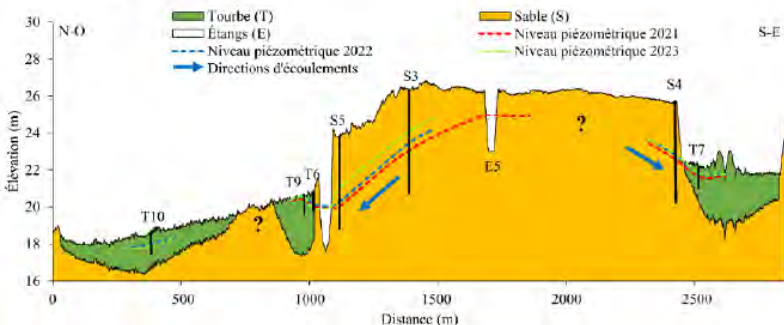
a) Transect 5



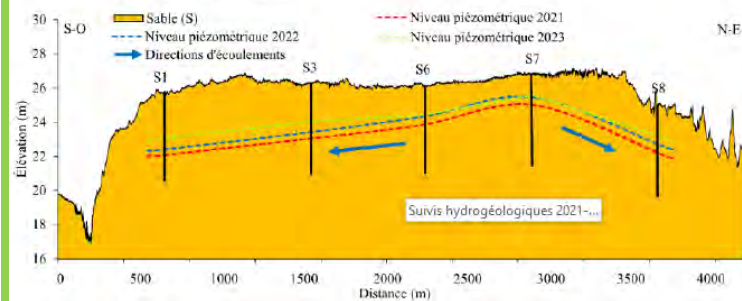
c) Transect 7



b) Transect 6



d) Transect 8



SUIVIS HYDROGÉOLOGIQUES 2021-2023 (UQAM)

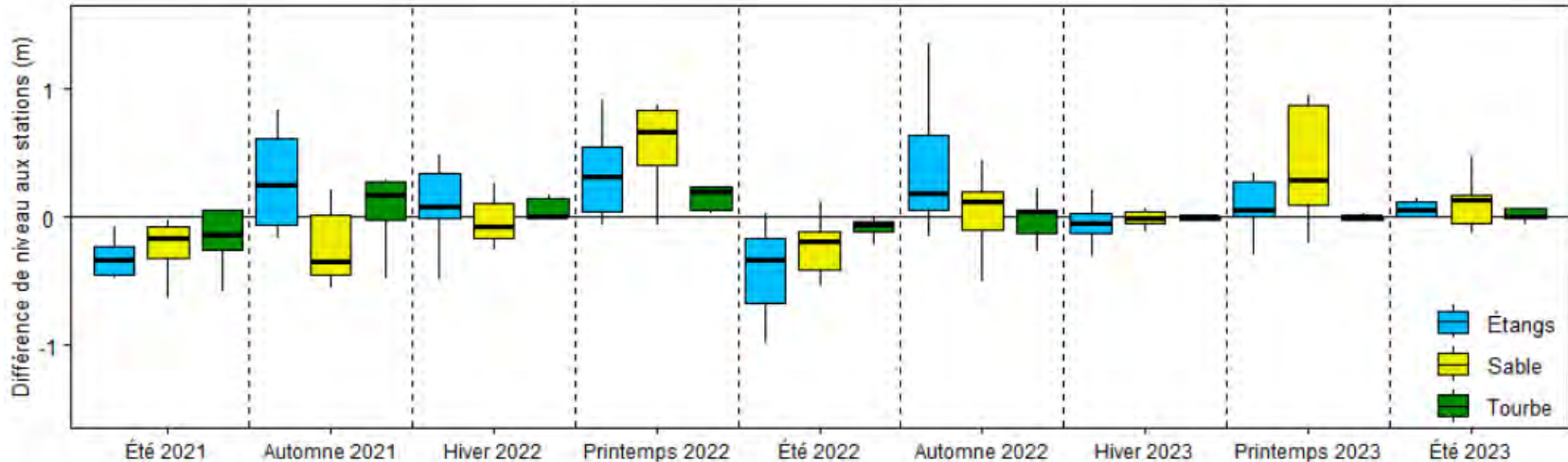


Figure 16. Différences de niveaux aux stations dans le sable, la tourbe et les étangs en fonction des saisons de 2021 à 2023 (Chéné, 2024)

Été = juin à août, Automne = sept. à nov., Hiver = déc. à fév., Printemps = mars à mai

SUIVIS HYDROGÉOLOGIQUES 2021-2023 (UQAM)

