

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

Simon RICARD

Équipe de réalisation

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).

**Agriculture, Pêcheries
et Alimentation**

Québec 

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)

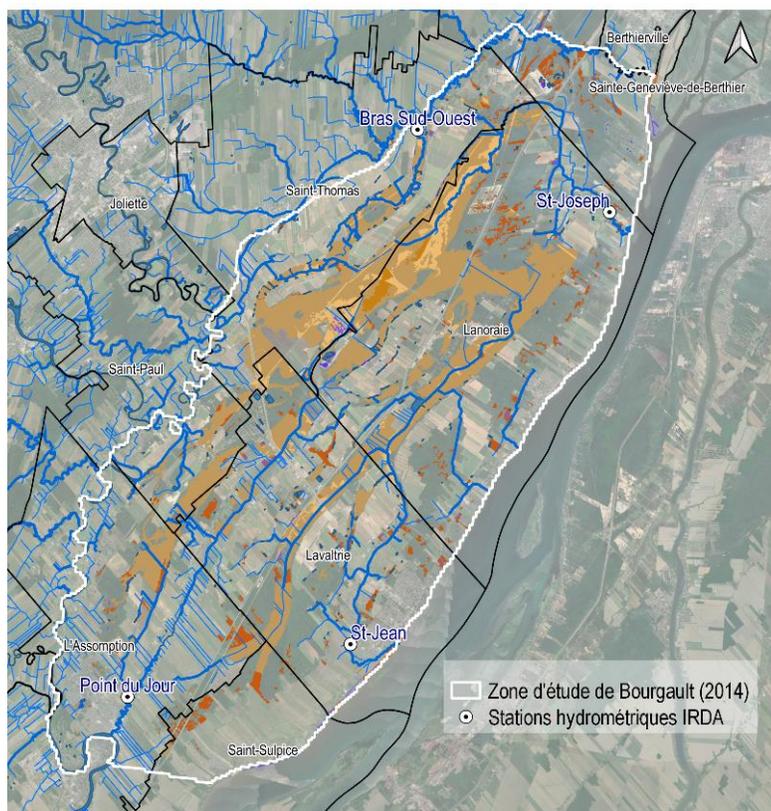


Figure 1. Localisation des stations hydrométriques dans la zone d'étude.

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.

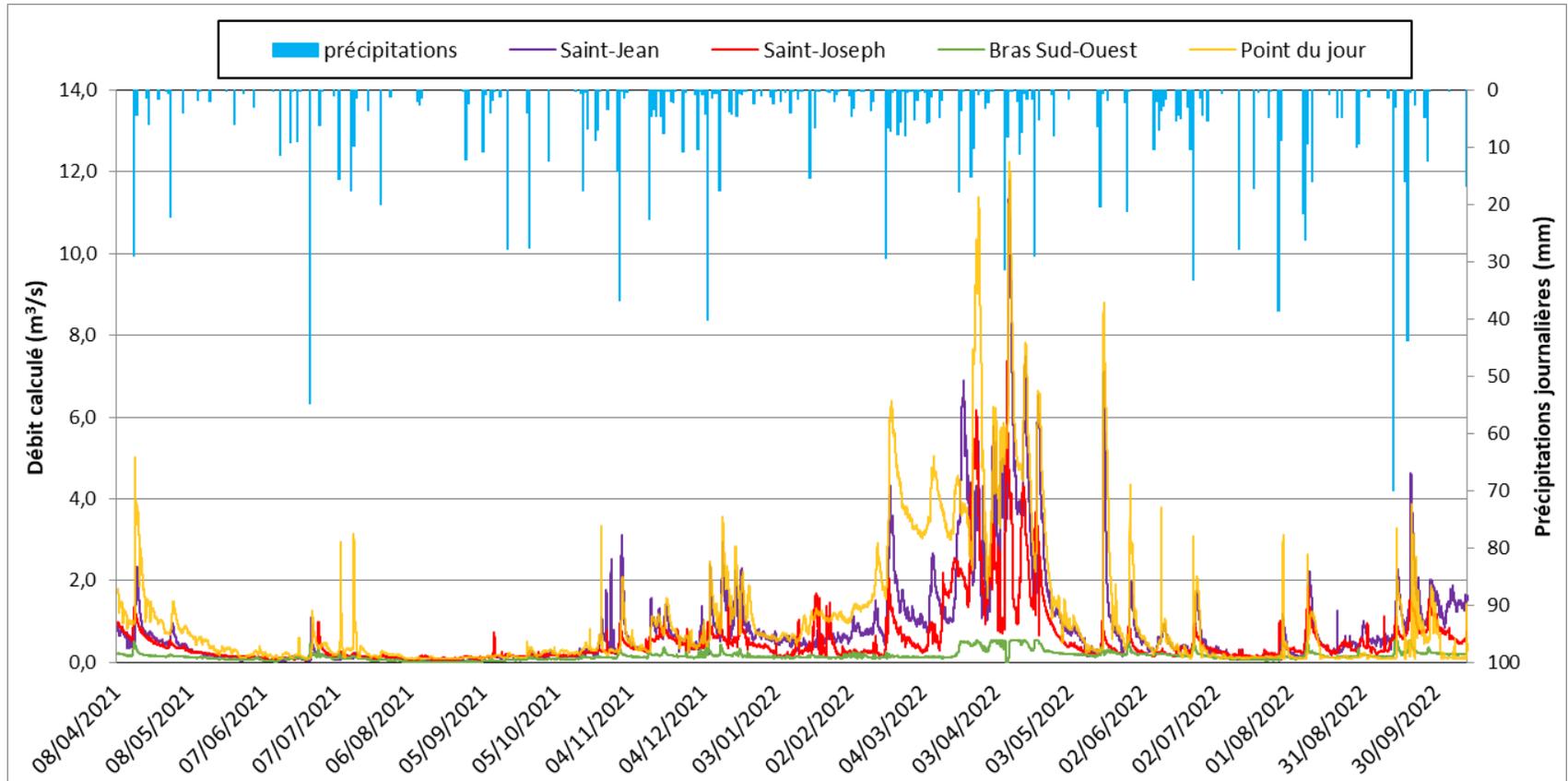


Figure 2. Hydrogrammes à chacune des stations hydrométriques pour la période 2021-2022.

