

**PROGRAMME D'APPUI À LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES EN  
AGRICULTURE**

PROJECTION DES RÉPONSES HYDROLOGIQUES EN RÉPONSE À L'AMÉLIORATION DE LA CONDITION  
PHYSIQUE DES SOLS DES BASSINS VERSANTS DE LA PETITE RIVIÈRE POT AU BEURE ET DE LA RIVIÈRE  
SAINT-GERMAIN

**PROJET 6803237 (IRDA\_400243)**

MARS 2021 / JANVIER 2024

**RAPPORT FINAL**

Réalisé par :

Simon Ricard, William Huertas, Colline Gombault, Arianne Blais-Gagnon, Michael Osina,  
Mireille Sawadogo, Sébastien Rougerie-Durocher  
Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

En collaboration avec :

Martin Cournoyer (producteur), Paul Caplette (producteur), Dominique Caplette (producteur),  
Aubert Michaud (OBVBM), Yasmina Larbi-Youcef (UPA), Patrick Desautels (UPA), Karen J-  
Desmarais (agronome), Joelle Blouin (agronome), Julie Genier (COGESAF), Lisanne  
Chauvette (MRC de Drummond), David Ouellet (CECPA), Marc-Antoine Larrivée (CECPA)

29 janvier 2024

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

# PROJECTION DES RÉPONSES HYDROLOGIQUES EN RÉPONSE À L'AMÉLIORATION DE LA CONDITION PHYSIQUE DES SOLS DES BASSINS VERSANTS DE LA PETITE RIVIÈRE POT AU BEURRE ET DE LA RIVIÈRE SAINT-GERMAIN

## PROJET no 6803237

### RÉSUMÉ

Ce projet étudie les effets de l'amélioration de la condition physique des sols et des systèmes de cultures sur la réponse hydrologique des champs et des bassins versants agricoles. Il s'articule plus spécifiquement autour des problématiques hydroagricoles des bassins versants de la Petite rivière Pot au Beurre, affluent de la Baie de Lavallière, et de la rivière Saint-Germain affluent de la rivière Saint-François, située dans les régions de la Montérégie et du Centre du Québec. Ces bassins sont témoins respectivement de problématiques hydroagricoles relatives à des surplus d'eau en période humide (printemps, orages estivaux, ou automne) et à des pertes de sols et nutriments vers les cours d'eau. Quatre champs (deux témoins, deux intervention) ont d'abord été instrumentés dans les municipalités de Sainte-Victoire-de-Sorel et de Saint-Robert afin d'assurer le suivi, aux drains et aux avaloirs, de multiples variables hydrologiques et de qualité de l'eau. L'analyse des mesures observées, conduite en étroite collaboration avec les producteurs, visait à comparer les réponses hydrologiques des champs et à isoler les effets des pratiques agricoles sur ces dernières. Le modèle hydrologique SWAT a ensuite été mis en place et calibré sur les bassins versants de la rivière Saint-Germain et de la Petite rivière Pot au Beurre afin d'évaluer l'impact de scénarios d'amélioration des propriétés physiques des sols sur la réponse hydrologique des bassins versants en contexte de changements climatiques. Les épisodes de crues, la migration des charges en sédiments et en nutriments ont été les variables priorisées dans ce volet du projet. Une analyse économique a finalement été conduite sur le bassin versant de la Petite rivière Pot au Beurre afin d'estimer dans quelle mesure l'accroissement des rendements des cultures de maïs et soya, anticipé en contexte de changements climatiques, pourrait amortir les investissements nécessaires à l'adoption des pratiques de conservation.

Les principales conclusions du présent projet sont les suivantes :

- i. La rétroaction des producteurs quant à la possibilité d'observer et d'analyser les suivis hydrométriques aux champs en compagnie de l'équipe de recherche a été très appréciée et réciproquement instructive. L'analyse n'a cependant pas permis d'isoler les effets des pratiques agricoles sur la réponse hydrologique à l'échelle des champs. Le suivi trop court et le nombre limité de champs instrumentés n'ont pu permettre d'établir des relations probantes.
- ii. Une augmentation du débit annuel moyen ainsi qu'une intensification des épisodes de crues printanières, estivales et automnales sont attendues sur le bassin de la rivière Saint-Germain en contexte de changements climatiques, à l'horizon 2050. L'intensification projetée des crues printanières contraste légèrement avec le message typiquement communiqué par la communauté scientifique à ce sujet. Cette dernière indique plutôt une absence de consensus sur la direction du changement pour la région à l'étude. Ce contraste s'explique par l'usage exclusif de l'ensemble de simulations climatiques NA-CORDEX affecté du scénario RCP8.5 (évolution pessimiste des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre) qui projette, de façon consensuelle, une augmentation notable des précipitations hivernales. L'amélioration de la condition physique des sols agricoles sur le bassin ne permettrait vraisemblablement pas de réduire l'ampleur des épisodes crue dans le futur. L'amélioration de la condition physique des sols permettrait cependant de réduire le ruissellement de surface, de l'ordre de 5 mm par année, et la migration des charges de matières en suspension sédiments, de l'ordre de 15%. Ces conclusions sont affectées d'une confiance modérée considérant les limites du protocole de modélisation mis en place dans le cadre du projet, notamment le fait que les pratiques de conservation du sol n'ont pas été explicitement intégrées dans l'outil de modélisation agro-hydrologique et les faibles scores de performance obtenus sur la période de validation.
- iii. Une augmentation du ruissellement de surface, de l'ordre de +6%, ainsi que des charges annuelles en MES (+7%) et en phosphore (+9%) est attendue sur le bassin de la Petite rivière Pot au Beurre en contexte de changements climatiques, à l'horizon 2050. La scénarisation des pratiques agricoles et de l'amélioration de la condition physique des sols n'a pas permis d'induire un impact notable sur l'évolution des charges en MES et en phosphore, ceci vraisemblablement dû à une limite du protocole de scénarisation. Ces conclusions sont affectées d'une confiance

modérée considérant les limites du protocole de modélisation mis en place dans le cadre du projet.

- iv. En contexte de changements climatiques, à l'horizon 2050, la culture du maïs-grain permettrait à un producteur de la région de dégager une rentabilité positive et ce, particulièrement avec l'adoption de la pratique de semis direct. La rentabilité de la culture du soya serait cependant beaucoup plus faible. Cette conclusion est affectée d'une confiance modérée découlant des limites méthodologiques mises en place dans le cadre du projet.

À la lumière des travaux menés et des résultats obtenus, nous recommandons :

- i. De revoir le protocole d'analyse visant à établir des relations entre les pratiques de conservation des sols et la réponse hydrologique des champs en valorisant un échantillonnage à moindre coût et donc, une portée large (plus de champs sur une plus longue durée) et en intégrant explicitement les conditions du système de drainage et les pratiques de fertilisation comme variables explicatives; un protocole à moindre coût valoriserait un échantillonnage ponctuel de qualité de l'eau combiné à une mesure ponctuelle de débit et s'affranchirait de l'instrumentation nécessaire au suivi en continu (mesure très coûteuse); en ciblant l'analyse statistique sur les relations concertation-débit (et non sur l'estimation des charges annuelles), un échantillonnage notablement plus grand permettrait potentiellement de conduire à des conclusions statistiquement significatives;
- ii. D'explorer les retombées découlant d'une diffusion en temps réel aux producteurs des variables hydrologiques et de qualité de l'eau, à l'échelle des champs et du bassin versant;
- iii. De renforcer la confiance attribuée aux projections en contexte de changements climatiques par l'usage d'un ensemble climatique plus large, le recours à des formulations physiques décrivant les processus agrohydrologiques et en raffinant la scénarisation de l'amélioration des conditions physiques du sol.



# **1. Décrire l'effet des pratiques agricoles de conservation sur la quantité et la qualité du ruissellement de surface et de l'eau de drainage à l'échelle du champ (objectif 1)**

## **1.1 Instrumentation**

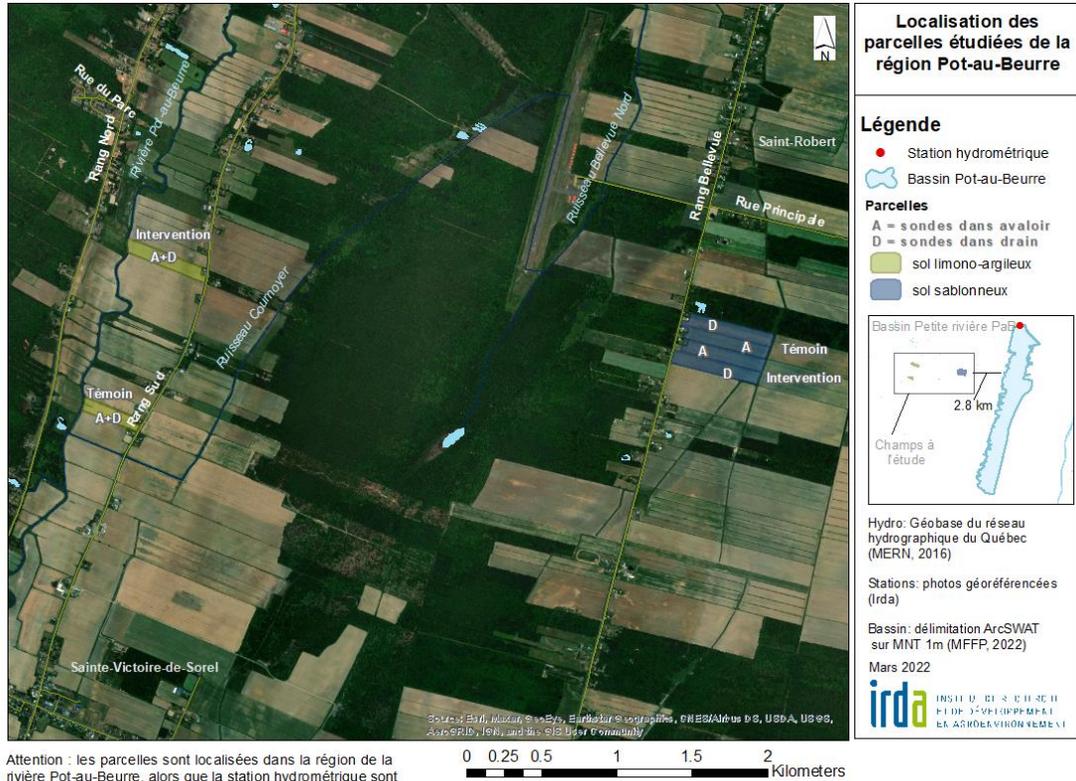
Quatre champs ont été instrumentés à l'automne 2021, deux dans la municipalité de Sainte-Victoire-de-Sorel et deux autres à Saint-Robert (Figure 2). Le choix des sites reposait sur plusieurs critères : historique de cultures de couverture (pour l'attribution du champ Témoin notamment, avec dans l'idée d'introduire les cultures intercalaires dans les champs Intervention historiquement de régie plus conventionnelle), présence d'avaloirs et de drains, champs contigus entre une couple Témoin-Intervention, types de sols semblables entre un couple Témoin-Intervention, mais contrastés entre le premier et le second couple et intérêt du producteur à participer à l'étude.

Le dispositif mis en place au champ est adapté pour mesurer la hauteur et la vitesse de l'eau, variables qui permettent d'estimer le débit par la résolution des équations hydrauliques. Une sonde acoustique ISCO (Figure 3) installée dans les avaloirs et les collecteurs de sortie de drain collige en continue les observations aux 15 minutes. Cette sonde a un dispositif électronique d'enregistrement de données qui s'alimente par une source d'électricité provenant d'une batterie de 12V et un panneau solaire installé sur le bord des fossés. Le dispositif comporte au total huit sondes acoustiques réparties aux quatre sorties d'avaloirs et aux quatre sorties de drains.

Les champs sont divisés en champs témoins (régie de conservation) et interventions (régie conventionnelle) afin de comparer et isoler les effets de changement de pratiques agricoles sur la condition physique des sols et leur réponse hydrologique. Les champs interventions, qui devaient normalement accueillir des pratiques culturales modifiées, n'ont que partiellement appliqué des changements dans leurs pratiques. Le site intervention du rang Sud a ajouté de l'intercalaire dans son maïs de 2022 mais rien dans son maïs de 2023. Le site intervention du rang Bellevue n'a quant à lui pas vu l'ajout d'une céréale dans sa rotation, tel que prévu. Les sites témoins (Sud et Bellevue) pratiquent notamment le semis direct et incluent des pratiques comme l'intercalaire avec le maïs, l'ajout d'une céréale dans le cycle des cultures et des rotations longues.

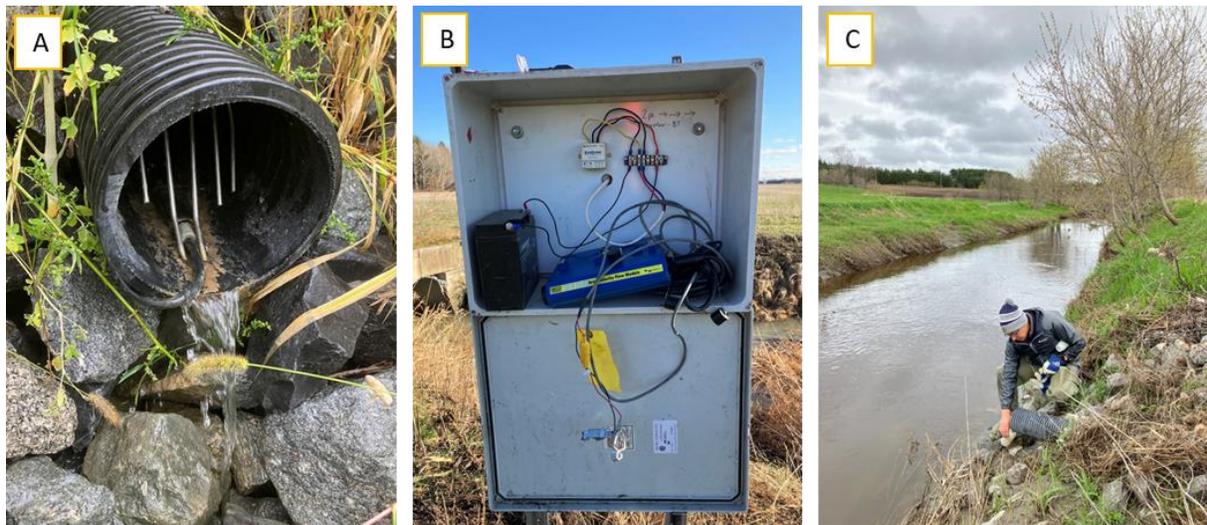
À l'occasion de campagnes déclenchées par un évènement pluvieux, un échantillon d'eau est récolté à chaque sortie de drainage et à chaque conduite d'avaloir (N=8). Ce type d'échantillonnage à l'échelle du champ a été documenté et déployé avec succès dans le cadre d'études antérieures (Michaud et al., 2018a, 2018b et 2021). Le partage des campagnes d'échantillonnage se fait entre l'équipe IRDA (pour les campagnes au printemps et à l'automne) et les producteurs qui agissent à titre de collaborateurs locaux (pour les campagnes pendant la saison estivale). Les bouteilles rapportées au Laboratoire d'analyse agroenvironnementale de l'IRDA sont analysées pour les paramètres suivants : matières en suspension, azote minéral, phosphore soluble, phosphore total, phosphore biodisponible et métaux dissous (P, Ca, K, Mg, Na).

L'acquisition en continu des données de vitesses et d hauteurs d'eau s'est échelonnée de décembre 2021 à octobre 2023. Le Tableau 1 recense, pour chaque site, le nombre d'échantillons prélevés dans le cadre du projet. En plus du suivi aux conduites de drains et d'avaloirs, trois piézomètres (équipés d'une sonde à pression HOB0 et enfouis dans le sol) ont été installés dans chaque champ au courant de l'été 2022 (N=12). Les résultats des suivis de nappe sont présentés à l'annexe A.



Attention : les parcelles sont localisées dans la région de la rivière Pot-au-Beurre, alors que la station hydrométrique sont sur le bassin de la Petite rivière Pot-au-Beurre.

**Figure 0 : Localisation des champs à l'étude, bassin de la Petite rivière Pot au Beurre.**



**Figure 3 : Sonde ISCO à la sortie d'un drain (A), station d'alimentation du dispositif (B), échantillonnage d'eau à la sortie des conduites dans les champs du bassin de la Petite rivière Pot au Beurre (C).**

**Tableau 1 : Échantillons d'eau prélevés dans le cadre du projet à chaque site.**

Année	BIA	BID	BTA	BTD	SIA	SID	STA	STD
2021	1	1	0	1	2	2	1	2
2022	10	9	8	9	6	9	8	9
2023	5	6	5	5	5	4	5	4
TOTAL	16	16	13	15	13	15	14	15

\*BIA : Bellevue-Intervention-Avaloir, BID : Bellevue-Intervention-Drain, BTA : Bellevue-Témoin-Avaloir, BTD : Bellevue-Témoin-Drain, SIA : Sud-Intervention-Avaloir, SID : Sud-Intervention-Drain, STA : Sud-Témoin-Avaloir, STD : Sud-Témoin-Drain.