- Modélisation MODFLOW pour reproduire les conditions d'écoulement souterrain dans la zone d'étude et les flux échangés entre le sable, les étangs et la tourbière;
- La recharge calculée de la nappe dans le sable avec la méthode de fluctuations des niveaux de nappe est de 289 mm/an (moyenne 2022-2023);

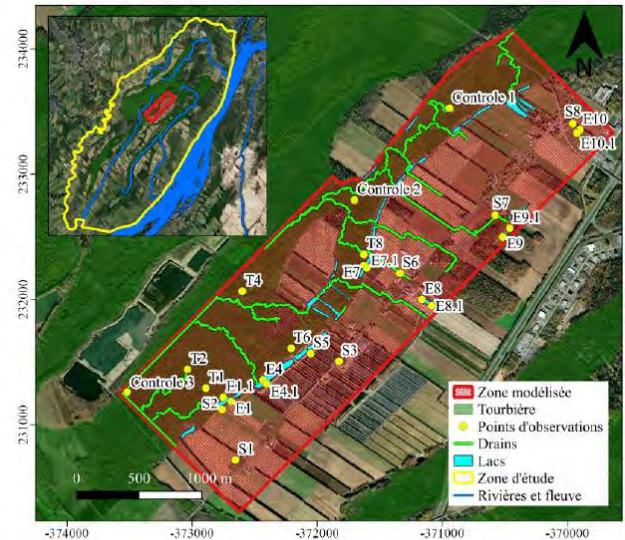


Figure 6. Zone modélisée (Chéné, 2024)

ANALYSE DE SCÉNARIO DE POMPAGE (UQAM)

- SC: Scénario calibré (sans pompage)
- 2P: débit de référence qui reproduit les baisses de niveau dans les étangs
- 2P2x: débit pompé deux fois plus grand que le débit de référence
- 3P2x: débit pompé trois fois plus grand que le débit de référence

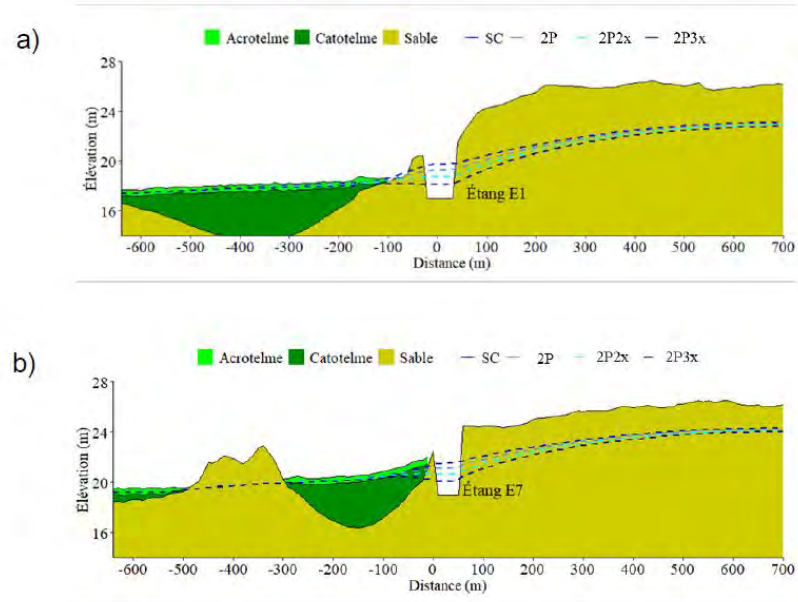


Figure 19. Effet des pompages sur les charges simulées pour les scénarios faisant varier le débit pompé dans les étangs (SC, 2P, 2P2x, 2P3x) a) sur le transect 5 et b) sur le transect 7 (Chéné, 2024)

ANALYSE DE SCÉNARIO DE POMPAGE (UQAM)

- SC: Scénario calibré (sans pompage)
- 2P: **débit de référence** qui reproduit les baisses de niveau dans les étangs
- 5P: Pompages dans 5 étangs sur la crête du coteau avec débit de référence (sans E1 et E7)
- 10P: Pompage dans 5 étangs sur la crête + 5 étangs près de la tourbière
- 20P: 5 étangs sur la crête + 15 étangs près de la tourbière