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).

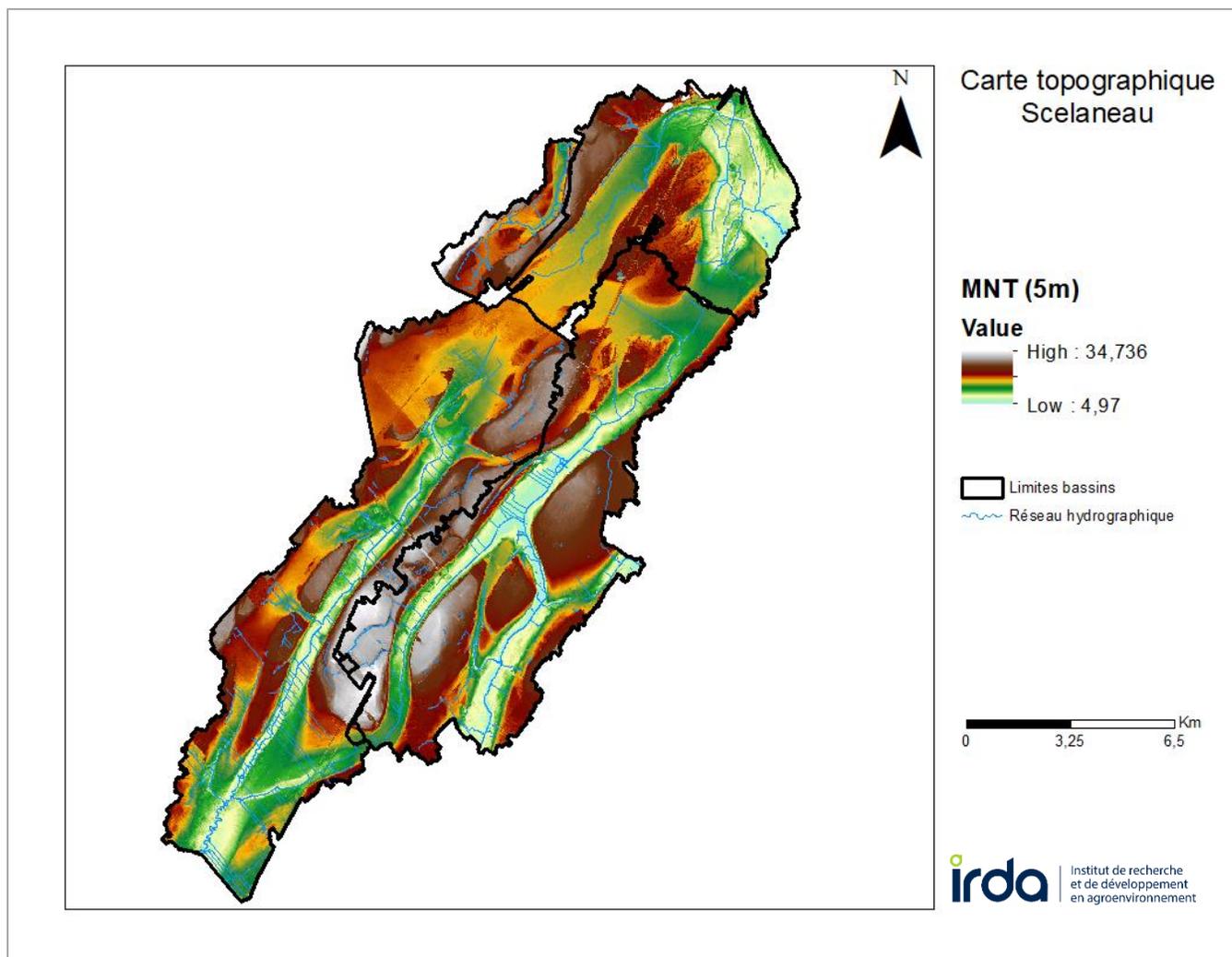


Figure 3. Modèle numérique de terrain de la zone d'étude.

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 rasterisée 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.