## 1.2 Condition physique des sols et suivi agronomique

Les deux champs adjacents Intervention et Témoin sur le rang Bellevue (BT et BI) à Saint-Robert ont des sols de texture sablonneuse, alors que les deux autres à proximité sur le rang Sud (ST et SI) à Sainte-Victoire-de-Sorel sont de texture limono-argileuse. Le détail des caractéristiques de terrain est présenté au Tableau 2.

En post-récolte à l'automne 2021, la caractérisation de la masse volumique apparente le long de profils de sol des champs du rang Sud a été réalisée. Les profils de sols ont été échantillonnés à partir de carottes prélevées avec une sonde Giddings suivant trois transects de 20 m orientés de façon transversale par rapport à la longueur de chacun des champs (Figure 4). En tout, cinq profils de sol espacés de 5 m et de 60 cm de profondeur (6 échantillons de 10 cm) ont été réalisés le long des trois transects. Un portrait de la résistance à la pénétration de la surface jusqu'à 1 m de profondeur a aussi été réalisé simultanément à l'aide d'une sonde Veris sur des transects parallèles, à raison de 21 mesures (espacement de 1 m) par transect. À l'automne 2021, les échantillons de sol ont été pesés, séchés à 105 °C à l'étuve pendant 48h et repesés une seconde fois pour obtenir les masses volumiques apparentes (MVA). Une balance calibrée a été utilisée lors des pesées. Les résultats des MVAs, disponibles à l'annexe B pour le couple Témoin-Intervention limono-argileux du rang Sud, ont montré une hétérogénéité plus marquée pour les MVAs de la couche de surface (0-20 cm), avec une moyenne de 1,17g/cm<sup>3</sup> au site témoin et 1,33 g/cm<sup>3</sup> au site intervention. Pour la couche 20-50 cm, les moyennes sont à 1,36 g/cm<sup>3</sup> au site témoin et à 1,47 g/cm<sup>3</sup> au site intervention.

Les champs du rang Bellevue n'ont pu être échantillonnés selon le même protocole, les premiers essais ayant démontrés que la texture était trop sablonneuse pour obtenir des carottes non friables. Pour obtenir les masses volumiques apparentes dans ces champs, des cylindres de sol non-perturbés ont été prélevés. Au total, 36 cylindres (neuf points par champ, deux champs) à deux profondeurs (0-20 cm et 20-50 cm) ont été échantillonnés. Les résultats, détaillés à l'annexe B, montrent une homogénéité entre les deux champs. En moyenne, les MVAs de la couche 0-20 cm sont de 1,42 g/cm<sup>3</sup> et 1,43 g/cm<sup>3</sup> pour les sites témoin et intervention respectivement. Pour la couche 20-50 cm, les moyennes sont à 1,49 g/cm<sup>3</sup> au site témoin et à 1,56 g/cm<sup>3</sup> au site intervention.

Les conditions physiques des sols devaient initialement être évaluées en début et à la fin du projet pour estimer si les pratiques de conservation induisent un impact sur ces dernières. Considérant que l'impact des pratiques de conservation sur la condition physique des sols s'observent sur des périodes beaucoup plus longues, cet objectif de recherche a été jugé invalide et retiré du projet. Les échantillonnages de sol ont donc été réalisés seulement en début de projet et n'ont pas menés à des analyses à proprement dit. Les résultats de laboratoire ont toutefois été présentés aux producteurs.

Les informations de régie des cultures, de travail de sol et de fertilisation, recueillies avec l'aide des partenaires au projet, sont présentées à l'annexe C. Les conseillères des producteurs ont chacune repassé par deux fois le document en cours de projet, afin de le remplir au meilleur de leur connaissance et des informations disponibles.

**Tableau 2 : Caractéristiques de terrain dans les quatre sites du bassin de la Petite rivière Pot au Beurre : rang Sud Témoin (ST), rang Sud Intervention (SI), rang Bellevue Témoin (BT) et rang Bellevue Intervention (BI).**

Site	Superficie (ha)	Drainage	Relief	Série(s) de sol
ST	3,23	Mal drainé	Élévation: 12 à 18 m ; Pentés : 0 à 3% en bas relief et 4 à 8 % en position élevée	St-Ours loam-limono-argileux, Ste-Rose loam, Des Chenaux laom limono-argileux
SI	4,77	Mal drainé - Imparfaitement drainé	Élévation: 12 à 21 m ; Pentés : 0 à 3% en bas relief et 4 à 8 % en position élevée	Kierkoski loam limono-argileux, Joseph sable fin loameux, St-Jude sable loameux, Saint-Rose laom érodé
BT	9,92	Mal drainé; imparfaitement drainé	Élévation: 21 m ; Pentés : 0 à 3 %	Joseph sable fin loameux, Fleury sable fin, Bellevue loam, Massueville sable in loameux, Bellevue loam sableux fin
BI	9,61	Mal drainé - Imparfaitement drainé	Élévation: 21 m ; Pentés: 0 à 3 % avec creux de 4 à 8 % le long des drains	Joseph sable fin loameux, Fleury sable fin, Bellevue loam sableux fin, Masueville sable fin loameux



**Figure 4 : Prélèvement avec une sonde d'échantillonneur Giddings montée sur tracteur (A), piquetage des transects (B) et carottes de sol (C).**

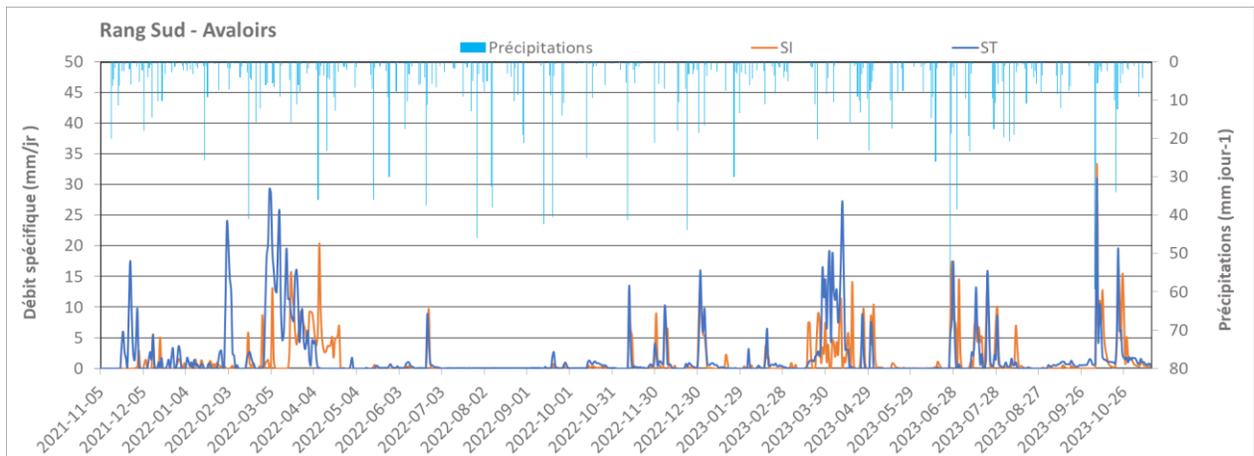
### 1.3 Résultats significatifs obtenus

Les suivis hydrométriques effectués aux avaloirs et aux drains des champs témoin et intervention sont présentés aux figures 5 et 6 pour le rang Sud et 7 et 8 pour le rang Bellevue. Il est possible de constater que :

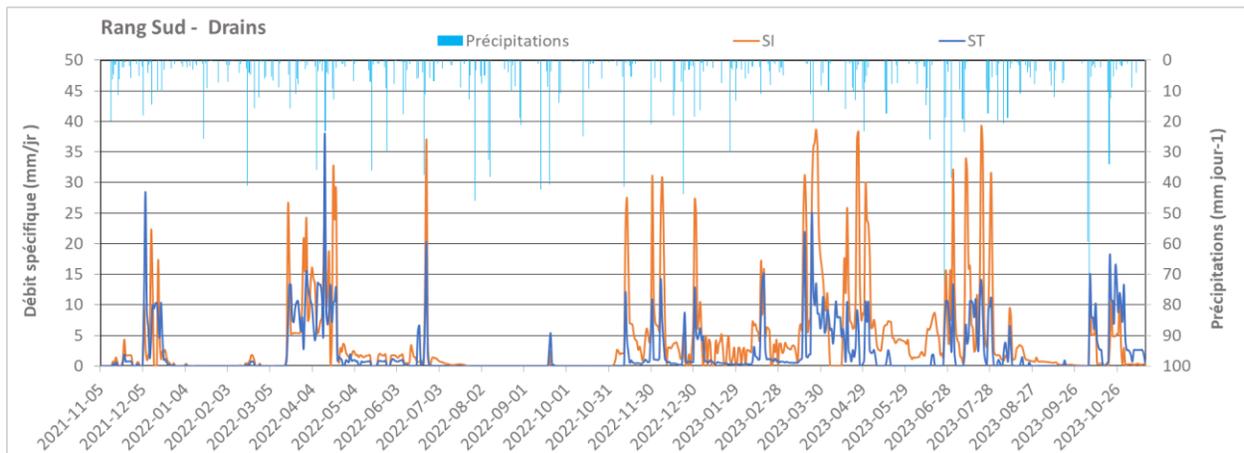
- Le régime est différent entre 2022 et 2023 dû à la pluviométrie, qui vient directement impacter les débits sortants;
- Il y a plus d'eau dans les drains des quatre sites que dans les avaloirs, avec une part typique de 30% des hauteurs d'eau totales qui sont exportées par ruissellement de surface (annexe K);
- Une perte de données (Figure 7) est observée de novembre 2022 à mars 2023 au site BTA et de mai 2023 à novembre 2023 au site BIA;
- L'écoulement total est plus grand sur le rang Sud que sur le rang Bellevue. Les observations ne permettent pas d'expliquer ces différences. Le paragraphe ci-bas reprend les facteurs possibles pouvant impacter les régimes hydriques observés; ;
- Les tendances observées sont inverses dans les sites du rang Sug vs ceux du rang Bellevue :

- Avaloirs : au rang Sud, il y a plus d'eau dans le témoin (conservation) que dans l'intervention (conventionnel) alors qu'au rang Bellevue, il y a moins d'eau dans le témoin (conservation) que dans l'intervention (conventionnel);
- Drains : au rang Sud, il y a moins d'eau dans le témoin (conservation) que dans l'intervention (conventionnel) alors qu'au rang Bellevue, il y a plus d'eau dans le témoin (conservation) que dans l'intervention (conventionnel);

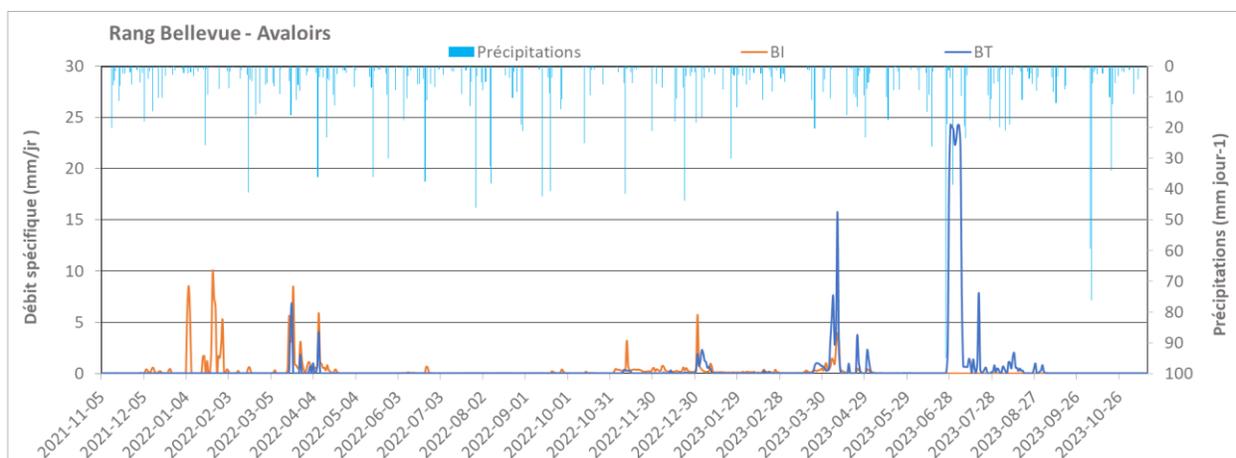
Les pratiques agricoles ne permettent pas d'expliquer à elles seules les différences entre les régimes hydrologiques des champs étudiés. Plusieurs autres facteurs peuvent affecter les écoulements : averses localisées, isolement hydraulique des parcelles, qualité et âge du système de drainage, régie de culture, différences physiques du sol.



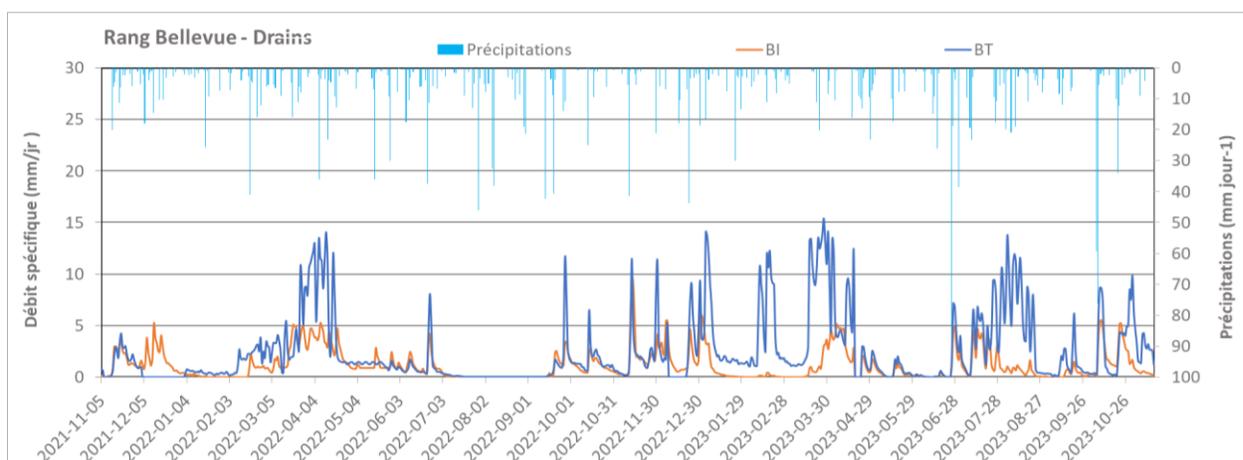
**Figure 5. : Suivi hydrométrique aux avaloirs (témoin et intervention) pour le rang Sud (bassin de la Petite rivière Pot au Beurre).**



**Figure 6. : Suivi hydrométrique aux drains (témoin et intervention) pour le rang Sud (bassin de la Petite rivière Pot au Beurre).**



**Figure 7 : Suivi hydrométrique aux avaloirs (témoin et intervention) pour le rang Bellevue (bassin de la Petite rivière Pot au Beurre).**