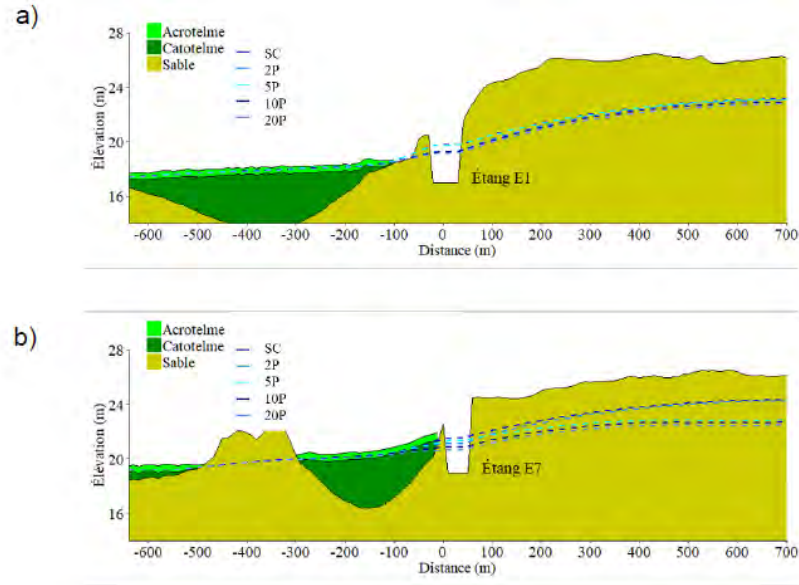


Figure 20. Effet des pompages sur les charges simulées pour les scénarios faisant varier le nombre et la position des pompages (SC, 2P, 5P, 10P, 20P) a) sur le transect 5 et b) sur le transect 7 (Chéné, 2024)



ANALYSE DE SCÉNARIO DE POMPAGE (UQAM)

- Au-delà d'un certain débit pompé (ici 3 fois les débits de référence), les rabattements dans les étangs peuvent induire une alimentation de l'étang par la tourbière.
- Le pompage des étangs situés au centre du coteau sableux semble avoir moins d'effet sur les volumes d'eau souterraine du sable vers la tourbière, mais ceci devra être confirmé avec un modèle régional, car ces étangs sont situés près de la limite du modèle.
- L'irrigation simulée par McGill correspond à 15% (2023) de la recharge annuelle moyenne estimée, ce sont des pourcentages relativement faibles.

ANALYSE CLIMATIQUE DES 25 DERNIÈRES ANNÉES 1997-2022 (MCGILL)

Station météorologique de l'Assomption pour la saison de croissance (1^{er} mai au 30 septembre)

- Saison sèche: 2021 (280 mm de précipitation)
- Saison moyenne: 1998 (478 mm de précipitation)
- Saison humide: 2015 (602 mm de précipitation)
- Évapotranspiration varie peu (525 à 612 mm) et ne semble pas corrélé aux précipitations

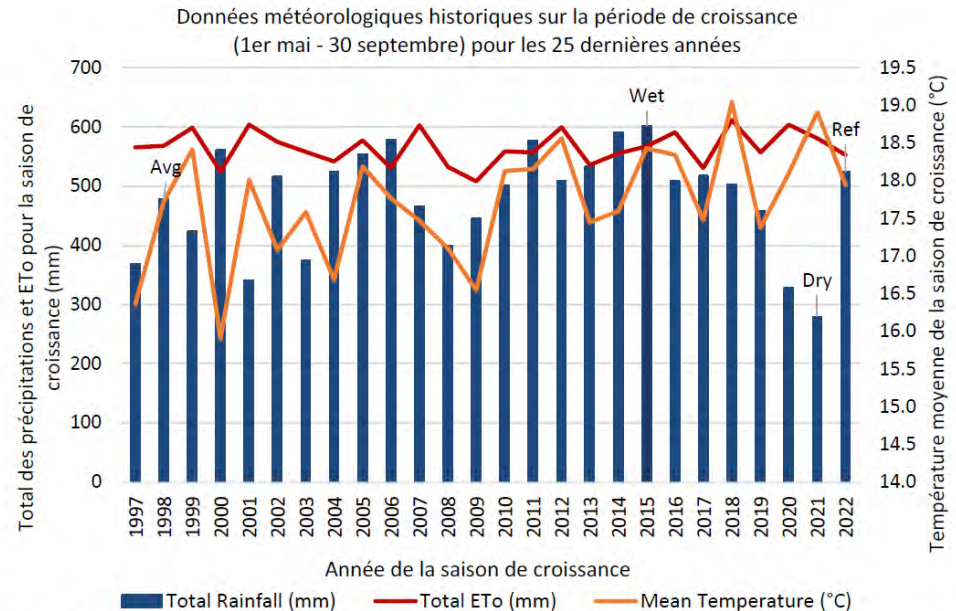


Figure 11. Données météorologiques historiques sur la période de croissance provenant de la station météorologique de L'Assomption.