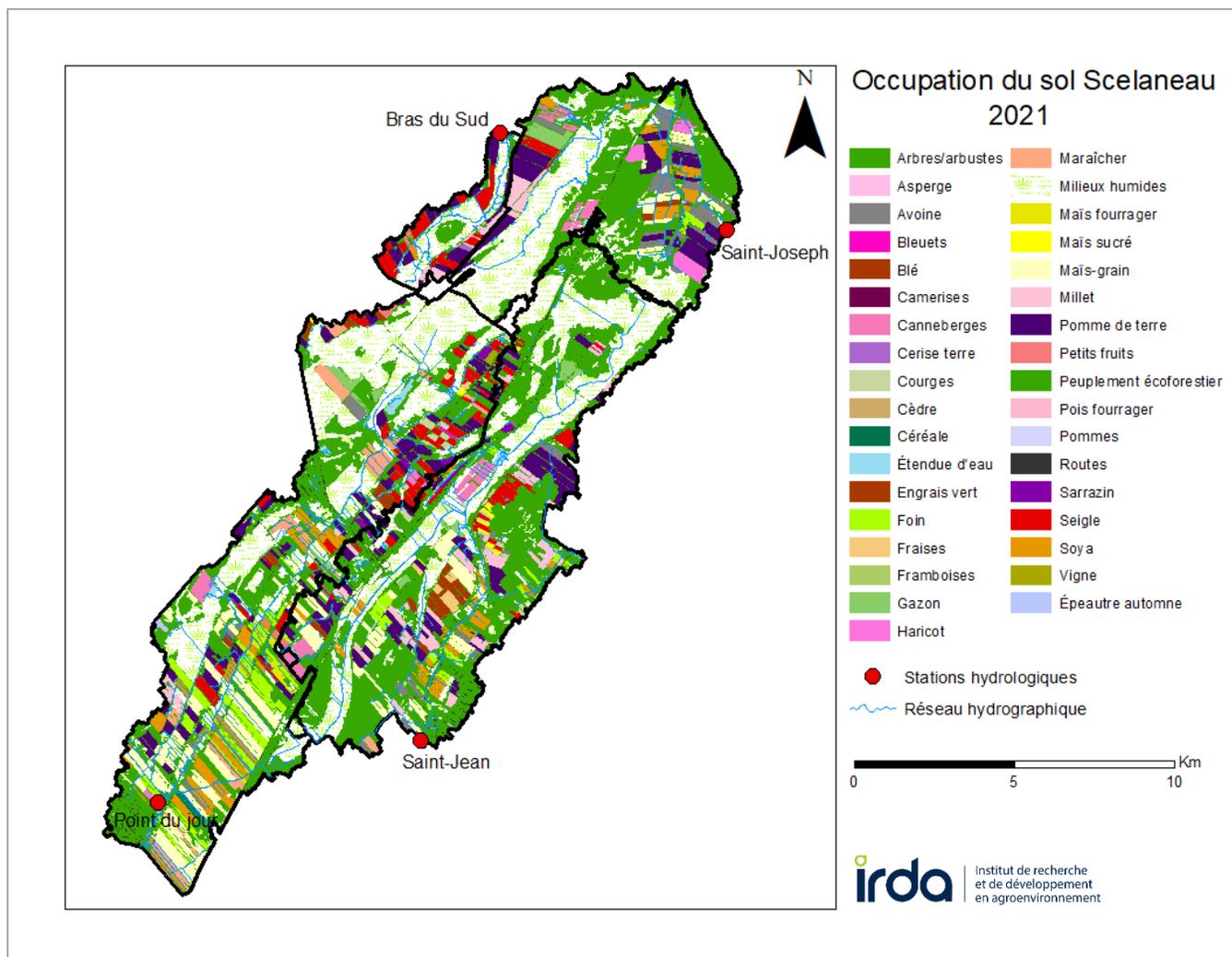


Figure 4. Distribution de l'occupation du territoire pour l'année de référence 2021 de la zone d'étude.

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.

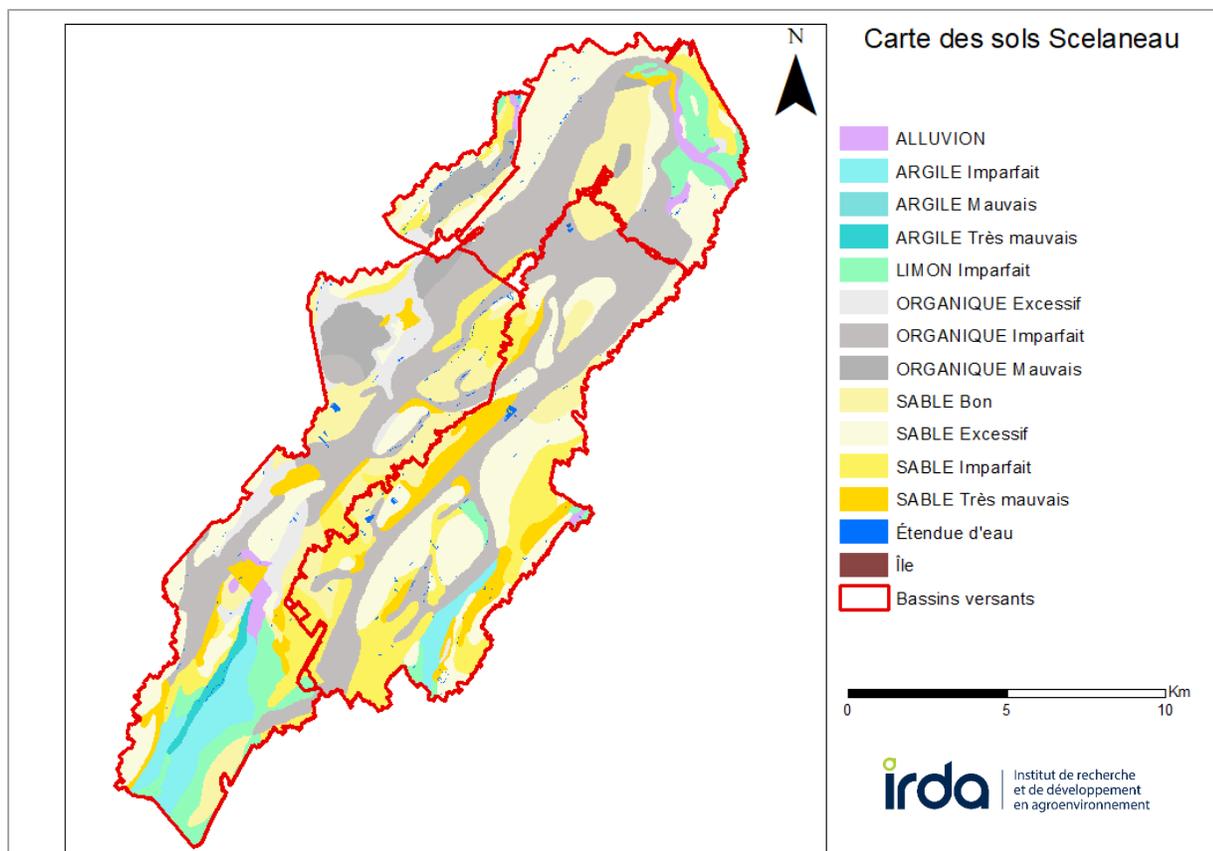


Figure 5. Distribution des types de sol de la zone d'étude.

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 URHs 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.