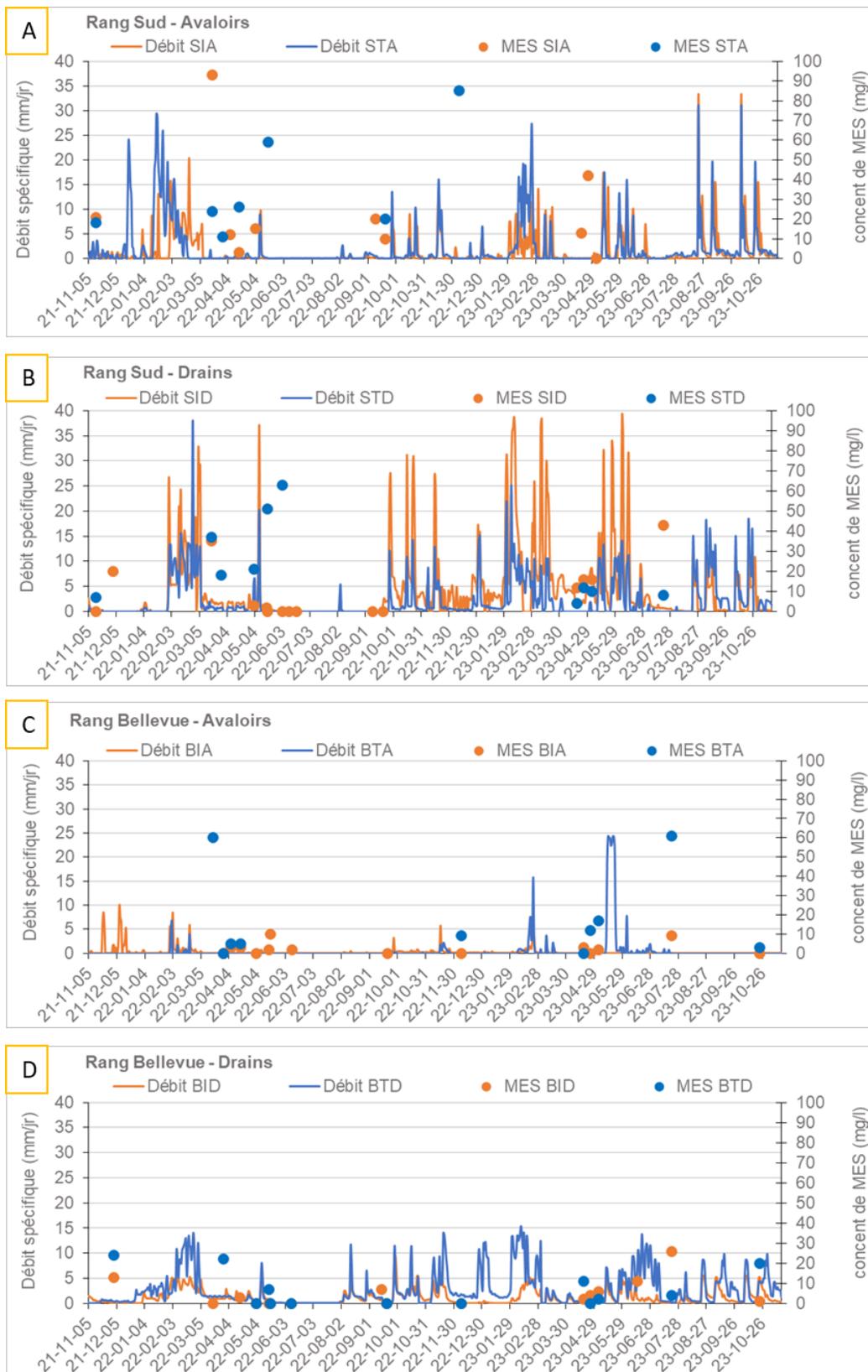
**Figure 8 : Suivi hydrométrique aux drains (témoin et intervention) pour le rang Bellevue (bassin de la Petite rivière Pot au Beurre).**

Les figures 9 à 11 comparent les concentrations entre les dispositifs témoin et intervention pour les matières en suspension (MES), le phosphore total et les nitrates recueillis aux avaloirs et aux drains aux rangs Sud et Bellevue. Le calcul des charges n'a pas été fait étant donné le manque de données de débit et l'incertitude très grande d'un tel calcul liée aux conditions du projet (petite échelle sur courte période). L'estimation des charges n'étant pas utile à la résolution de la question de recherche, l'interprétation des résultats s'est plutôt concentrée sur la relation concentration-débit. Le détail des analyses de laboratoire est présenté à l'annexe B. Il est possible de constater que :

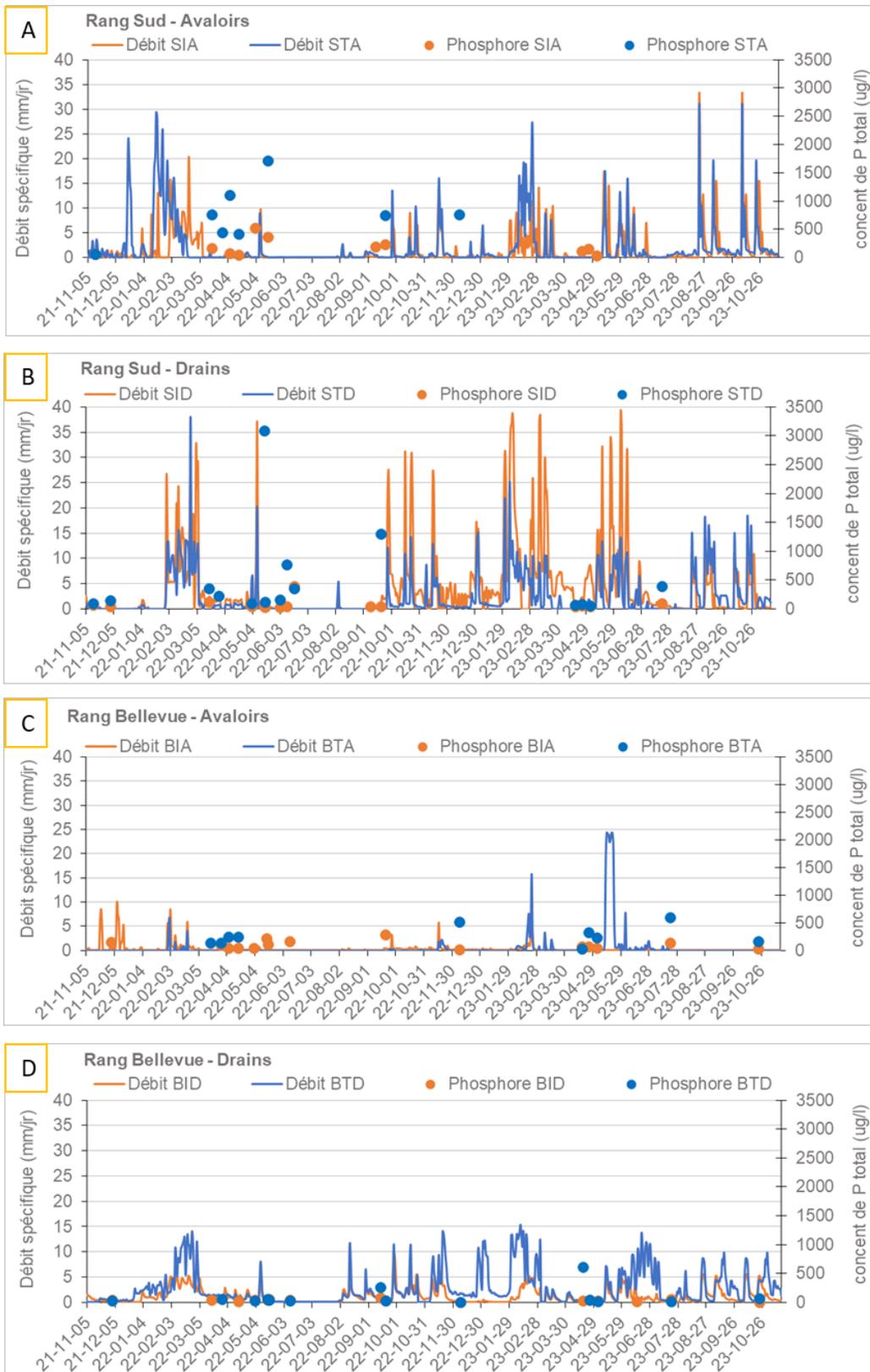
- Plus il y a du débit, plus il y a de MES. Des concentrations plus élevées sont d'ailleurs observées dans le rang Sud, où il y a davantage d'écoulement d'eau;
- Le phosphore voyage avec les MES dans l'eau de surface, mais aussi via l'écoulement préférentiel par les voies souterraines;
- Comme les nitrates voyagent principalement par l'eau souterraine, les échantillons aux drains montrent des valeurs plus élevées que dans les échantillons provenant des avaloirs. L'effet saisonnalité, avec l'azote résiduel du sol au printemps et les apports en fertilisants durant la saison de culture, vient directement influencer la quantité de nitrates disponibles au lessivage. Aux drains, le critère environnemental de 10 mg/L est dépassé quelques fois seulement dans les drains et au printemps;
- Les relations débit-concentration ne montrent pas de tendances claires, expliqué en grande partie par un nombre de données insuffisant;

- Pour les MES et le phosphore, des valeurs généralement plus élevées sont observées dans les champs témoins. Pour l'azote, des valeurs généralement plus élevées sont observées dans les champs interventions.

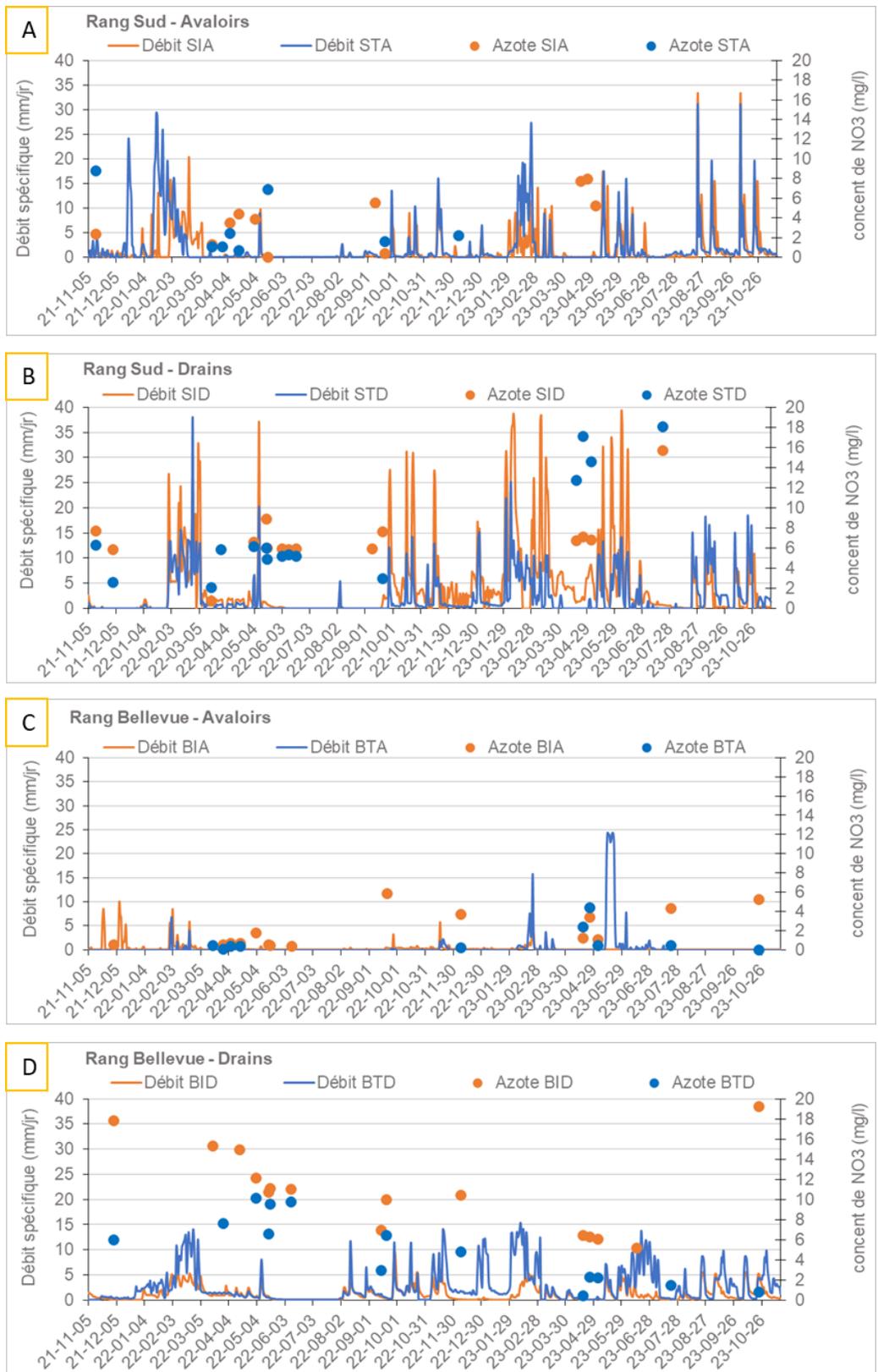
De nouveau, il n'est pas possible d'attribuer aux pratiques agricoles les différences observées entre les différents sites. Plusieurs autres facteurs peuvent affecter les écoulements : averses localisées, isolement hydraulique des parcelles, qualité et âge du système de drainage, régie de culture, différences physiques du sol, richesse des sols, dates d'épandage.



**Figure 9. Comparaison témoin-intervention des relations entre la concentration en MES et le débit aux avaloirs et aux drains pour les rangs Sud (A et B) et Bellevue (C et D).**



**Figure 10. Comparaison témoin-intervention des relations entre la concentration en phosphore total et le débit aux avaloirs et aux drains pour les rangs Sud (A et B) et Bellevue (C et D).**



**Figure 11. Comparaison témoin-intervention des relations entre la concentration en nitrates total et le débit aux avaloirs et aux drains pour les rangs Sud (A et B) et Bellevue (C et D).**

Tel que mentionné précédemment, il n'est pas possible d'établir de relation évidente. De nombreux facteurs environnementaux et opérationnels peuvent expliquer les variations entre les sites : type et état de santé du sol (compaction ou couche indurée, trous de vers de terre, taux de matière organique), chemins de l'eau (nivellement, raies de curage, canaux préférentiels, superficies réellement drainées), design (enrobage, espacement, type de puits) et état de santé de réseau de drainage et des avaloirs, régie de fertilisation (épandage avant pluie, incorporation).

Les analyses ont été conduites en collaboration avec les producteurs dans le cadre de deux rencontres (mars 2023 et décembre 2023). Les comptes-rendus des rencontres sont disponibles à l'annexe D.

## 2. Évaluer l'impact de l'amélioration des conditions physiques des sols sur les épisodes de crue et la migration des charges en sédiments sur le bassin versant de la rivière Saint-Germain en contexte de changements climatiques (objectif 2)

### 2.1 Instrumentation

La figure 12 présente le portrait hydrologique général du bassin. Les zones inondables établies par la MRC de Drummondville se situent principalement en amont et en aval de la station hydrologique Berry. L'annexe E présente un extrait du schéma d'aménagement de la MRC de Drummondville d'octobre 2021, identifiant plus précisément trois zones inondables sensibles dans le bassin soit les secteurs de Saint-Germain-de-Grantham (confluence du ruisseau Berry et de la rivière Saint-Germain – 8ième rang), de Wickham, ainsi que de Wickam et Lefebvre (10ième rang et route Caya). Dans les trois secteurs, un bon nombre de terres agricoles sont affectées par des zones de grands courants (0-20 ans) représentant un risque d'inondation annuel de 5%. Le secteur de Saint-Germain-de-Grantham a une superficie à risque nettement plus importante que les deux autres. Les surverses du réseau des eaux usées sont quant à elles situées dans la portion urbaine du bassin à l'aval des stations de l'IRDA mesurant la turbidité, sauf pour un ouvrage de surverses localisé à Wickam 5 km en amont de la station hydrométrique Brébeuf.