Modélisation Aquacrop

Installation de sonde à humidité du sol à 2 profondeurs:

- Pommes de terre (5 et 30 cm)
- Courges (5 et 20 cm)
- Fraises (production de plants) (5 et 20 cm)
- Canneberges (10 cm)

Aquacrop: Permet de simuler la productivité des cultures en fonction du bilan hydrique du sol. La modélisation avec Aquacrop le rend utile pour évaluer les besoins en irrigation.

Calibration du modèle Aquacrop pour simuler la teneur en eau du sol vs observé (2022). La performance du modèle est très satisfaisante.



ÉVALUATION DES BESOINS EN EAU (1997-2022)

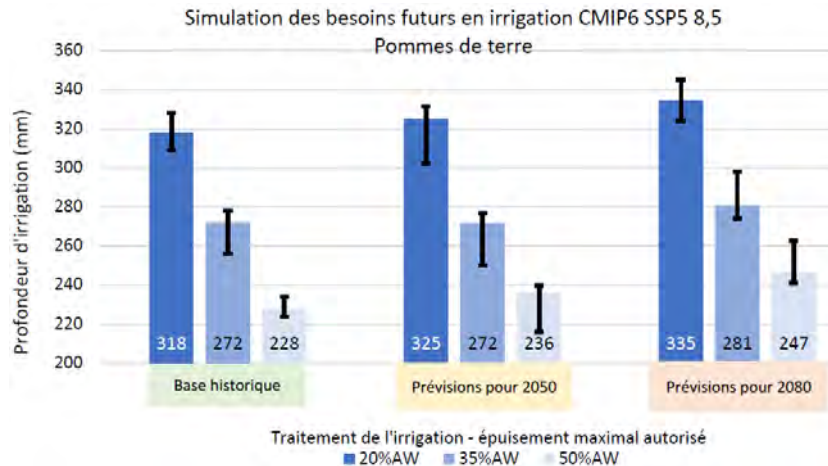
Pour les 4 cultures, la littérature dit que pour éviter les stress hydriques, la teneur en eau disponible (eau accessible à la culture) doit demeurer au-dessus de 50%.

Modèle Aquacrop: Simulation du rendement des cultures et des besoins en irrigation des années historiques (1997-2022)

- Simulation du déclenchement de l'irrigation à une teneur en eau disponible à:
 - 80%
 - 65%
 - 50%
- 50% : meilleur compromis entre les besoins en eau et le rendement des cultures, donc meilleure productivité de l'eau (quantité de biomasse produite par unité d'eau utilisée).

ÉVALUATION DES BESOINS EN EAU (2050, 2080)

- Simulation des besoins en irrigation futur (2050, 2080)
 - PDT: Augmentation des besoins en eau



- Courges: besoin stable
- Fraises et canneberges: diminution des besoins (raccourcissement du cycle de culture)



SCÉNARIOS

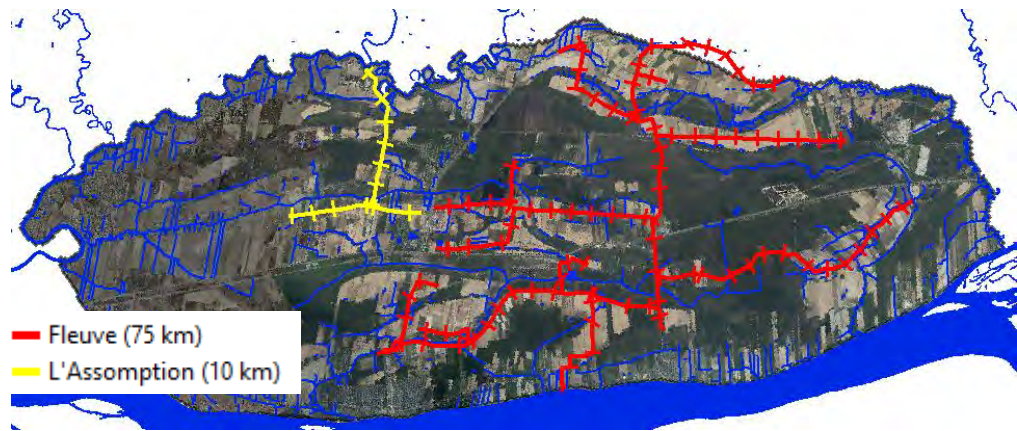
Scénario d'approvisionnement en eau

Ajout de barrage en plus des 12 barrages actuels:

- Non recommandé par le MELCCFP et possiblement besoin d'une autorisation;
- Enjeux de circulation du poisson

Évaluation d'un aqueduc à partir du fleuve St-Laurent:

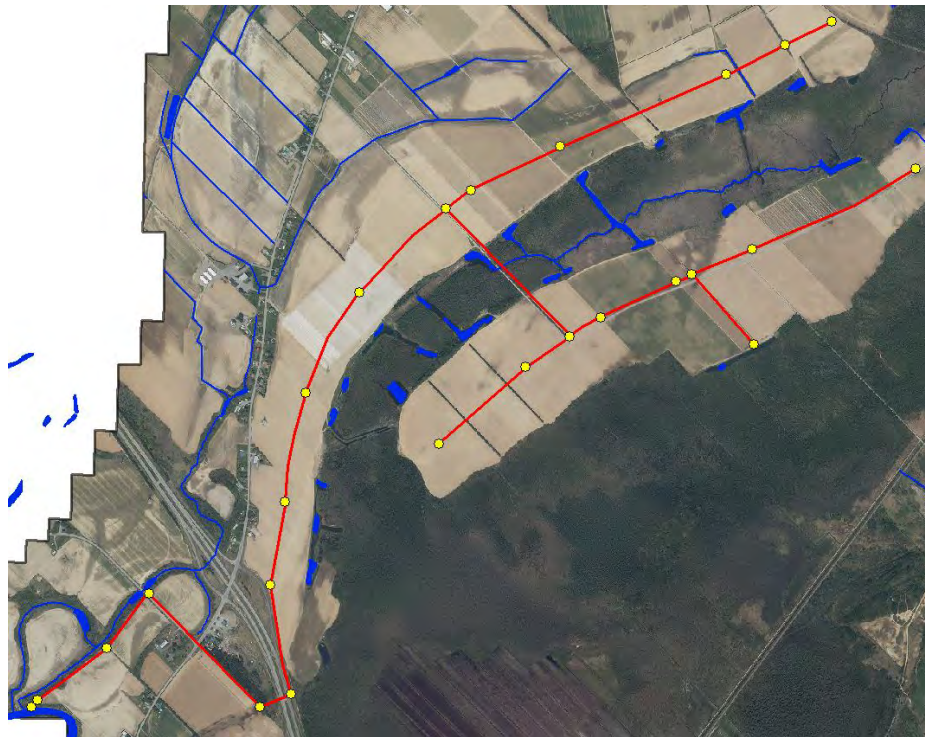
- 85 km d'aqueduc!
- Coût?
- Qualité de l'eau?
- Équipement nécessaire pour fournir assez de pression?