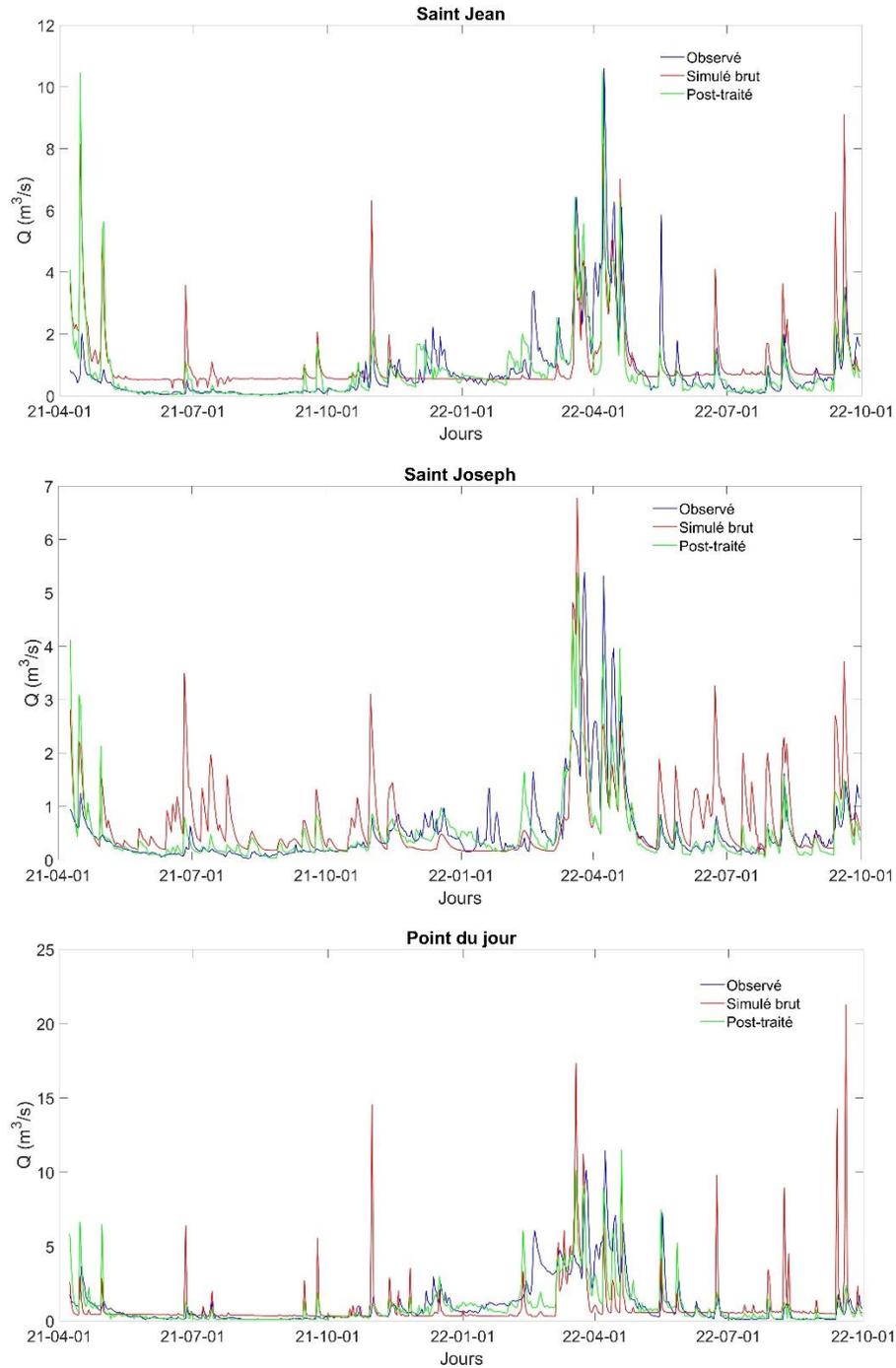


Figure 6. Hydrogrammes simulés (simulations brutes et post-traitées) et observés sur la période 2021 à 2022 aux stations hydrométriques Saint-Jean, Saint-Joseph et Point-du-jour.

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.

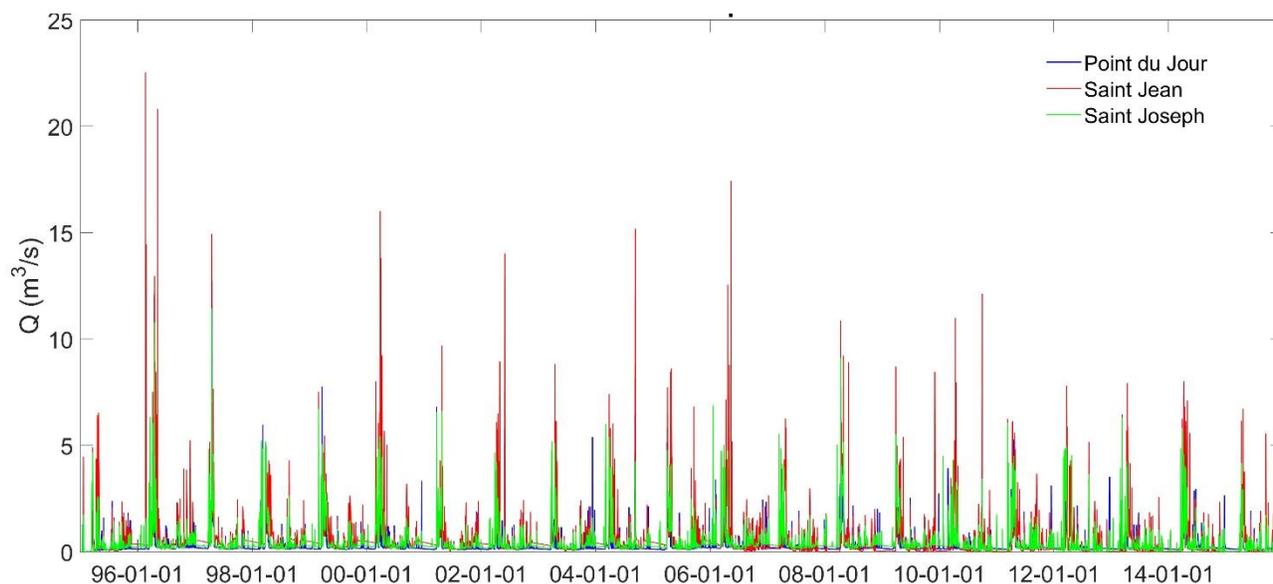
**Figure 7. Hydrogrammes reconstitués sur la période 1995 à 2015 aux stations hydrométriques de la zone d'étude.**

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.