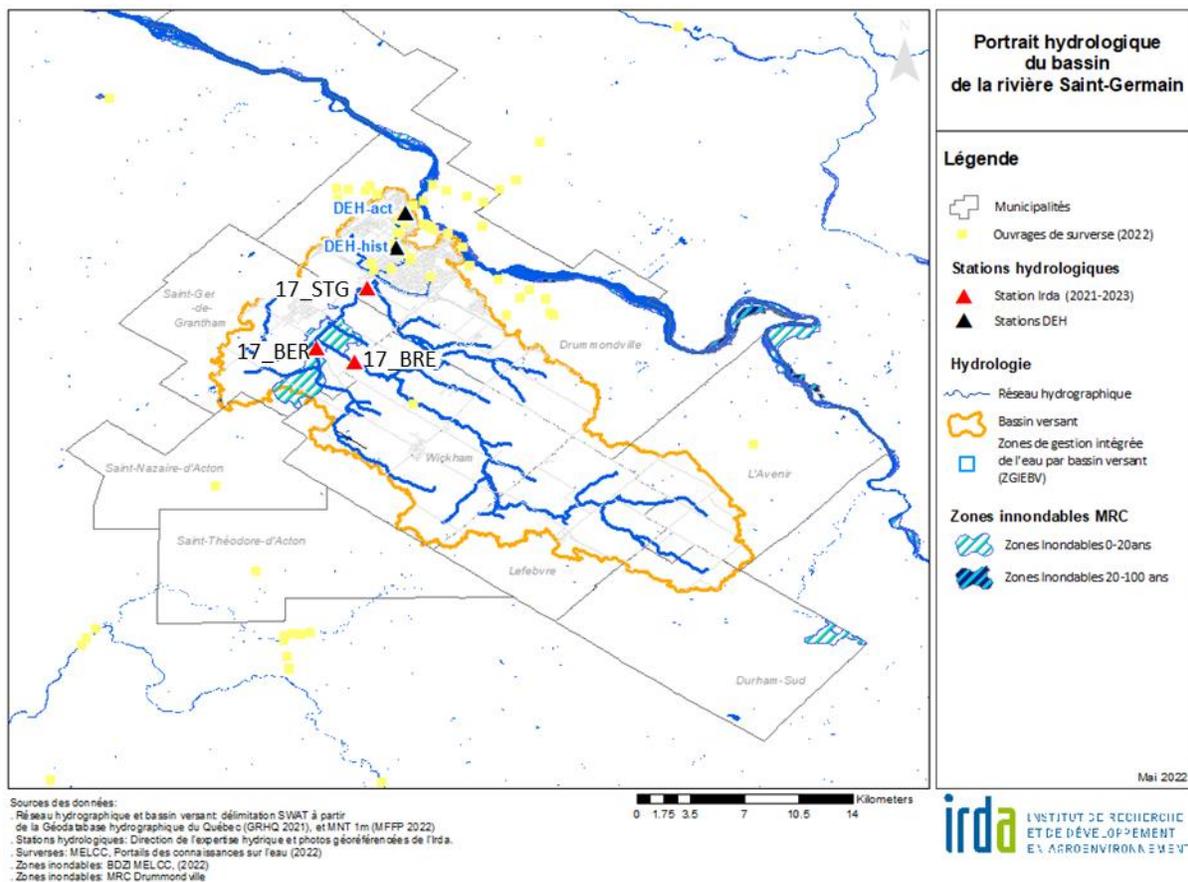


Figure 12 : Portrait hydrologique général du bassin versant de la rivière Saint-Germain.

Trois stations hydrométriques ont été installées sur la rivière Saint-Germain (17\_STG) et ses affluents (Berry (17\_BER) et Brébeuf (17\_BRE)) à la fin mars 2021 (Figure 12). Deux autres stations opérées par la Direction de l'Expertise Hydrique (DEH) du MELCCFP sont localisées sur la figure 12, soit les stations St-Germain (DEH-act) et St-Germain-historique (DEH-hist-station fermée en juillet 2014). Ces stations sont utilisées pour aider à déclencher les sorties sur le terrain (hydrogramme en temps réel à la station DEH-act) ainsi que pour fournir de longues séries de données hydrométriques nécessaires à l'optimisation du modèle hydrologique.

Les protocole et dispositif utilisés décrits ci-dessous sont spécifiquement adaptés pour les mesures de hauteur d'eau et le calcul des débits. Les tableaux 3 et 4 colligent l'information relative à l'instrumentation des trois stations, à leur entretien et à leur emplacement.

Les sondes barométriques de type HOBO permettent de mesure la hauteur d'eau (Figure 13A). Les pressions atmosphériques mesurées par chaque sonde, l'une au fond du cours d'eau et l'autre à l'air libre, sont soustraites pour donner la hauteur d'eau.

Les sondes multiparamétriques YSI (Figure 13B) sont complètement immergées et protégées par un cylindre en acier perforé. Le dispositif est installé au centre du cours d'eau. Cette sonde mesure les signaux géochimiques en continu, dont la conductivité électrique, de même que la turbidité à l'aide d'un capteur optique. Les mesures de turbidité permettent d'estimer les flux de MES dans le cours d'eau tandis que les mesures de conductivité électrique permettent de différencier les écoulements lents (souterrain) et les écoulements rapides (ruissellement) selon la charge minérale (conductivité électrique) des eaux. Le dispositif immergé de la sonde assure sa protection contre le gel et diminue les bris possibles dus aux mouvements des glaces lors des redoux hivernaux et des crues printanières. Il permet ainsi de prendre des mesures en continu pendant la période hivernale sans manquer l'épisode de fonte des neiges. La sonde fonctionne avec huit batteries AA qui lui donnent une autonomie maximale d'environ quatre mois. À chaque visite d'entretien de la station par l'équipe de l'IRDA (Figure 13C), les données sont récoltées de la sonde, les capteurs sont nettoyés et un échantillon d'eau est prélevé et rapporté en laboratoire pour l'analyse de conductivité et turbidité afin de détecter les cas de dérives des mesures des capteurs.

Ces informations sont complétées par des mesures ponctuelles de débit (jaugeage) prises lors des visites régulières sur le terrain (Figure 13D). Chaque jaugeage est effectué avec un minimum de 13 observations réparties uniformément le long de la section du cours d'eau. Les mesures de débits instantanés obtenues par le moulinet hydrologique permettent d'établir la courbe de tarage servant au calcul de débit en continu. Les courbes de tarage sont présentées à l'annexe F.

Le suivi géochimique aux trois stations (flux de sédiments et conductivité électrique permettant la séparation des hydrogrammes) est présenté à l'annexe G. Le flux de sédiment est utilisé pour valider les résultats de modélisation présentés à la section 2.3. La séparation d'hydrogramme n'a cependant pu être valorisée, ceci par manque de temps pour l'intégrer au processus d'optimisation du modèle agro-hydrologique. 15 sorties terrain ont été assurées par l'équipe de l'IRDA sur la durée du projet pour le jaugeage des débits.

**Tableau 3. Description des instruments en place à chaque station hydrométrique.**

Équipement	Pas de temps	Paramètres mesurés	Entretien requis
<b>Sonde multiparamètres (YSI 6920 série 1)</b>	15 minutes	Turbidité, conductivité électrique et température	Calibration (annuellement) Changement de batteries (aux 3 mois) Nettoyage des sondes (aux 3 mois)
<b>Sonde barométrique (HOBO U20L Onset)</b>	15 minutes	Hauteur de la colonne d'eau par différence de pression atmosphérique	Pas d'entretien nécessaire

**Tableau 4: Localisation et coordonnées des stations instrumentées sur la rivière Saint-Germain en 2021.**

Nom de la station	Coordonnées géographiques (NAD83)	Période de suivi	Superficie des bassins (ha)
Saint-Germain (17_STG)	LAT : 45.85318 LONG :-72.52811	24 mars 2021 au 22 septembre 2023	20 614
Brébeuf (17_BRE)	LAT : 45.81011 LONG :-72.53536	24 mars 2021 au 22 septembre 2023	12 955
Berry (17_BER)	LAT : 45.81856 LONG :-72.55745	24 mars 2021 au 22 septembre 2023	3 679



**Figure 13 : Installation et entretien des stations hydrologiques dans le bassin versant de la rivière Saint-Germain : sonde à pression (A), sonde multiparamètres YSI (B), entretien de la sonde YSI et récolte des données (C) et opération de jaugeage au débitmètre Flowtracker (D).**

## 2.2 Méthodologie

### 2.2.1 Modélisation hydrologique

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 données en entrée. Les paramètres du modèle sont calibrés pour favoriser une représentation optimale des processus hydrologiques simulés sur le bassin versant.

Le modèle SWAT permet notamment de reconstituer la réponse hydrologique historique ou de la projeter en contexte de changements climatiques, en fonction de scénarios d'occupation du sol et de pratiques agricoles. Il emprunte les bases conceptuelles de différents outils de modélisation agroenvironnementale développés antérieurement, notamment les modèles: SWRRB (*Simulator for Water Resources in Rural Bassins*, Williams et al. 1985); EPIC (*Erosion-Productivity Impact Calculator*, Williams et al. 1984) ; CREAMS (*Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems*, Knisel 1980); GLEAMS (*Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems*, Leonard et al. 1987). L'émission et le transport des sédiments sont estimés avec l'équation universelle de perte de sol modifiée (MUSLE; Williams 1995) :

$$\text{MUSLE} = 11.8 (Q_{\text{surf}} \times q_{\text{max}} \times \text{SUP}_{\text{URH}})^{0.56} \times K_{\text{USLE}} \times C_{\text{USLE}} \times L_{\text{USLE}} \times \text{CFRG} \quad (1)$$

où:  $Q_{\text{surf}}$  est le ruissellement de surface (mm/ha);  $q_{\text{max}}$  est le débit de pointe (m<sup>3</sup>/s);  $\text{SUP}_{\text{URH}}$  est l'aire de l'URH modélisée (ha);  $K_{\text{USLE}}$  est le facteur d'érodabilité du sol;  $C_{\text{USLE}}$  est le facteur de couverture végétale du sol (-);  $L_{\text{USLE}}$  est le facteur topographique impliquant la pente et la longueur de pente (-);  $\text{CFRG}$  est le facteur de teneur en fragments rocheux (-).

### 2.2.2 Traitement des couches géomatiques

La figure 14 présente le modèle numérique de terrain (MNT) utilisé pour mettre en place le modèle hydrologique SWAT sur le bassin versant de la rivière Saint-Germain. Ces données d'une résolution de 1m sont issues de relevés LIDAR colligés par le ministère des Ressources naturelles et des Forêts et rendus disponible sur Données ouvertes (MRNF, 2023). Le bassin présente des altitudes entre 67 et 212 m pour un dénivelé de 145 m. La portion amont en tête de bassin présente un relief plus vallonné qui graduellement s'aplanit en allant vers l'embouchure pour former une plaine. Pour les fins du présent projet, le MNT a été rééchantillonné à la résolution de 20m 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 un seuil de drainage et de densification de ce réseau (seuils par défaut).

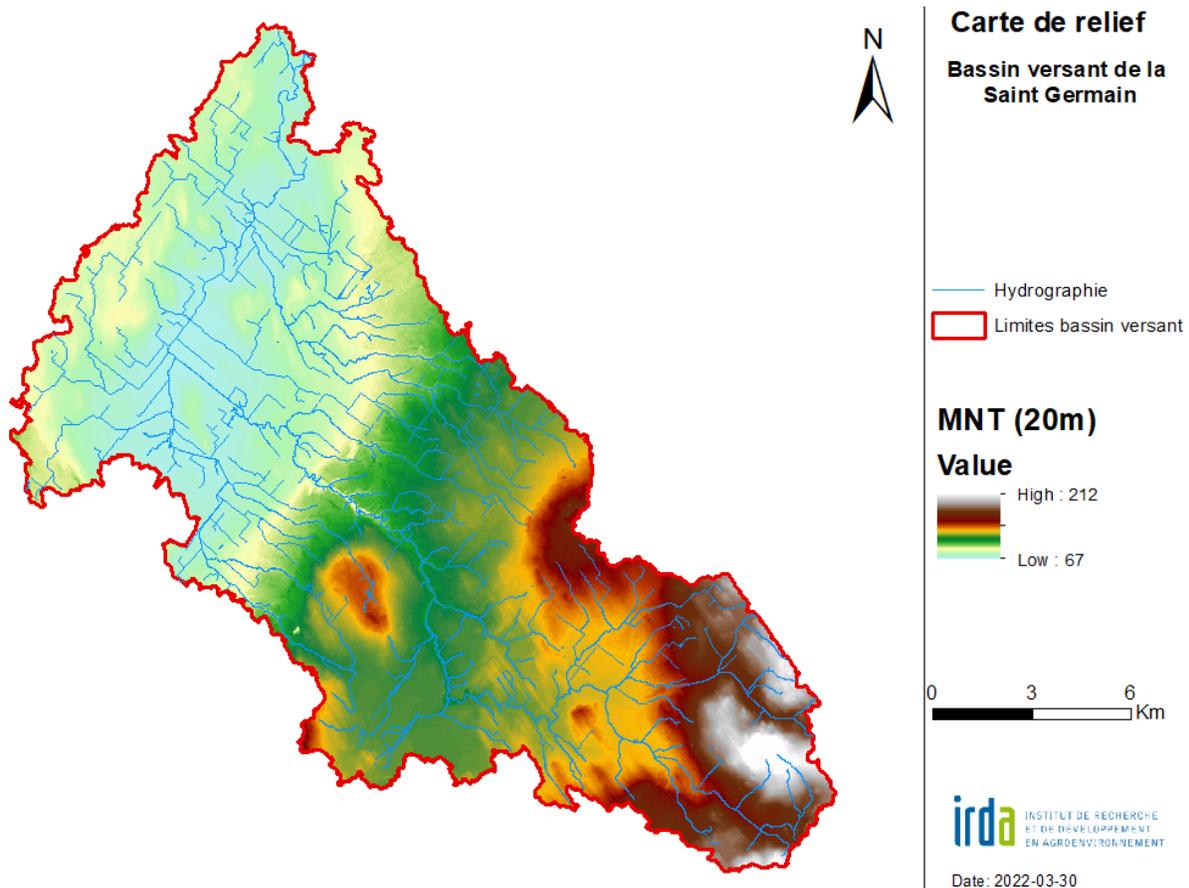


Figure 14 : Topographie et hydrographie du bassin de la rivière Saint-Germain.

La figure 15 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 (Canards Illimités Canada 2021); le réseau hydrologique surfacique du Québec (MRNF 2016), incluant les plans d'eau; le réseau routier sur lequel une zone tampon de trois (3) mètres a été créée (MNRF 2015); la couche écoforestière (MFFP 2021). L'occupation du sol se divise à part relativement égale entre l'occupation forestière et l'occupation agricole. La ville de Drummondville est située à l'embouchure du bassin. Plusieurs tourbières et milieux humides sont aussi présents en milieu forestier et tête de cours d'eau. L'activité agricole plus intensive se retrouve sur les sols loameux et organique en aval du bassin, mais aussi sur une moindre surface sur la portion amont. Quelques superficies sont aussi cultivées sur les sols sableux dans le sud du bassin en marge des tourbières. 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. Le Tableau 5 détaille les superficies d'occupation du sol entre 2003 et 2021 sur le bassin au complet. Une première moitié des superficies non déterminées de la carte écoforestière ont été converties en prairie permanente. L'autre moitié a été convertie en culture annuelles (répartie également entre le maïs, le soya et le foin). Nous sommes conscients que cette proportion se base sur une évaluation arbitraire, plus difficile de justifier. Considérant que l'information n'est pas a priori disponible, nous nous sommes appuyés sur des approches typiquement appliquées dans des travaux antérieurs réalisés à l'IRDA. Une vérification ponctuelle à partir de photo-interprétation aurait potentiellement permis d'approximer ces proportions. Ce choix méthodologique constitue une limitation du protocole de modélisation, mais nous estimons qu'il induit un impact sommes toutes limité sur les résultats et l'interprétation de ces derniers.