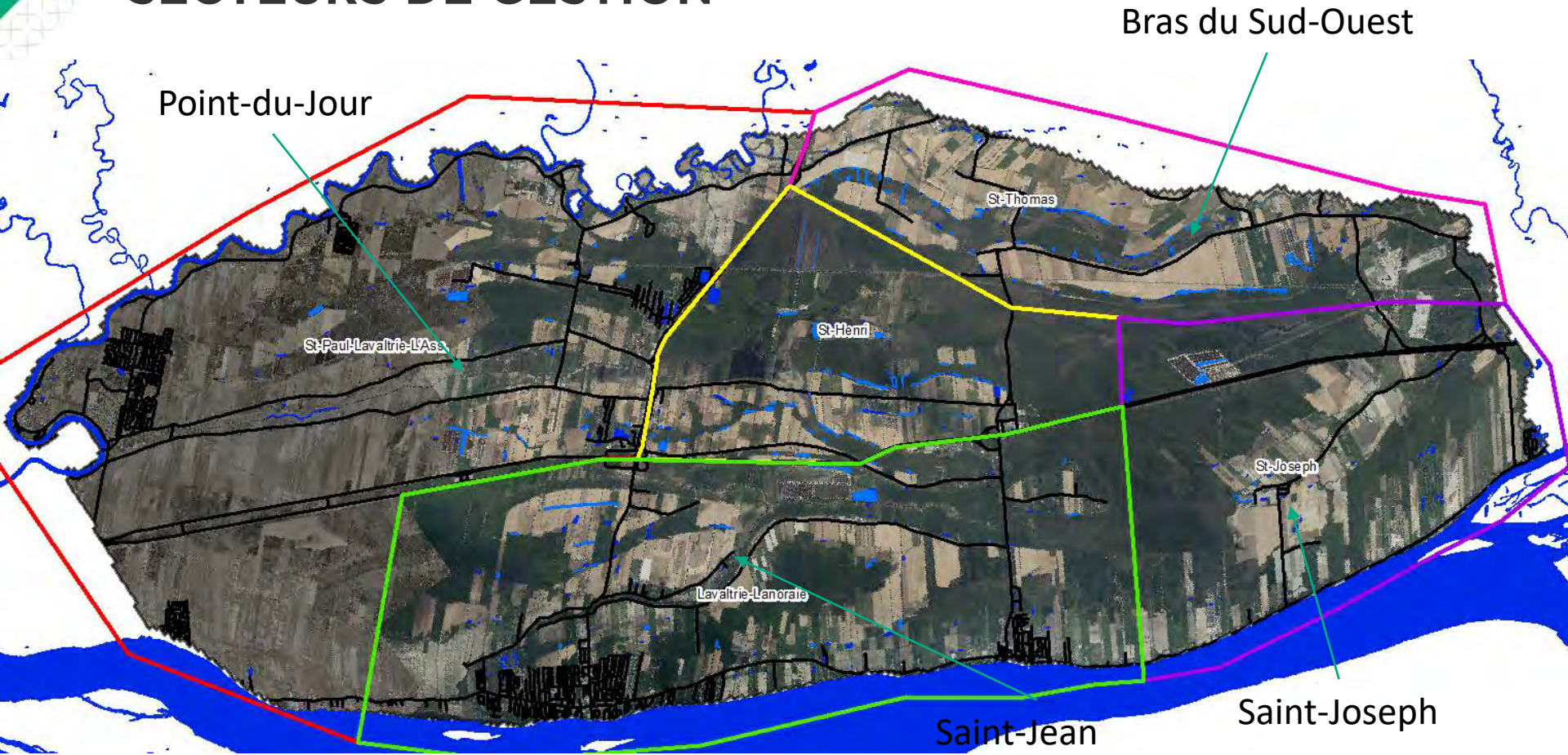
Scénario d'approvisionnement en eau

Évaluation d'un mini-réseau d'aqueduc à partir de la rivière l'Assomption (coteau jaune)

- 10 km
- Besoin annuel: 300 000m³
- Creusage de 15 bassins d'irrigation sur la crête
 - Étanchéification: enjeux de pression d'eau de la nappe sous le bassin
→ drain autour du bassin?



SECTEURS DE GESTION





SECTEURS DE GESTION

On doit stocker l'eau avant qu'elle ne se rende au fleuve

- Prélèvement (débit élevé) en cours d'eau lors des forts débits (> du 15% du débit d'étiage);
- Prélèvement (faible débit) en cours d'eau entre les irrigations
- Stocker l'eau: creusage de nouveaux bassins plus haut sur les coteaux
 - Étanchéification et drainage
 - Partage de bassins entre producteurs (bassin collectif)
- Évaluation des coûts?
- Impact des bassins (non étanche) sur le coteau?

→ Toute cette évaluation de scénario doit se faire dans un SCÉLANEAU 2!

SECTEUR ST-JOSEPH

	Bassin	Cours d'eau	Total général
Nombre de prise d'eau	5	7	12
Superficie annuelle irriguée (ha).	139	214	353
Superficie Bassin d'irrigation (m ²).	68 588	0	68 588
Volume annuel prélevé (m ³).	403 711	463 406	867 117
Volume prélevé en Mai (m ³)	36 329	0	36 329
Volume prélevé en Juin (m ³)	55 108	92 399	147 507
Volume prélevé en Juillet (m ³)	136 102	236 020	372 122
Volume prélevé en Août (m ³)	88 997	134 987	223 984

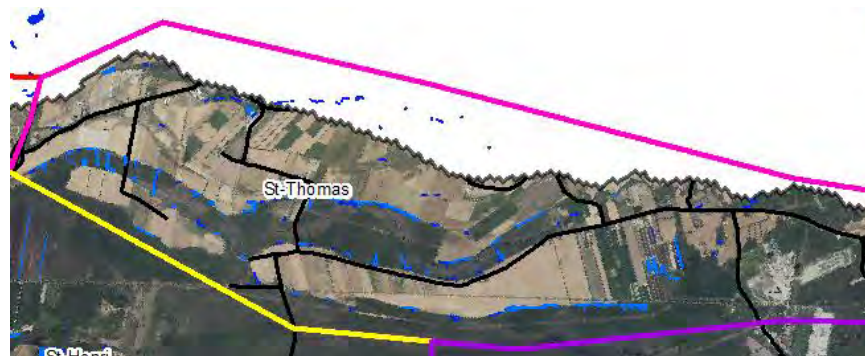


- Le volume prélevé dans le cours d'eau en été est trop élevé : **83%** du débit d'étiage
- 210 000m³ de réserve (étang) : 25% des besoins stockés, la recharge des étangs permet d'atteindre 50% des prélèvements
- Aval de la tourbière? Impact moins important?
- 37 000 m³ situé à proximité immédiate des milieux humides : autorisation?
- Volume qui pourrait (15% du débit hors période d'étiage?) être prélevé dans le cours d'eau durant l'été : 500 000 m³
- 200 000 m³ manquant au minimum : nécessité d'avoir davantage de réserves (étangs)