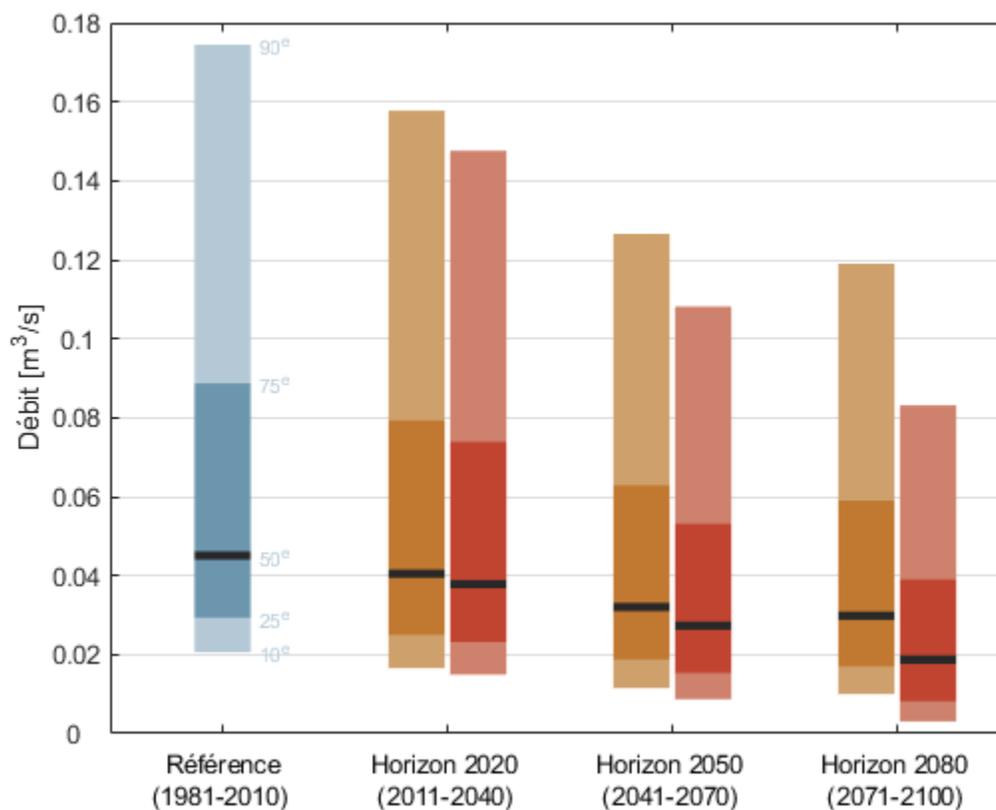


Figure 8. Estimation du $Q_{2.7}$ estival et projections aux horizons 2020, 2050 et 2080 produites par l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional au tronçon SLNO00562 correspondant au ruisseau Saint-Jean. La distribution en rouge correspond au RCP8.5.

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.

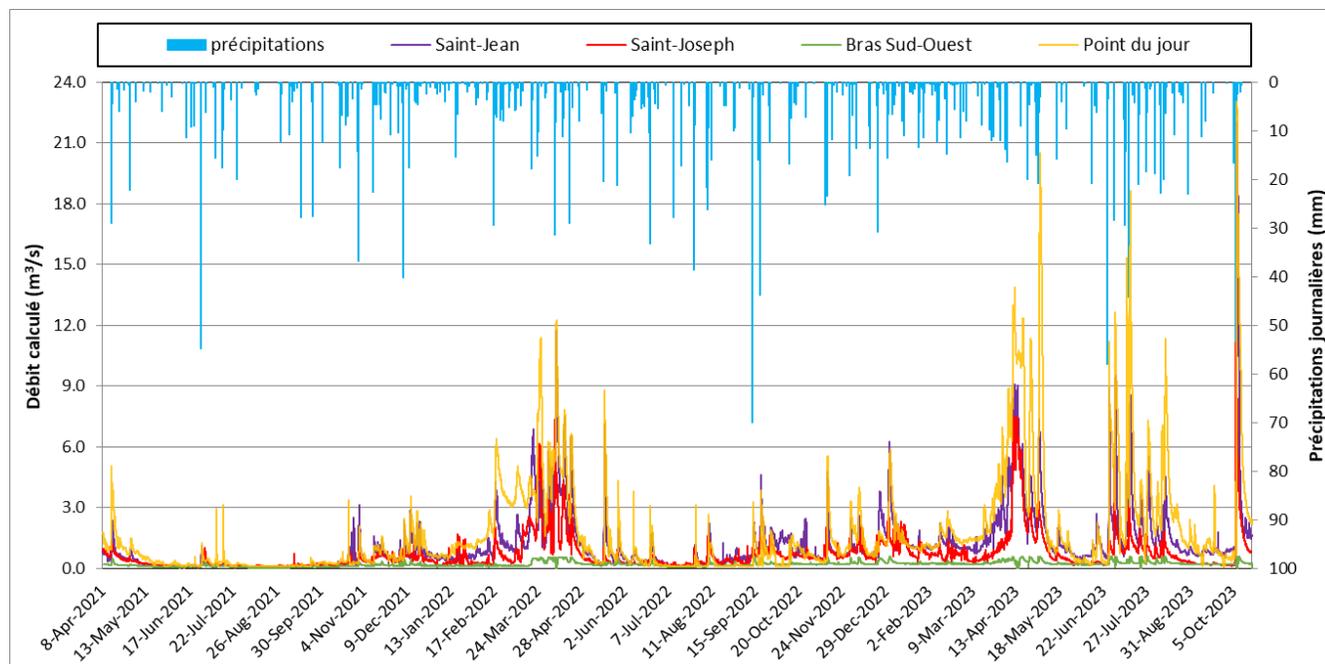
Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, 2018. Adresses Québec. AQReseau +. Direction de la référence géographique. Service de la cartographie. Québec.