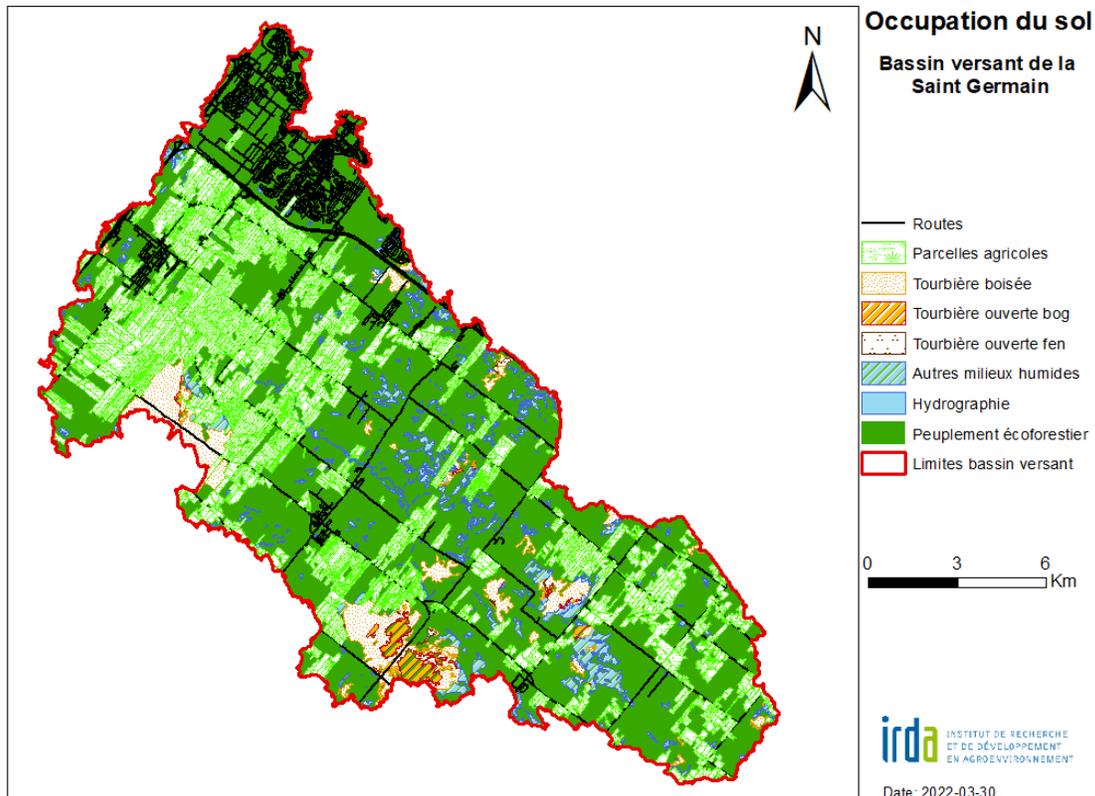
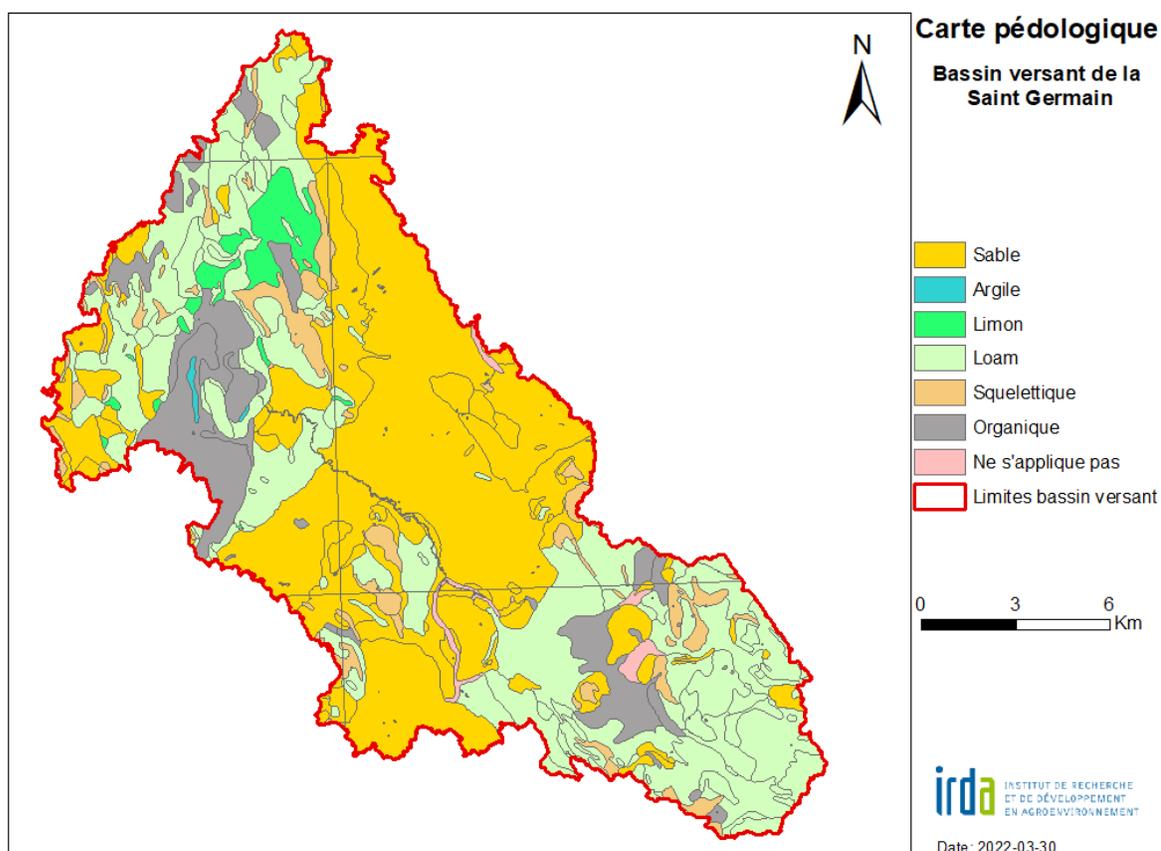


Figure 15. : Carte des sols et de l'occupation des sols du bassin de la rivière Saint-Germain.

**Tableau 5 : Superficies d'occupation du sol pour le bassin de la rivière Saint-Germain en 2003 et 2021 d'après la Base de Données des Parcelles et Production Agricole Déclarées.**

Type d'occupation	2003		2021	
	Superficie en ha	%	Superficie en ha	%
<b>Zone agricole</b>	<b>10,850.47</b>	<b>39.8%</b>	<b>10,850.95</b>	<b>39.8%</b>
Avoine	379.53	1.4%	92.93	0.3%
Blé	406.82	1.5%	228.80	0.8%
Canola	0.00	0.0%	35.89	0.1%
Engrais vert	18.31	0.1%	0	0.0%
Foin	5,015.66	18.4%	6,168.30	22.6%
Fraises	0.59	0.0%	0	0.0%
Maïs fourrager	218.75	0.8%	149.19	0.5%
Maïs grain	3,136.35	11.5%	1,304.94	4.8%
Orge	205.23	0.8%	119.31	0.4%
Pâturage	679.90	2.5%	1,717.37	6.3%
Seigle	5.46	0.0%	19.41	0.1%
Soya	783.87	2.9%	1,014.80	3.7%
<b>Zone urbaine, péri-agricole et forestière</b>	<b>16,415.66</b>	<b>60.2%</b>	<b>16,418.69</b>	<b>60.2%</b>
Eau	30.99	0.1%	31.02	0.1%
Forêt	10,352.60	38.0%	10,377.14	38.1%
Friches	389.87	1.4%	382.99	1.4%
Milieux humides	2,753.75	10.1%	2,779.45	10.2%
Sol nu	87.38	0.3%	34.98	0.1%
Urbain - imperméabilisé	2,801.07	10.3%	2,813.10	10.3%
<b>Total</b>	<b>27,266.13</b>	<b>100.0%</b>	<b>27,269.63</b>	<b>100.0%</b>

La Figure 16 présente la distribution des types de sol qui a été produite en joignant la carte de la Couverture pédologique de la province du Québec (IRDA 2022) à la table de données des propriétés physico-chimiques des sols de SWAT. Cette table est montée à partir de trois sources de données pédologiques, soit la Base de Données Hydropédologiques du Québec (IRDA 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 al. (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. Les sols prépondérants sont de type sableux au centre du bassin puis loameux en position élevée et tête de bassin et en position basse plus en aval. Les sols organiques et limoneux sont aussi présents de façon notable dans le bassin. La texture des sols laisse à penser aux premiers abords à un bon drainage du bassin.



**Figure 16 : Carte pédologique du bassin de la rivière Saint-Germain.**

La distribution des unités de réponse hydrologique (URH), unités spatiales à la base du calcul du bilan hydrologique par le modèle SWAT, résultent 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 sont présentées au Tableau 6.

**Tableau 6 : Classes de pente et superficies couvertes sur le bassin de la rivière Saint-Germain**

Pentes (%)	Superficie (ha)
0-5	25533
5-17	1409
17-40	12
40+	1,6
<b>Total</b>	<b>26956</b>

### 2.2.3 Traitement des données météorologiques

Les données météorologiques (précipitations, températures minimales et maximales) nécessaires en entrée au modèle SWAT sont issues des stations Drummonville, Saint-Germain-de-Granthan, Saint-Guillaume et Saint-Nazaire d'Environnement et changements climatiques Canada (ECCC). Les données couvrent la période 2013 à 2022 au pas de temps journalier.

### 2.2.4 Représentation des pratiques culturales

La représentation des pratiques culturales se limite à la rotation des cultures du maïs et du soya. Les autres cultures sont considérées comme pérennes. Une rotation maïs/soya est appliquée sur 75% de l'occupation du territoire de référence définie en 2021 (Figure 15), une rotation maïs/soya/céréales est appliquée sur la balance des cultures (25%).

### 2.2.5 Calibration et validation du modèle

La calibration des paramètres du modèle SWAT s'opère à l'aide de l'algorithme SCE-UA (Duan et al. 1993) sur la période 2015-2018 avec les données de la station hydrométrique de la DEH à l'embouchure du bassin. Les années 2013 et 2014 sont utilisées comme période de chauffe, une période additionnelle précédant la période de calage permettant au modèle hydrologique d'atteindre des conditions d'équilibre dans l'évaluation de son bilan hydrique. La validation de la performance des résultats de simulation s'opère sur la période récente 2021-2022 sur les sous-bassins instrumentés dans le cadre du projet. La fonction-objectif utilisée pour la calibration est le Kling-Gupta Efficiency (KGE, Gupta et al. 2009) :

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

où  $r$  est la corrélation linéaire entre les débits observés et simulés;  $\sigma$  est le ratio entre les écarts-types des débits observés et simulés;  $\mu$  est le ratio entre les moyennes des débits observés et simulés. Plus le critère KGE se rapproche le plus de 1, plus une simulation est jugée performante. Le KGE est typiquement considéré comme une métrique adéquate pour entraîner un modèle hydrologique à représenter les épisodes de forts débits.

### 2.2.6 Scénarisation de l'amélioration des conditions physiques des sols

Un scénario visant à simuler l'impact de l'amélioration des propriétés physiques des sols (découlant de l'adoption de pratiques de conservation) sur la réponse hydrologique est appliqué sur les séries de sols dominantes observées sur le bassin versant (Ricard et al. 2023). Il est important de comprendre que les pratiques de conservation du sol n'ont pas été explicitement intégrées dans l'outil de modélisation agro-hydrologique, mais bien les conséquences potentiellement attribuables à ces dernières sur la condition physique du sol. Ceci implique une limitation du protocole de recherche. Ce scénario est bâti à partir des données mesurées lors l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec (EESSAQ, Gasser et al. 2023) sur de nombreuses séries de sols pour les horizons Ap1 (~0-10cm), Ap2 (~10-25cm) et B (~25-35cm) sur des surfaces cultivées et des surfaces témoins non cultivées (p.ex. bord de champs, haie-brise-vent). Le scénario ici proposé pose l'hypothèse que les sols témoins présentent des propriétés physiques généralement améliorées par rapport aux sols cultivés. L'amélioration (changement relatif d'une condition cultivée par rapport à une condition témoin) est d'abord quantifiée en comparant les propriétés des sols témoins et cultivés mesurées par l'EESSAQ, puis appliquée aux paramètres de sols imposés en entrée au modèle hydrologique SWAT.

Les paramètres retenus pour simuler l'amélioration physique des sols sont la masse volumique apparente (MVA), la conductivité hydraulique (SOL\_K, mesurée aux profondeurs 10-25 cm et 35-50 cm) et la réserve en eau utile (SOL\_AWC). La réserve en eau utile n'étant pas mesurée dans l'EESSAQ, la teneur en eau à 10 kPa (TE\_10) est utilisée comme proxy de la teneur en eau 33 kPa (équation 3a), soit la capacité au champ (TECC). Considérant la définition ci-dessous (équation 3b), on pose l'hypothèse que la teneur en eau à 1500 kPa (au point de flétrissement, TEF) demeure constante et que l'amélioration de la réserve en eau utile (SOL\_AWC) est approximée par le changement de la teneur en eau à 10 kPa ( $\Delta TE_{10}$ , équation 3c) :

TECC ~ TE\_10 (3a)

SOL\_AWC ~ TE\_10-TEF (3b)

si TEF = cte à  $\Delta$ SOL\_AWC ~  $\Delta$ TE\_10 (3c)

Le Tableau 7 présente les valeurs médianes des trois propriétés physiques de sol citées ci-dessus (MVA, SOL\_K, TE\_10) pour les séries Saint-Amable et Des Saults. Ces séries occupent respectivement 33% et 7,7% du bassin de la rivière Saint-Germain, proportion correspondant assez bien à celle des superficies cultivées sur le bassin (39,8%, Tableau 5). Selon la propriété, environ 16 mesures sont disponibles pour les sols cultivés, et 8 pour les sols témoins. Les valeurs médianes sont estimées pour les horizons AP2 et B indépendamment, mais aussi à partir du regroupement des valeurs mesurées sur les deux horizons (AP2+B). Pour chaque propriété, une valeur quantitative de changement est choisie considérant qu'elle propose un scénario à la fois réaliste (physiquement cohérent) et contrasté (valeur suffisamment élevée d'amélioration pour percevoir un effet sur la réponse hydrique simulée). Les scénarios impliquent donc une réduction de -8% (série Saint-Amable) et -4% (série Des Sault) de la masse volumique apparente, d'une hausse de +30% et +26% de la conductivité hydraulique et d'une hausse de +4% et +7% de la capacité au champ. Ces améliorations sont ensuite appliquées aux propriétés initialement attribuées aux deux premières couches de sols représentées dans le modèle SWAT, correspondant respectivement aux profondeurs 0-23 et 23-43 cm. Il est important de comprendre que ces améliorations sont issues d'une comparaison de sols témoin non cultivés et de sols cultivés de l'EESSAQ, et non d'une modélisation explicite des pratiques de couverture et de conservation des sols par le modèle agro-hydrologique.

**Tableau 7 : Propriétés physiques entre des sols cultivés et témoin issues des échantillons analysés dans l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec\***

<b>Saint-Amable (SJU, 33%)</b>	Cultivé (n=16)	Témoin(n=8)	Amélioration(%)	Horizons	Scénario
Masses Volumiques Apparentes (MVA, g/cm3)	1,49	1,37	-8,29	AP2+B	-8%
Conductivité hydraulique (K, cm/h)	15,95	20,79	30,31	AP2+B	+30%
Teneur en eau à 10 kPa (TE100, -)	16,40	17,03	3,84	AP2+B	+4%
<b>Des Saults (DSU, 7,7%)</b>	Cultivé (n=16)	Témoin(n=8)	Amélioration(%)	Horizons	Scénario
Masses Volumiques Apparentes (MVA, g/cm3)	1,73	1,66	-4,03	B	-4%
Conductivité hydraulique (K, cm/h)	23,23	29,33	26,26	AP2	+26%
Teneur en eau à 10 kPa (TE100, -)	19,66	20,99	6,76	AP2+B	+7%

\* Valeurs médianes.

## 2.2.7 Simulations climatiques

Neuf simulations climatiques issues de l'ensemble *North American Coordinated Regional Downscaling Experiment* (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 modèle climatiques régionaux (RCM). Ces simulations sont forcées 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 1970 à 1999 ainsi que sur la période future de 2040 à 2069, aussi nommé « l'horizon 2050 ». Un post-traitement statistique de type « quantile mapping » (Themeßl et al. 2011) est appliqué aux variables climatiques simulées afin d'en corriger les biais (erreurs systématiques) et de leur attribuer des propriétés statistiques comparables aux observations météorologiques locales. Un ensemble de séries hydrologiques sont finalement simulées sur les périodes historique et future en alimentant le modèle hydrologique SWAT calibré avec les simulations climatiques post-traitées.