SECTEUR ST-THOMAS

	Bassin	Cours d'eau	Total général
Nombre de prise d'eau	49	4	53
Superficie annuelle irriguée (ha).	773	114	888
Superficie Bassin d'irrigation (m ²).	356 087	0	356 087
Volume annuel prélevé (m ³).	1 763 130	267 600	2 030 730
Volume prélevé en Mai (m ³)	96 802	0	96 802
Volume prélevé en Juin (m ³)	356 004	39 881	395 885
Volume prélevé en Juillet (m ³)	684 350	97 103	781 453
Volume prélevé en Août (m ³)	494 591	111 599	606 190

- Prélèvements dans la rivière Chaloupe
- 614 000 m³ de réserve (étang) dont les 2/3 sont à proximité immédiate des milieux humides : autorisation?
- 200 000 m³ de réserve utilisable (à étanchéifier) ? = 10% des besoins
- Zone de forte intensité de prélèvement : autorisation?
- Volume qui pourrait (15% du débit hors période d'étiage?) être prélevé dans le cours d'eau (Bras du Sud Ouest) durant l'été : 250 000 m³
- 1 600 000 m³ manquant au minimum : réserves et source d'eau alternative ?



SECTEUR ST-HENRI

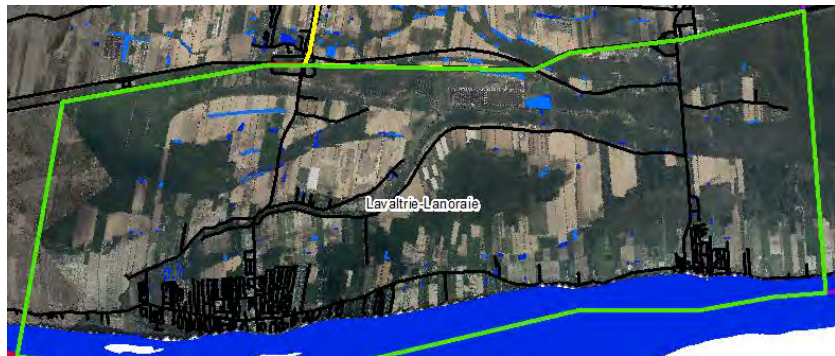
	Bassin	Cours d'eau	Total général
Nombre de prise d'eau	55	4	59
Superficie annuelle irriguée (ha).	479	57	536
Superficie Bassin d'irrigation (m ²).	353 159	0	353 159
Volume annuel prélevé (m ³).	1 277 118	68 713	1 345 831
Volume prélevé en Mai (m ³)	180 559	2 558	183 116
Volume prélevé en Juin (m ³)	286 692	14 553	301 245
Volume prélevé en Juillet (m ³)	411 842	36 981	448 822
Volume prélevé en Août (m ³)	317 093	14 622	331 714



- 1 315 000 m³ de réserve (étang) dont les près de 90% ne sont pas à proximité immédiate des milieux humides.
- Zone de forte intensité de prélèvement : étanchéifier les étangs?
- 1 160 000 m³ de réserve utilisable = 85% des besoins
- 200 000 m³ manquant au minimum : réserves additionnelles ?

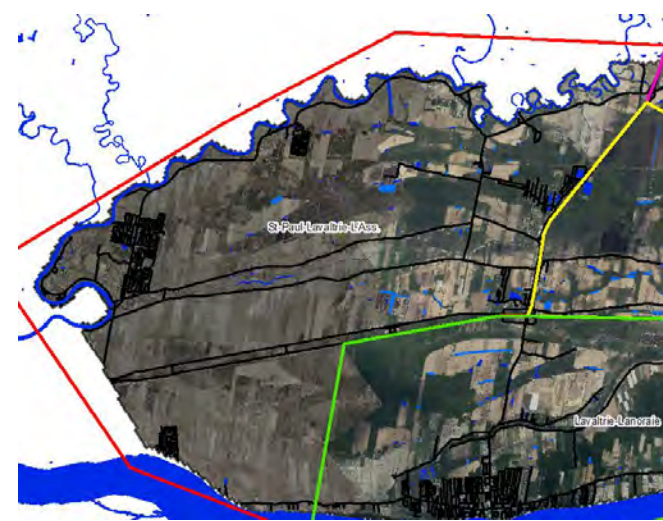
SECTEUR LAVALTRIE-LANORAIE

	Bassin	Cours d'eau	Total général
Nombre de prise d'eau	22	18	40
Superficie annuelle irriguée (ha).	328	313	642
Superficie Bassin d'irrigation (m ²).	305 877	0	305 877
Volume annuel prélevé (m ³).	1 092 371	1 033 128	2 125 499
Volume prélevé en Mai (m ³)	34 305	9 384	43 689
Volume prélevé en Juin (m ³)	344 300	339 909	684 209
Volume prélevé en Juillet (m ³)	400 634	463 476	864 110
Volume prélevé en Août (m ³)	155 136	192 943	348 079