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)

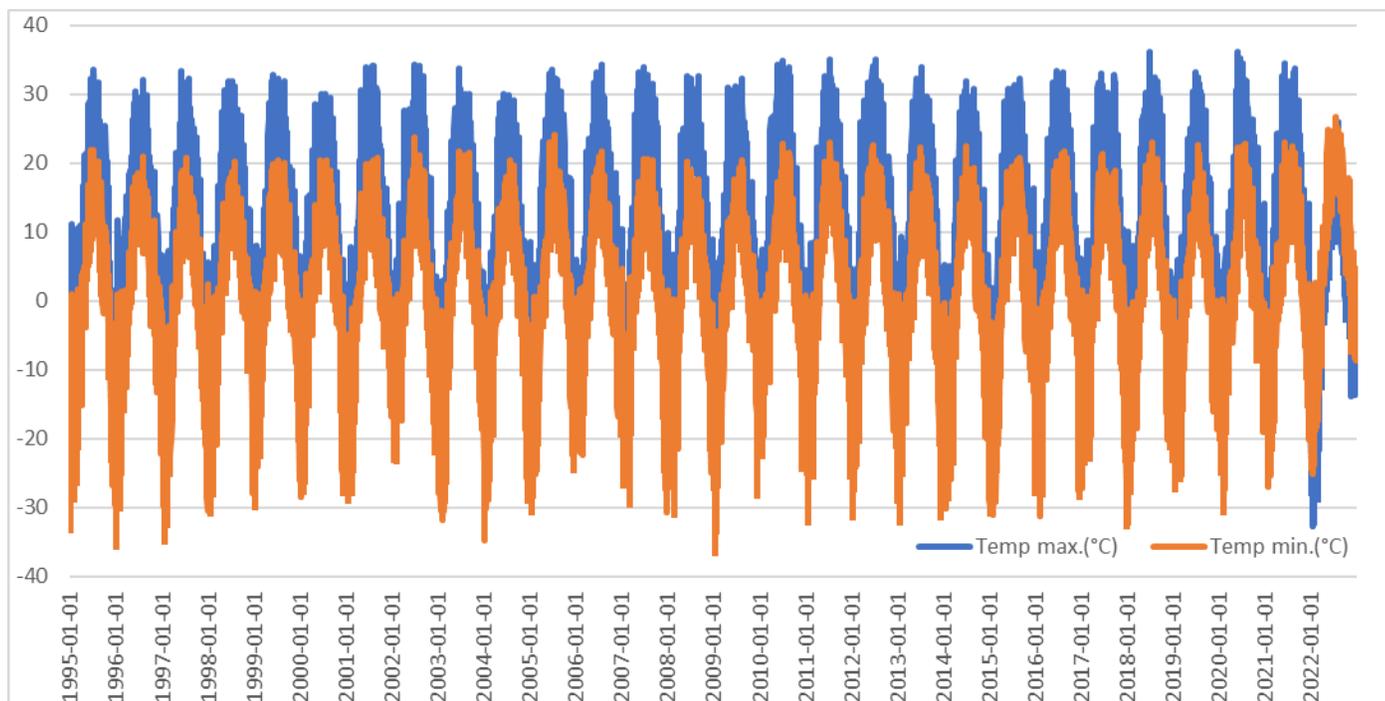


Figure C1 : Températures maximales et minimales à la station l'Assomption (ECCC) sur la période 1995 à 2022.