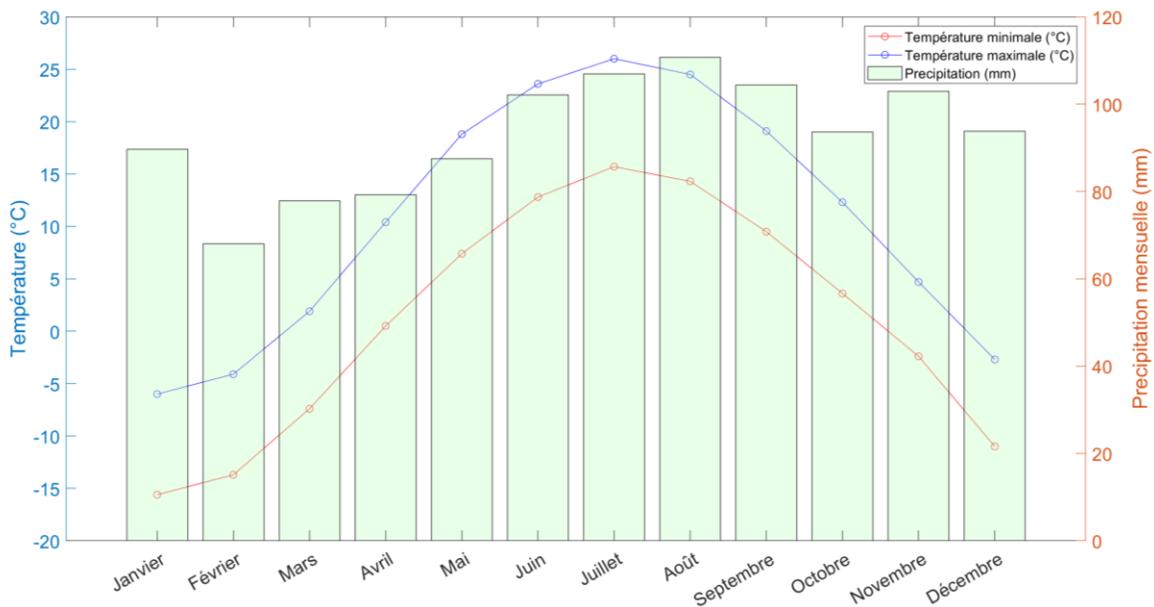
**Tableau 8 : Description des simulations climatiques régionales issues de l'ensemble NA-CORDEX.**

ID	Modèle climatique global (GCM)	Modèle climatique régional (RCM)	Résolution	RCP	Période historique	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				

## 2.3 Résultats significatifs obtenus

### 2.3.1 Observations météorologiques et hydrométriques

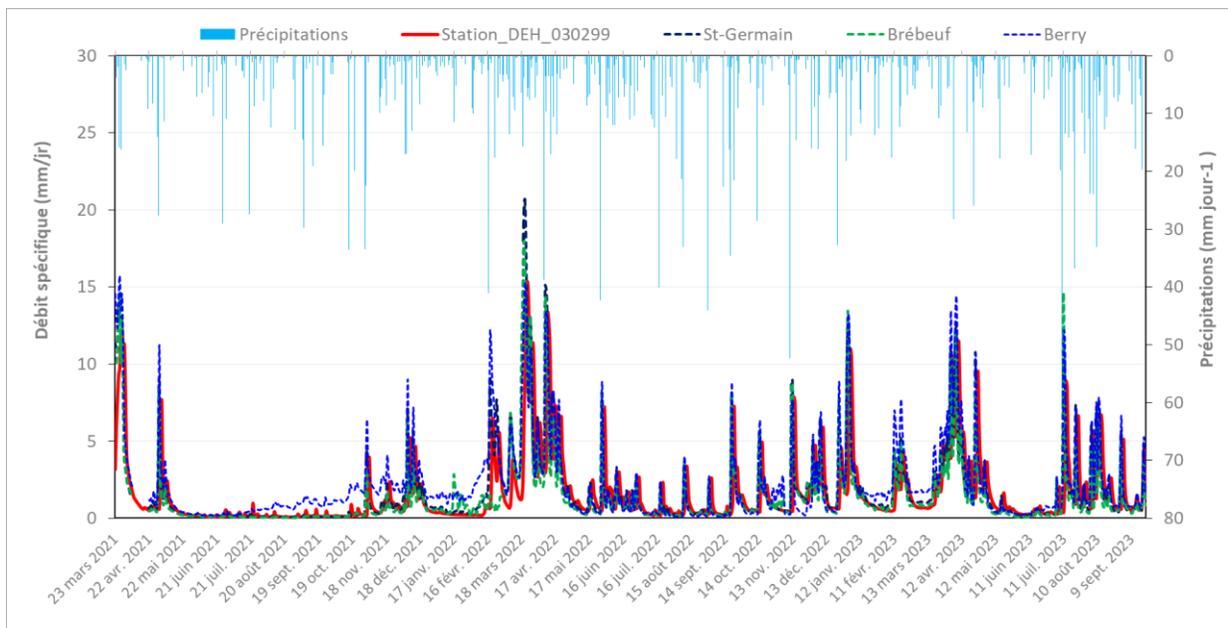
La figure 17 présente les normales climatiques de température (minimale et maximale) et de précipitations observées à la station 7022160 d'Environnement et Changement climatique Canada (Drummondville) pour chaque mois de l'année. Il est possible d'observer que les fluctuations saisonnières des températures suivent une évolution typique, avec un maximum observé en juillet et un minimum en janvier. Les fluctuations saisonnières de précipitation demeurent quant à elles assez minimes, à l'exception d'une légère diminution à l'hiver et au printemps.



**Figure 17 : Normales climatiques mensuelles observées à la station ECC-7022160 (Drummondville)**

Les mesures de débit issues du suivi hydrométrique aux stations Saint-Germain, Brébeuf et Berry sont présentées à la figure 18. Les mesures de débit à la station de la DEH ainsi que les précipitations observées sur la période sont également présentées à titre indicatifs. Il est possible d'observer:

- Des pointes annuelles au printemps lors du dégel et des débits moindres en période estivale, sauf à l'été 2023 dû aux précipitations plus abondantes et récurrentes;
- Des hydrogrammes en phase entre les trois stations IRDA et des pointes un peu décalées (plus tard dans le temps) avec la station du MELCCFP;
- Des débits spécifiques généralement plus élevés à la station Berry (17\_BER), sauf au dégel printanier de 2022 où la rivière à la station St-Germain (17\_STG) est montée à 20,7 mm/jr (49,3 m<sup>3</sup>/s) et à 17,9 mm/jr (26,9 m<sup>3</sup>/s) à la station Brébeuf (17\_BRE);
- Une hauteur d'eau annuelle exportée à l'exutoire des bassins atteignant 795 mm, 638 mm et 513 mm, respectivement aux stations Berry, St-Germain et Brébeuf (Annexe G).



**Figure 18 : Lames d'eau journalières (mm/jour) mesurées aux stations hydrométriques sur le bassin versant de la rivière Saint-Germain et précipitations (station 7022160 du MELCCFP).**

### 2.3.2 Post-traitement des simulations climatiques

La figure 19 présente les biais (erreurs systématiques) évalués à l'échelle mensuelle pour chacune des simulations climatiques brutes issues de l'ensemble climatique présentées au Tableau 8 (crx1 à crx9). De façon générale, les biais varient entre -6 et 4°C pour les températures et entre -1 et 2 mm/j pour les précipitations. Les simulations climatiques tendent à surestimer les températures en hiver (biais positif) et à les sous-estimer le reste de l'année. Les simulations climatiques tendent aussi à surestimer les précipitations tout au long de l'année, à l'exception des simulations crx3 et crx5 qui tendent à sous-estimer les précipitations plus fréquemment. La figure 20 présente les biais résiduels affectant les simulations climatiques post-traitées par quantile mapping. Il est possible d'observer que les biais sont notablement réduits et convergent vers zéro, ce qui confirme que le post-traitement corrige les biais de façon adéquate. Le Tableau 9 présente les valeurs de changements saisonniers de température et de précipitations projetées sur la période 2040-2069 par chacune des simulations climatiques. Les simulations projettent une augmentation assez systématique des températures. L'ampleur de ces changements est cependant plus marquée à l'hiver (DJF) et au printemps (MAM), par rapport à l'été (JJA) et à l'automne (SON). Les simulations tendent également à projeter une augmentation des précipitations, cette dernière étant plus marquée en hiver par rapport aux autres saisons.

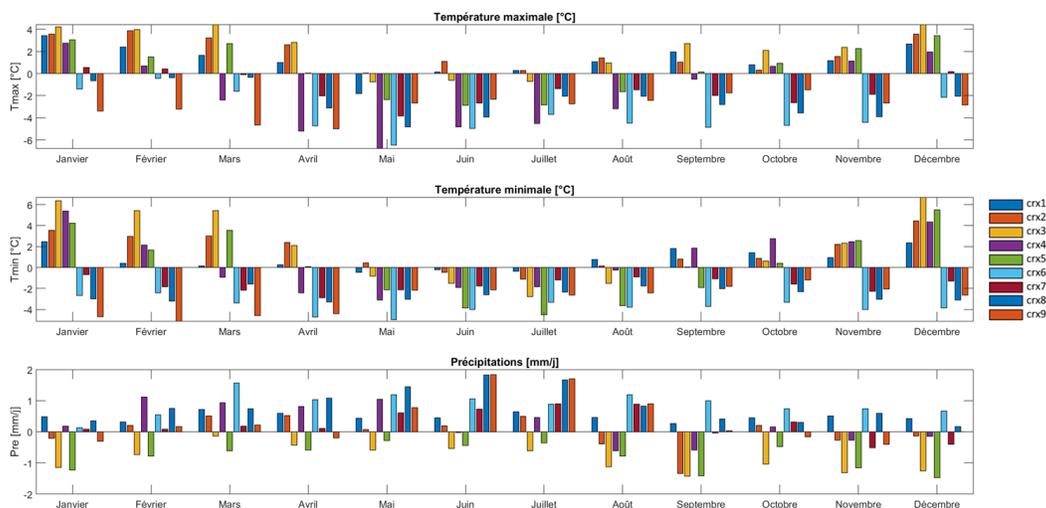


Figure 19 : Biais mensuels affectant les simulations climatiques brutes.

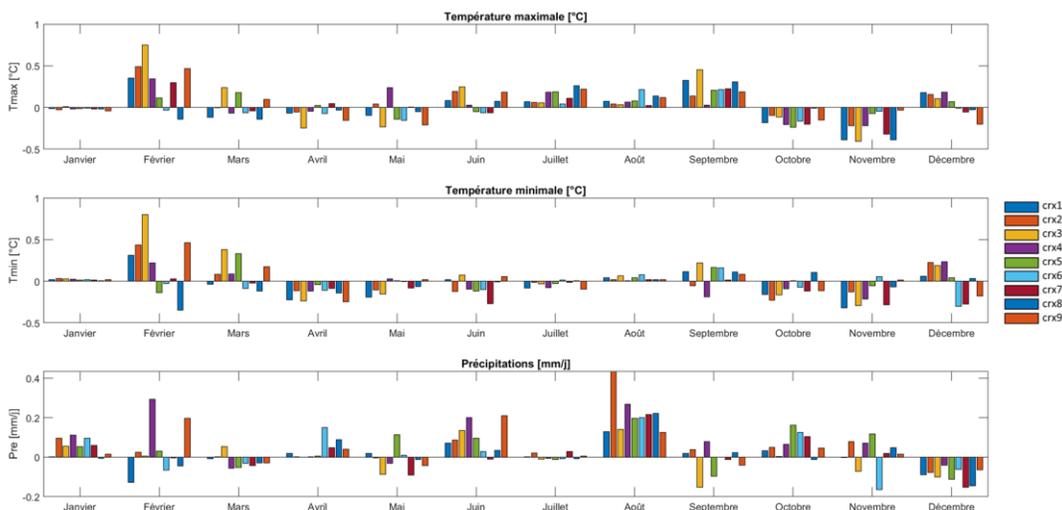


Figure 20 : Biais mensuels affectant les simulations climatiques post-traitées.

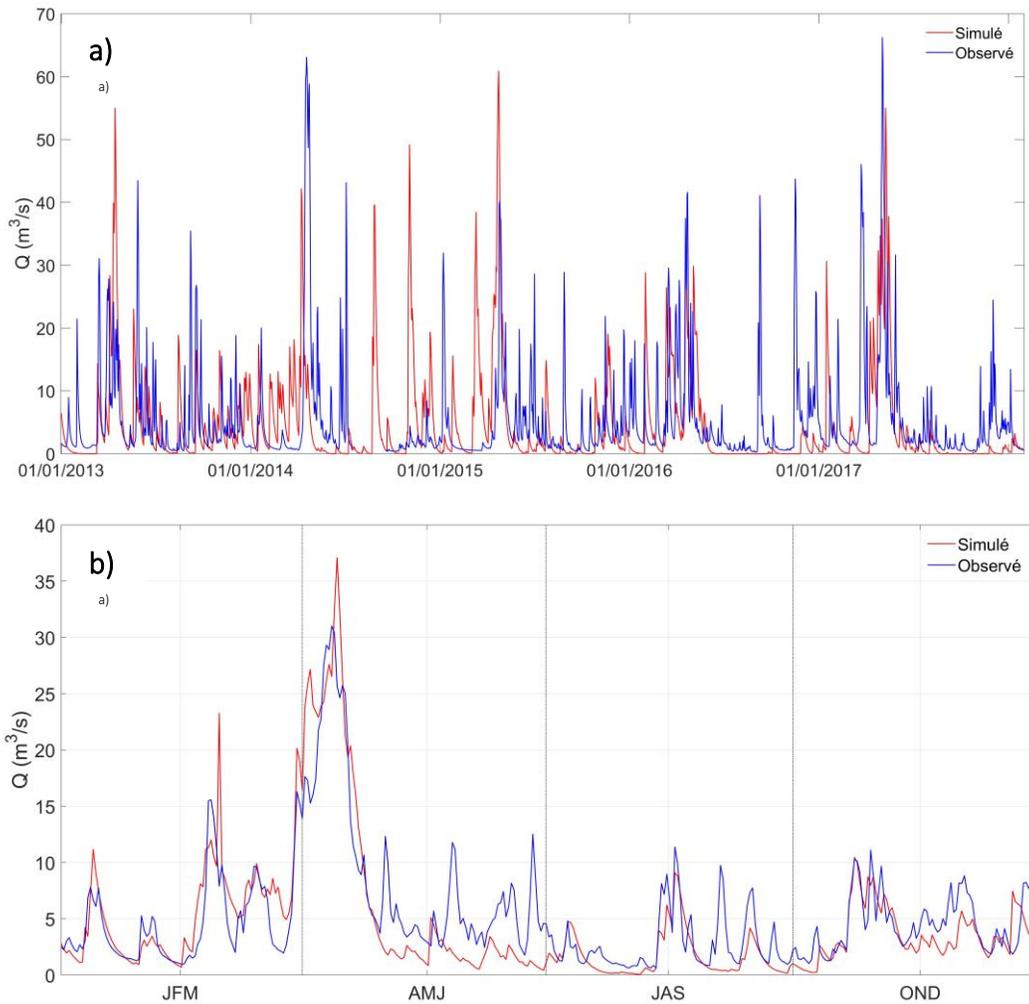
Tableau 9 : Changements projetés des températures et précipitations sur la période 2040-2069.

ID	Température minimale (°C)				Température maximale (°C)				Précipitations (mm/j)			
	DJF*	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON
crx1	5.2	3.7	3.7	3.6	3.4	3.3	3.9	3.6	0.5	0.3	0.0	-0.1
crx2	5.6	3.5	3.8	3.7	3.7	3.0	3.8	3.9	0.5	0.4	0.4	-0.1
crx3	4.7	3.0	3.4	3.4	3.6	2.6	3.1	3.5	1.0	0.7	0.1	0.2
crx4	2.2	4.6	2.1	0.5	1.5	4.5	2.1	0.1	0.4	0.0	0.3	0.4
crx5	4.4	2.3	2.6	2.2	3.1	2.0	2.5	2.2	0.7	0.4	0.2	0.2
crx6	3.6	2.7	1.9	2.7	2.3	2.0	2.5	2.7	0.4	0.0	0.0	0.1
crx7	4.9	3.9	2.8	3.8	3.6	3.1	3.1	3.7	0.4	0.6	0.1	0.5
crx8	4.5	2.4	2.6	3.1	2.7	2.0	3.0	2.9	0.3	0.3	-0.2	0.3
crx9	4.7	3.9	2.8	2.7	3.0	3.4	2.3	2.5	0.4	0.5	0.5	0.3

\*DJF pour décembre à février; MAM pour mars à mai; JJA pour juin à août; SON pour septembre à novembre.

### 2.3.3 Impact de l'amélioration des propriétés physiques des sols sur la réponse hydrologique en contexte de changements climatiques.

La figure 21a présentent l'hydrogramme simulé à la station St-Germain (DEH) sur les périodes de chauffe (2013-2014) et de calibration (2015-2018). Il est possible d'observer que les fluctuations saisonnières ainsi que l'ampleur des événements de crue sont relativement bien représentées, au détriment des épisodes de faible débit. La performance de simulation est a priori jugée faible (KGE = 0.26, équation 2), ce qui est principalement dû à une série simulée faiblement corrélée aux observations ( $r = 0,26$ ). En contrepartie, le ratio entre les écarts-types ( $\sigma = 1,11$ ) et le biais ( $\mu = 0,86$ ) peuvent être jugés acceptables pour une analyse en contexte de changements climatiques. La figure 21b présente l'hydrogramme interannuel moyen sur la période de calibration. Il est possible d'y observer une représentation satisfaisante des variations saisonnières de débit ainsi qu'une sous-estimation des débits en période d'étiage.