- Le volume prélevé dans le cours d'eau en été est trop élevé : **75%** du débit d'étiage
- 560 000m³ de réserve (étang) : 25% des besoins stockés, la recharge des étangs permet d'atteindre 50% des prélèvements
- Aval de la tourbière? Impact moins important?
- 150 000 m³ situé à proximité immédiate des milieux humides : autorisation?
- Volume qui pourrait (15% du débit hors période d'étiage?) être prélevé dans le cours d'eau durant l'été : 500 000 m³
- 1 200 000 m³ manquant au minimum : source alternative? Fleuve?

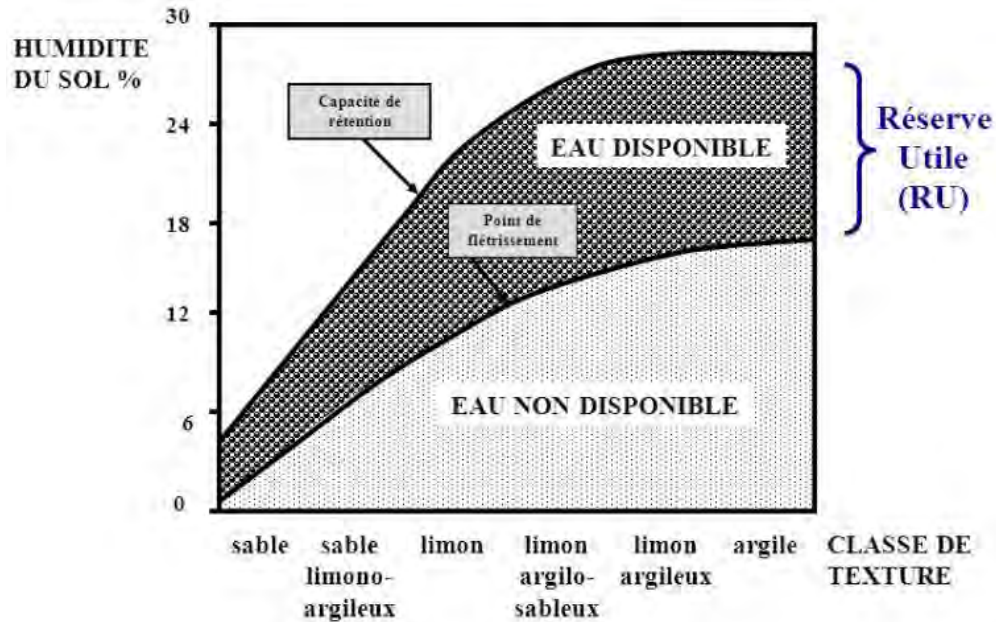
SECTEUR ST-PAUL-LAVALTRIE-ST-SULPICE-L'ASSOMPTION



	Bassin	Cours d'eau	Total général
Nombre de prise d'eau	21	11	32
Superficie annuelle irriguée (ha).	278	151	429
Superficie Bassin d'irrigation (m ²).	209 539	0	209 539
Volume annuel prélevé (m ³).	925 465	346 606	1 272 071
Volume prélevé en Mai (m ³)	107 011	1 348	108 360
Volume prélevé en Juin (m ³)	180 215	73 965	254 180
Volume prélevé en Juillet (m ³)	277 500	156 035	433 534
Volume prélevé en Août (m ³)	118 213	104 623	222 835

- Le volume prélevé dans le cours d'eau en été est trop élevé : **82%** du débit d'étiage
- 405 000m³ de réserve (étang) : 33% des besoins stockés, la recharge des étangs permet d'atteindre 75% des prélèvements
- Aval de la tourbière? Impact moins important?
- Très peu d'étangs situés à proximité immédiate des milieux humides
- Volume qui pourrait (15% du débit hors période d'étiage?) être prélevé dans le cours d'eau durant l'été : 650 000 m³
- 250 000 m³ manquant au minimum : davantage d'étangs? Rivière l'Assomption?

Réserve en eau du sol



D'après Morel, 1989