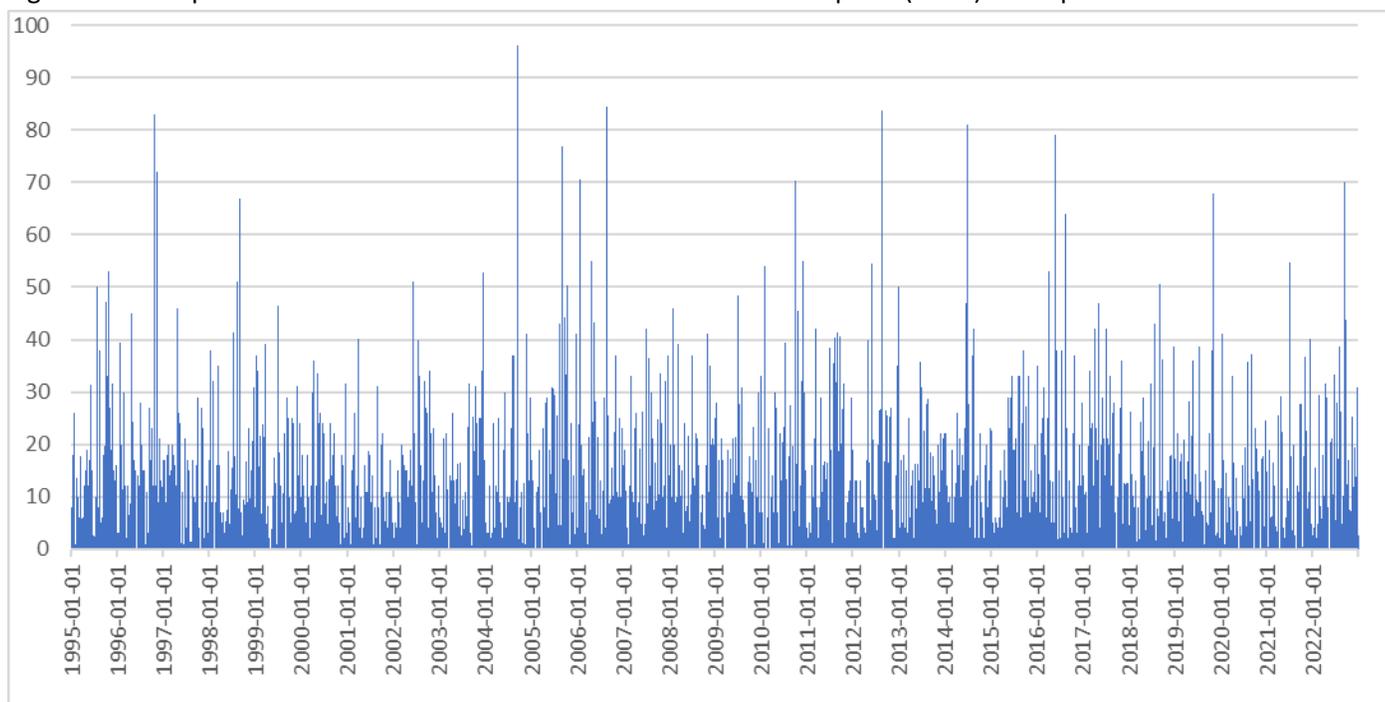


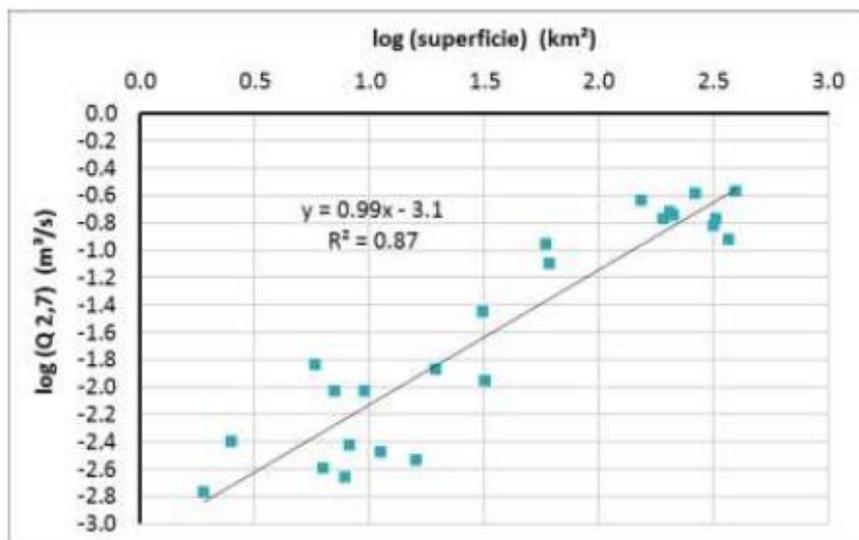
Figure C2 : Précipitations totales journalières à la station l'Assomption (ECCC) sur la période 1995 à 2022.

ANNEXE D - PARAMÈTRES OPTIMISÉS DU MODÈLE SWAT

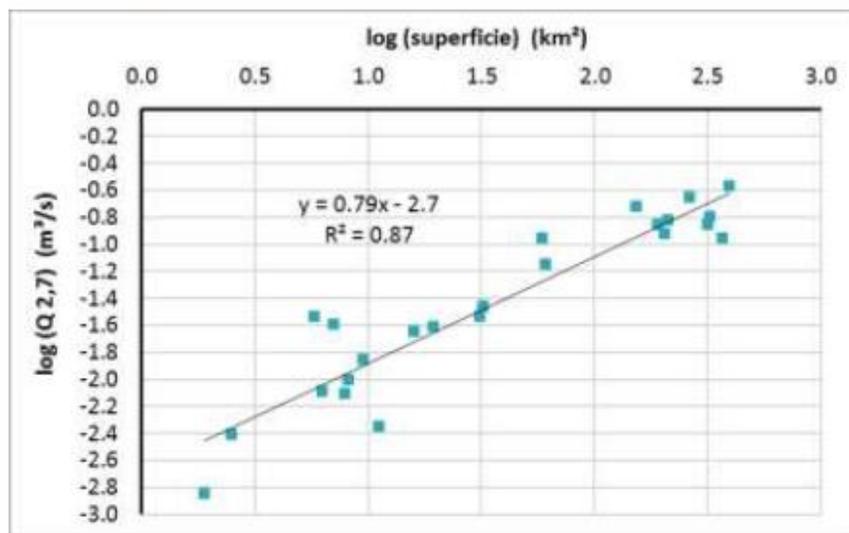
Paramètres		Point jour	Bras du sud	Saint Jean	Saint joseph
Fonte de neige (basins.bsn)	SFTMP (°C)	-1,372	0,800	0,372	-1,372
	SMTMP (°C)	-3,570	-1,031	-1,570	-1,570
	SMFMX (mm _{H2O} /day-°C)	4,090	6,601	4,090	6,090
	SMFMN (mm _{H2O} /day-°C)	1,180	3,776	1,180	4,180
	TIMP	0,269	0,795	0,769	0,878
	SNOCOVMX (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