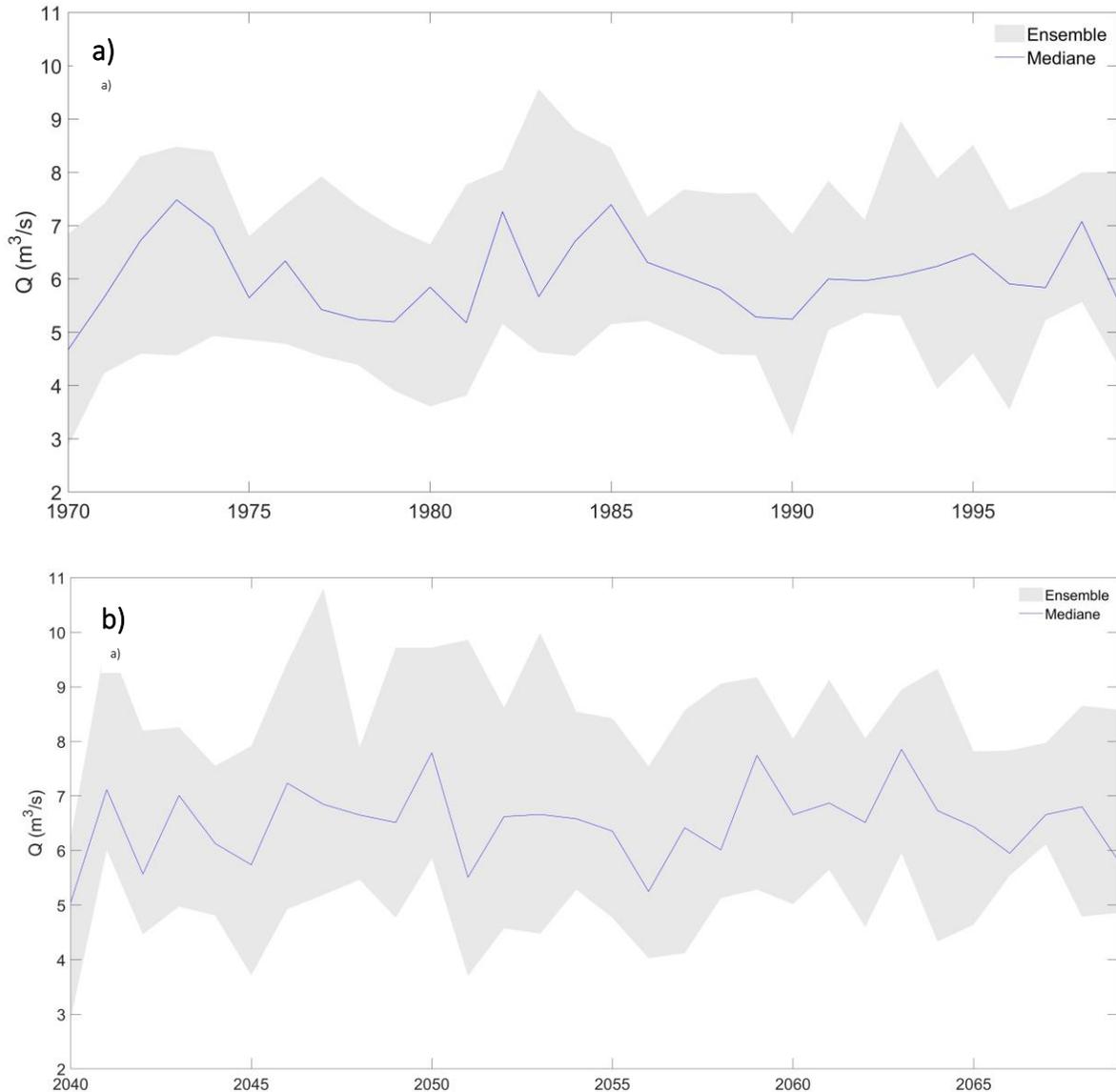
**Figure 21 : a) Hydrogramme simulé à la station Saint-Germain-DEH sur la période de calibration (2013-2018); b) hydrogramme interannuel moyen sur la même période.**

Le Tableau 10 présente les scores de performance des hydrogrammes simulés aux sites Berry, Brébeuf et Saint-Germain-IRDA sur la période de validation (2021-2022). La performance est exprimée par le critère du KGE ainsi que ces composantes ( $r$ ,  $a$ ,  $m$ , équation 2). Il est possible d'observer une performance très faible pour l'ensemble des sites (KGE presque nul ou inférieur à zéro). Quelques hypothèses permettent d'expliquer ces faibles scores en validation. La première découle du fait que les observations hydrométriques pour les périodes de calage et de validation sont issues de courbes de tarage distinctes. Il est envisageable que la très courte durée des suivis aux sites de validation (Tableau 10) constitue une source d'incertitude notable et qu'elle induise les erreurs de simulations par rapport aux données colligées par la DEH. Il est également possible que le modèle, tel que configuré dans le cadre de ce projet, répartisse de façon inadéquate la distribution de l'eau entre les différents sous-bassins. L'optimisation des paramètres du modèle associés au routage de l'eau dans le réseau de rivières aurait probablement amélioré les scores de performance en validation. L'obtention de faibles scores de performance en validation amenuise la confiance attribuée aux projections du régime hydrique en contexte de changements climatiques présentées subséquentement. Les résultats acceptables obtenus en calibration (Figure 21) nous portent cependant à attribuer une confiance suffisante au modèle calibré pour les fins du présent projet dans la mesure où l'analyse se limite au régime hydrique observé à l'embouchure du bassin, et non sur les tributaires localisés en amont.

**Tableau 10 : Critère de performance KGE et ses composantes ( $r$ ,  $a$ ,  $m$ ) aux sites Berry, Brébeuf et Saint-Germain-IRDA sur la période de calibration (2021-2022).**

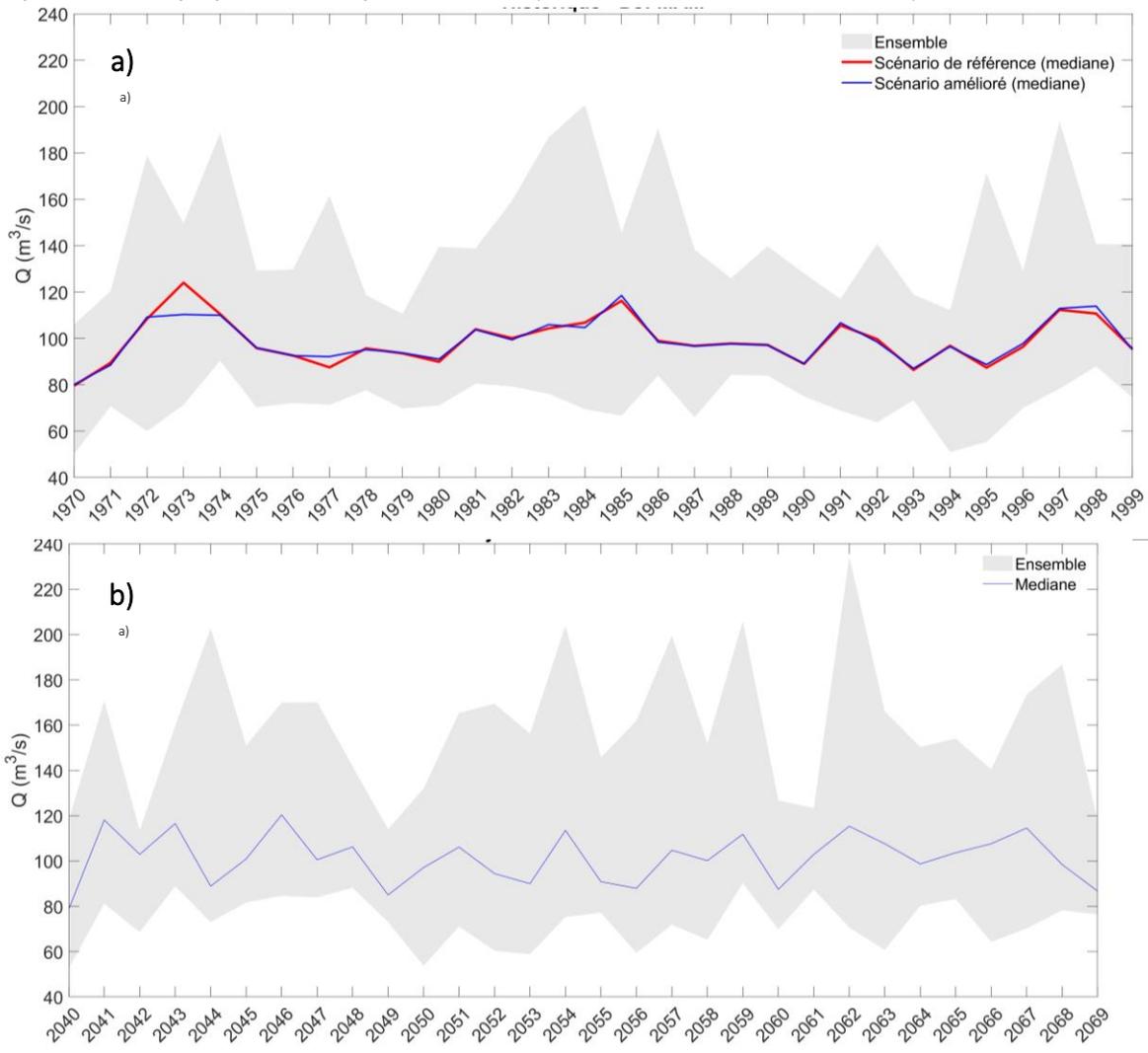
Sites	KGE	$r$	$a$	$m$
Berry (17_BER)	0,045	0,36	0,31	0,81
Brébeuf (17_BRE)	-0,08	0,31	1,7	0,56
Saint-Germain (17_STG)	-0,4	0,37	2,2	0,62

La figure 22 présente l'évolution du débit moyen annuel simulé à l'embouchure du bassin de la rivière Saint-Germain sur la période historique (1970-1999) et la période future (2040-2069). L'enveloppe en gris représente les valeurs minimales et maximales issues de l'ensemble des neuf simulations climatiques NA-CORDEX. La ligne bleue correspond à l'évolution des valeurs médianes issues de l'ensemble pour chaque année. Il est possible de constater que le régime hydrique simulé sur la période historique présente un débit annuel moyen relativement constant sur la période de simulation, variant autour d'une valeur moyenne de  $6,1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Sur la période future, le débit annuel moyen observe une augmentation de l'ordre de 8% (valeur moyenne =  $6,6 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Cette augmentation est vraisemblablement explicable par l'augmentation des précipitations affectant les précipitations totales annuelles sur la période future (Tableau 9). Cette augmentation se produit principalement l'hiver (DJF) et au printemps (MAM), mais aussi de façon moins marquée à l'été (JJA) et à l'automne (SON). Il est également possible d'observer, en climat futur, une occurrence plus fréquente de très fortes valeurs de débit moyen annuel. En effet, la valeur maximale simulée sur la période historique ( $9,5 \text{ m}^3/\text{s}$  en 1983) est atteinte ou dépassée à six reprises sur la période future (2042, 2047, 2049, 2050, 2051 et 2052).



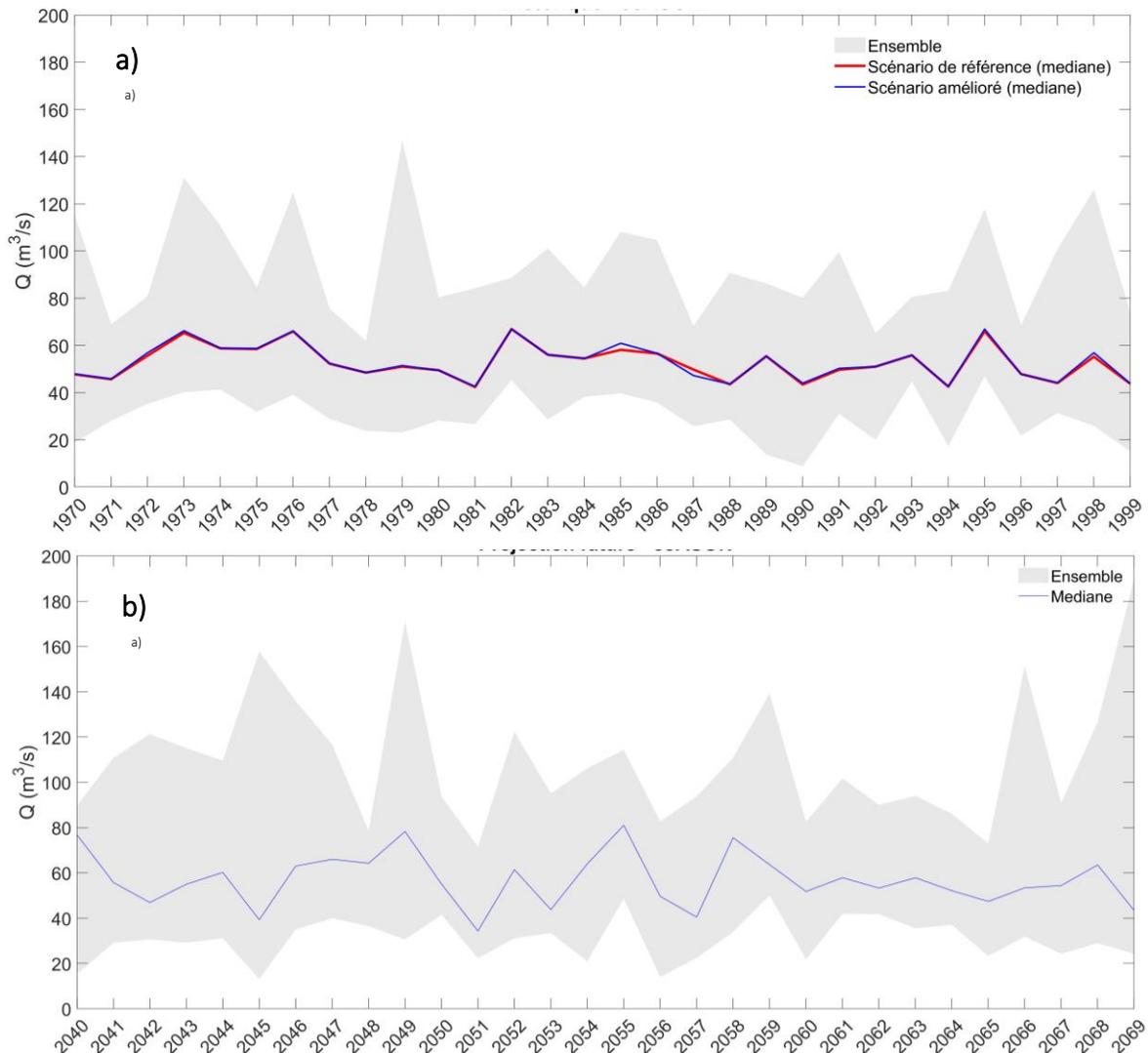
**Figure 22. : a) Évolution du débit moyen annuel à l'embouchure du bassin de la rivière Saint-Germain sur la période historique 1970-1999 et b) sur la période future 2040-2069.**

La figure 23 présente l'évolution du débit maximal annuel pour la période décembre à mai (ampleur des crues d'origine nivale principalement alimentées par la fonte du couvert de neige) simulée à l'embouchure du bassin de la rivière Saint-Germain sur la période historique (1970-1999) et sur la période future (2040-2069). Il est possible de constater que le régime hydrique simulé sur la période historique présente des valeurs de débits maximaux relativement constante sur la période de simulation, variant autour d'une valeur moyenne de 102 m<sup>3</sup>/s. Même si les pratiques de conservation ne sont pas totalement prises en considération dans le scénario testé, les modélisations indiquent qu'une amélioration de la condition physique des sols n'induirait qu'une influence très limitée sur les crues printanières de la rivière Saint-Germain. La valeur moyenne des débits maximaux au printemps (107 m<sup>3</sup>/s) observe une hausse de l'ordre de +5% sur la période future. Cette augmentation est vraisemblablement explicable par l'augmentation combinée des précipitations et températures saisonnières projetées à l'hiver par l'ensemble de simulation climatiques sur la période future (Tableau 9), ce qui induirait le maintien d'un couvert de neige suffisant pour alimenter la crue printanière. Il est important de noter que cette analyse contraste légèrement avec le message typiquement communiqué par la communauté scientifique à ce sujet, indiquant plutôt une absence de consensus sur la direction du changement des crues printanières pour la région à l'étude. Il est également possible d'observer une occurrence plus fréquente de très fortes valeurs de débit maximal printanier. En effet, la valeur maximale simulée sur la période historique (~200 m<sup>3</sup>/s en 1984) est atteinte ou dépassée à cinq reprises sur la période future (2044, 2054, 2057, 2059 et 2062).