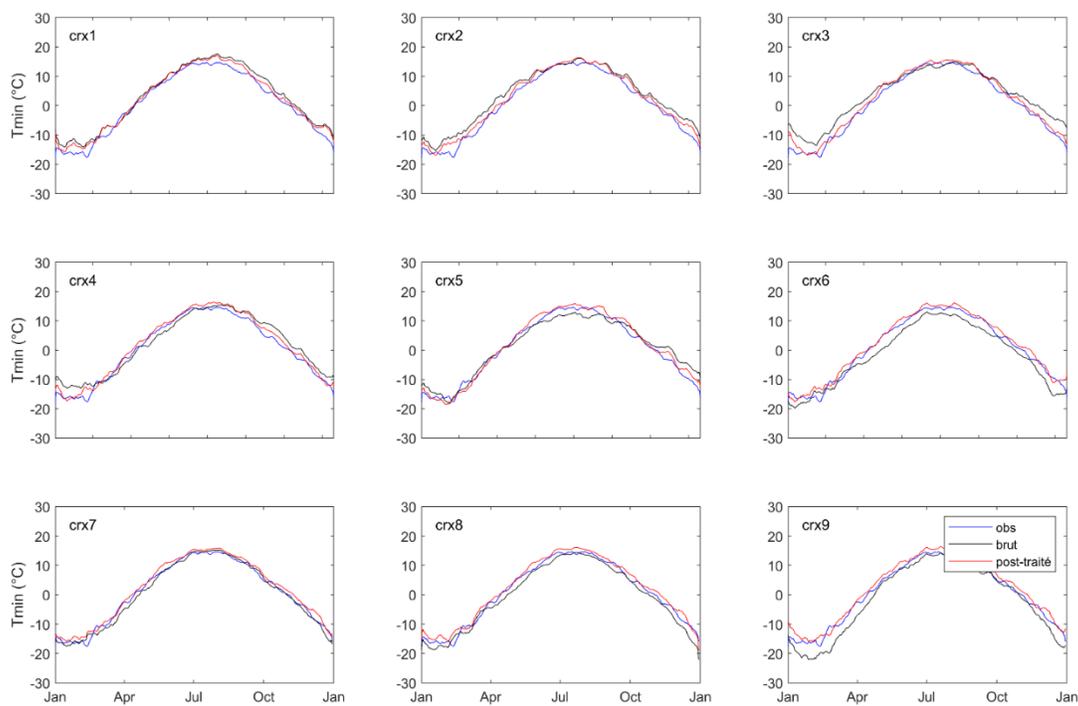


Figure E1 : Température minimale journalière brute et post-traitée de l'ensemble NA-CORDEX, cycle annuel sur la période 1995 à 2004.

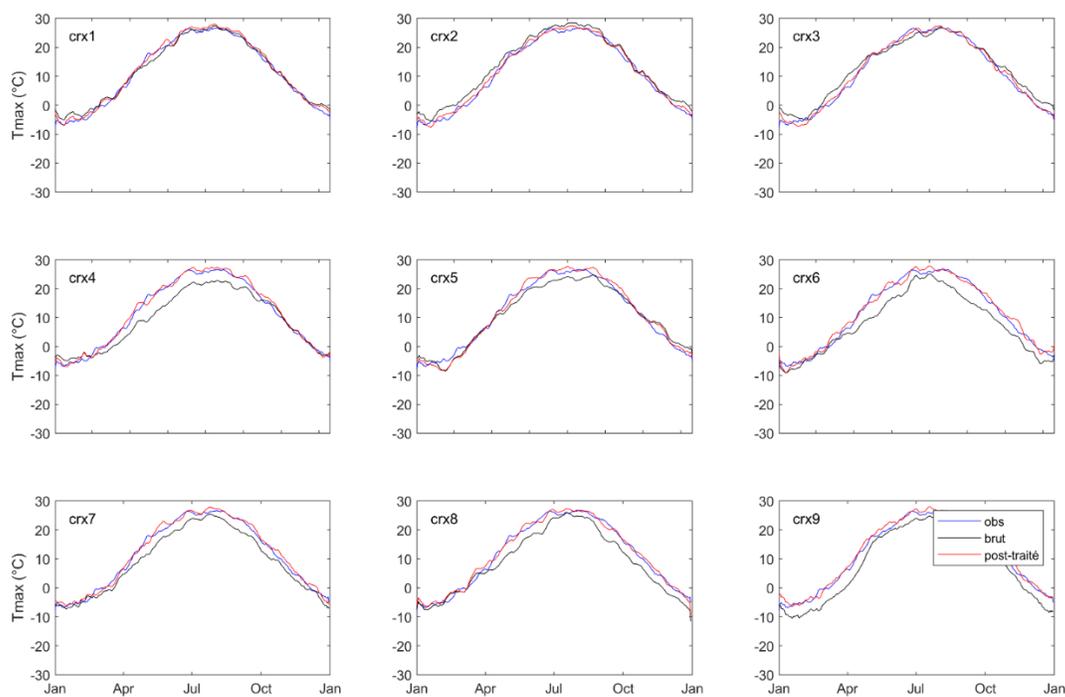


Figure E2 : Température maximale journalière brute et post-traitée de l'ensemble NA-CORDEX, cycle annuel sur la période 1995 à 2004.

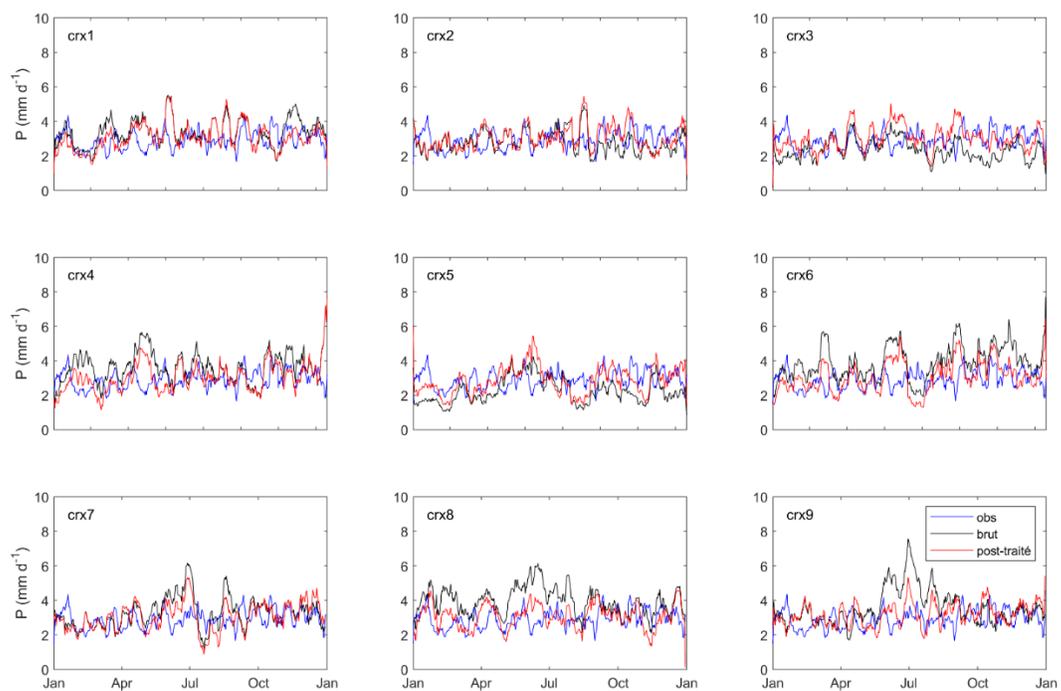


Figure E3 : Précipitations totales journalière brutes et post-traitées de l'ensemble NA-CORDEX, cycle annuel sur la période 1995 à 2004.