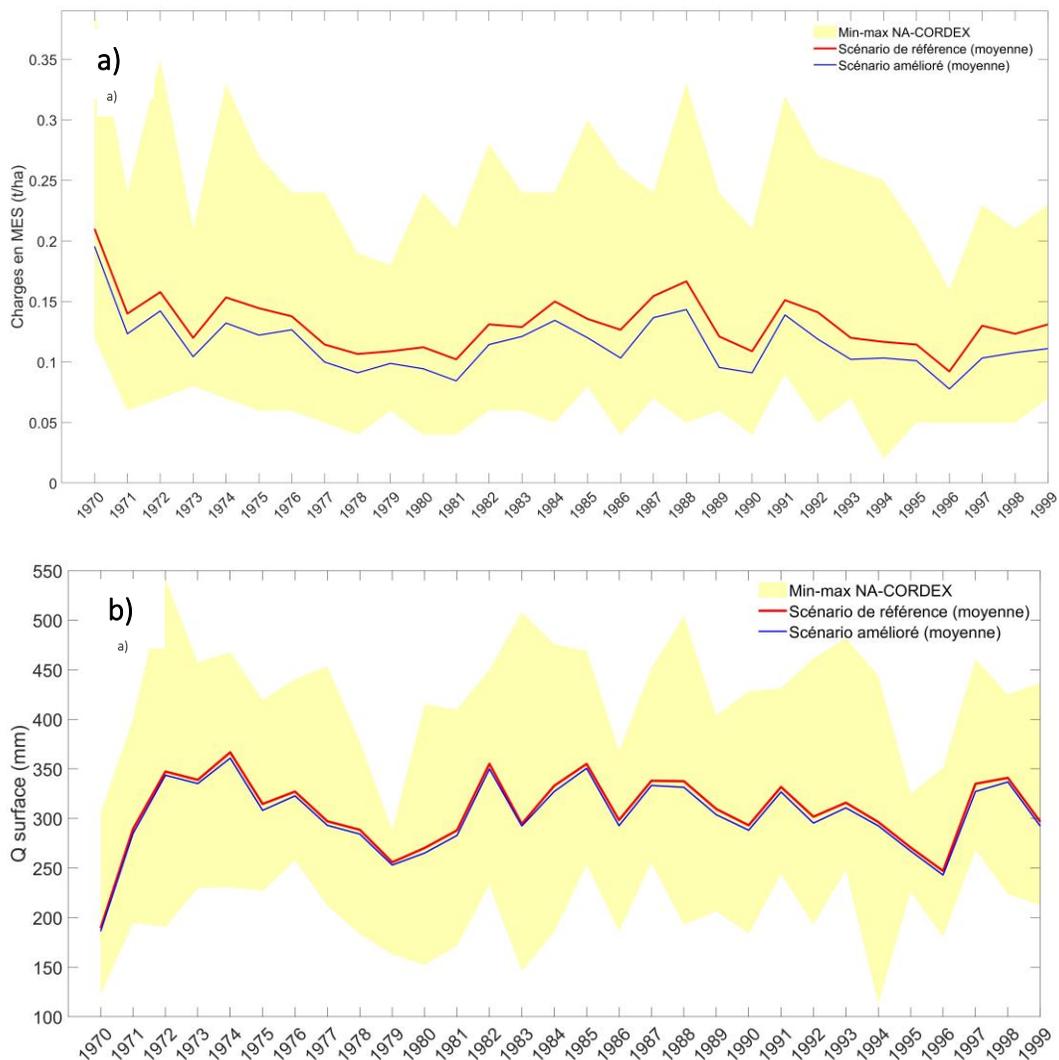
**Figure 23. a) Évolution du débit maximal annuel pour la période décembre à mai (crues d'origine nivale) à l'embouchure du bassin de la rivière Saint-Germain sur la période historique 1970-1999, comparaison entre le scénario de référence et celui des sols améliorés (impact marginal); b) idem sur la période future 2040-2069 (scénario de référence seulement).**

La figure 24 présente l'évolution du débit maximal annuel pour la période juin à novembre (ampleur des crues d'origine pluviale principalement alimentées les précipitations liquides) simulée à l'embouchure du bassin de la rivière Saint-Germain sur la période historique (1970-1999) et la période future (2040-2069). Il est possible de constater que le régime hydrique simulé présente des valeurs de débits maximaux estivaux et automnaux relativement constants sur la période de simulation, variant autour d'une valeur moyenne de 56 m<sup>3</sup>/s. On peut également y constater que le scénario impliquant une amélioration des propriétés physiques des sols n'induit qu'un impact marginal sur l'évolution des débits maximaux. La valeur moyenne sur la période future (62 m<sup>3</sup>/s) observe une hausse de l'ordre de +10% par rapport à la période historique. Cette augmentation est vraisemblablement explicable par l'augmentation des précipitations saisonnières projetée par l'ensemble de simulation climatiques sur la période future (Tableau 9). Il est également possible d'observer l'occurrence plus fréquente de très fortes valeurs des débits maximaux à l'été et à l'automne. En effet, la valeur maximale simulée sur la période historique (~140 m<sup>3</sup>/s en 1984) est atteinte ou dépassée à quatre reprises sur la période future (2045, 2049, 2066 et 2069).



**Figure 24. a) Évolution du débit maximal annuel pour la période juin à novembre (crues d'origine pluviale) à l'embouchure du bassin de la rivière Saint-Germain sur la période historique 1970-1999, comparaison entre le scénario de référence et celui des sols améliorés; b) idem sur la période future 2040-2069 (scénario de référence).**

La figure 25 présente l'évolution des charges annuelles de matières en suspension (MES) simulée à l'embouchure du bassin de la rivière Saint-Germain sur la période historique (1970-1999). Il est possible de constater que les valeurs simulées présentent une évolution relativement constante sur la période de simulation, variant autour d'une valeur moyenne de 0.13 tonnes à l'hectare. Ce taux est plus faible que les charges annuelles mesurées aux trois cours d'eau instrumentés (annexe G), mais demeure du même ordre de grandeur. Il faut considérer qu'il s'agit des charges simulées à l'embouchure du bassin où la pression du secteur agricole est moins intense. Quoique perfectibles, nous jugeons ces résultats suffisamment adéquats pour les fins d'une analyse comparative en contexte de changements climatiques. On peut également y constater que le scénario impliquant une amélioration des propriétés physiques des sols induit un impact notable et systématique sur les charges annuels en MES, c'est-à-dire une baisse de l'ordre de 15% (0.11 tonnes à l'hectare). Cette baisse est vraisemblablement explicable par la réduction du ruissellement de surface (de l'ordre de 5 mm par année à l'échelle du bassin versant, Figure 25 b). Nous souhaitons noter que les projections en climat futur des charges en MES ne sont pas présentées car ces dernières présentent un comportement difficilement explicable, probablement dû une erreur de manipulation du modèle.



**Figure 25. a) Évolution des charges annuelles en MES sur la période historique 1970-1999, comparaison entre le scénario de référence et celui des sols améliorés; b) idem pour l'évolution du ruissellement de surface.**

### **3. Évaluer l'impact des systèmes culturaux sur la réponse hydrologique et la charge en nutriments de la Petite rivière Pot au Beurre en contexte de changements climatiques (objectif 3)**

#### **3.1 Méthodologie**

##### **3.1.1 Modélisation hydrologique**

Le modèle hydrologique SWAT a été mis en place sur le bassin versant de la Petite rivière Pot au Beurre de façon équivalente aux démarches décrites à la section 2.2. Les spécificités sont résumées ci-dessous et plus largement décrites par Ricard et al. (2023).

##### **3.1.2 Modélisation de la fertilisation**

La fertilisation modélisée par SWAT s'intègre dans le calcul des rendements des cultures (avec évaluation des stress nutritifs). Elle constitue un intrant aux différents réservoirs de phosphore et de nitrates du sol en lien avec la simulation des exportations des nutriments vers les plans d'eau. Par manque d'information, les teneurs initiales en phosphore des sols ont été déterminés à partir des valeurs par défaut fournies par SWAT. Ces données sont liées à la saturation du sol et par conséquent aux exportations de phosphore total. Deux années supplémentaires de simulation avant la période de calage (période de chauffe) permettent au modèle d'équilibrer les réservoirs de nutriments entre les apports et les exportations et pallie ainsi en partie le manque de données caractérisant la teneur initiale en P des sols.

Les données des bilans de P de l'année 2016 obtenues auprès du MELCCFP (2021) ont été distribuées spatialement à partir des centroïdes des entreprises agricoles des bassins en utilisant la méthode proposée par Michaud et al. (2022). Les quantités de N organique sont ensuite déterminées à partir du ratio P/N de matière organique propre au type d'élevage prédominant dans le bassin versant. Ces ratios ont été calculés à partir des valeurs de références pour les volumes et les concentrations d'éléments fertilisants dans les effluents d'élevage (CRAAQ, 2020). Les apports en N minéral ont ensuite été appliqués en fonction des besoins des cultures.

##### **3.1.3 Traitement des couches géomatiques**

Le traitement des couches géomatiques (topographie, occupation du territoire pour l'année de référence 2010, pédologie, classes de pentes) sont présentées aux figures 26 à 28. Le Tableau 11 présente les classes de pente et les superficies couvertes par ces dernières sur le bassin.

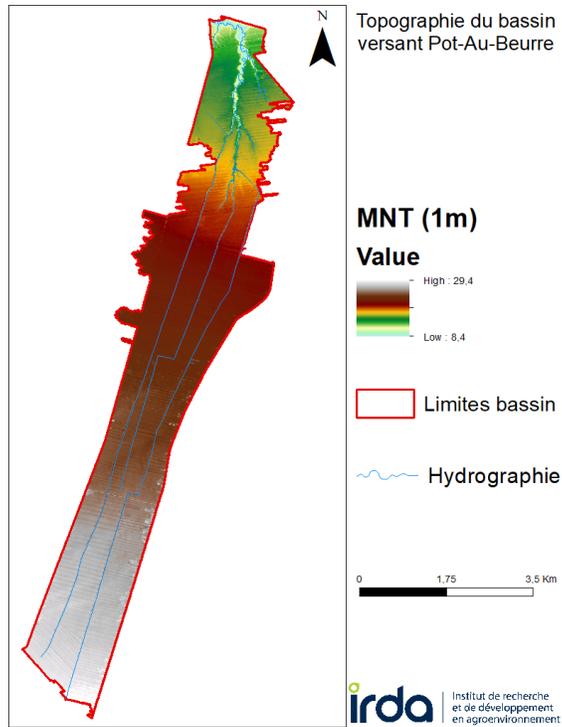


Figure 26 : Topographie du bassin de la Petite rivière Pot au Beurre.

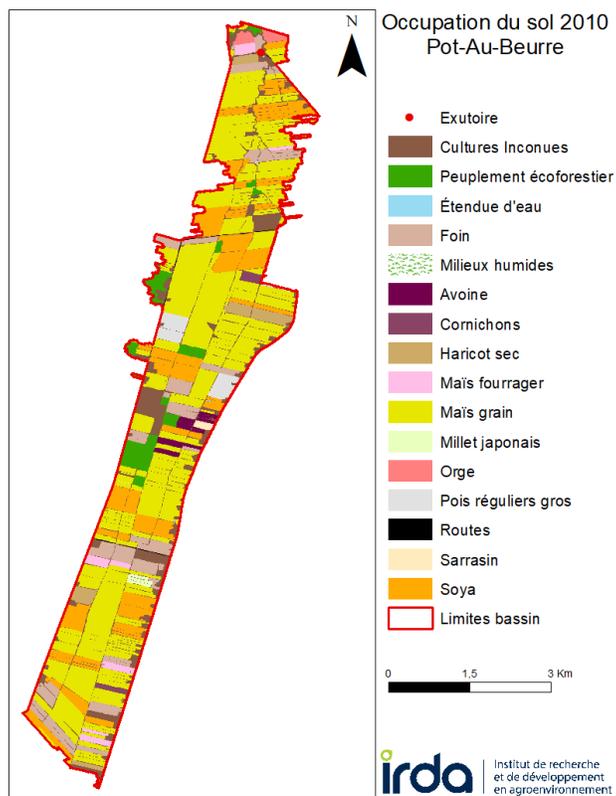


Figure 27: Carte des sols et de l'occupation des sols du bassin de la Petite rivière Pot au Beurre.

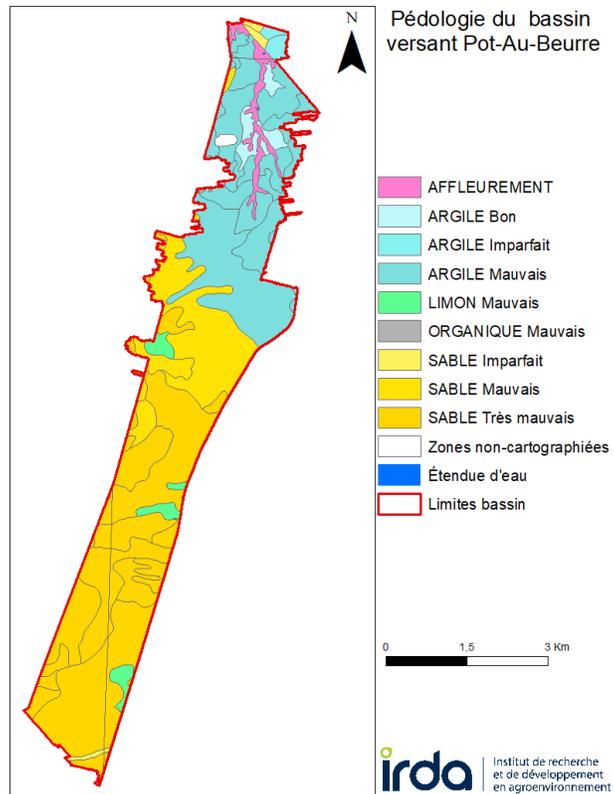


Figure 28. : Carte pédologique du bassin de la Petite rivière Pot au Beurre.

Tableau 11 : Classes de pente et superficies couvertes sur le bassin de la Petite rivière Pot au Beurre.

Pentes (%)	Superficie (ha)
0-3	1518
3-8	631
8-15	44
15 +	52
<b>Total</b>	<b>2245</b>

### 3.1.4 Traitement des données météorologiques

Les données de précipitations simulées par le système CaPA (Lespinas et al. 2015) ont été utilisées en entrée au modèle hydrologique. Ces données sont issues du modèle régional de climat canadien piloté par la réanalyse climatique RDRS v2.0, combinée à une technique d'interpolation optimale. Une réanalyse est un produit de données météorologiques combinant diverses sources de données historiques uniformisées et corrigées. CaPA est disponible de 2000 à 2017 sur une grille de 10 km et sur une base horaire. Les données ont été intégrées sur un pas de temps journalier. Ricard et al. 2023 ont évalué l'adéquation des données CaPA avec des observations disponibles en Montérégie pour des fins de modélisation. L'analyse des biais entre ces deux jeux de données a permis de conclure à une adéquation variable des données CaPA, selon l'année ou la saison pouvant affecter le bilan hydrique simulé par le modèle hydrologique SWAT. Les résultats de la modélisation hydrologique doivent donc être interprétés en tenant compte de ces biais, mais aussi en tenant compte du fait que les processus hydrologiques simulés à partir des données CaPA demeurent néanmoins cohérents.

### 3.1.5 Scénarisation des pratiques agricoles

La scénarisation des pratiques agricoles permet d'attribuer à chaque URH un type de d'opération afin de représenter, aussi fidèlement que possible les bilans hydriques, l'évolution de la biomasse, les pertes de sols et la mobilité des nutriments. Une fois le modèle optimisé et les processus hydrologiques et agronomiques validés et raffinés aux conditions de chaque bassin, des scénarios alternatifs peuvent être simulés et comparés au scénario de référence. En concertation avec différents intervenants, un scénario de référence a été bâti pour représenter au mieux les pratiques agricoles (fertilisation, travail du sol, utilisation du territoire et protection du sol) spécifiques au bassin versant de la Petite rivière Pot au Beurre. Un scénario alternatif a également été produit, décrivant une évolution possible de la proportion du territoire adoptant des pratiques de conservation. Ces deux scénarios (référence et pratiques agricoles améliorées) sont décrits sommairement à l'annexe H et en détail par Ricard et al. (2023). Dans le cadre du présent projet, une consultation a été conduite de valider ces scénarios. Les commentaires recueillis sont présentés à l'annexe H. Ces derniers n'ont cependant pu être valorisés dans le cadre du projet par manque de temps pour les intégrer adéquatement dans le processus de calibration du modèle agro-hydrologique.

Nous souhaitons ici rappeler que dans un processus de scénarisation, la description des pratiques agricoles s'appuie sur la documentation disponible et l'évaluation d'acteurs ayant une connaissance des réalités locales. Il est donc possible que cette description soit plus ou moins représentative des pratiques réellement mis en œuvre par les producteurs à un moment précis. L'analyse des scénarios doit donc être nuancée en tenant compte de ces limitations, mais aussi de la confiance attribuée aux processus simulés par le modèle hydrologique (bilan hydrique, chronologie des événements, etc.).

### 3.1.6 Scénarisation de l'amélioration des conditions physiques des sols

Idem à la Section 2.2.6. L'annexe I présente les scénarios de sols améliorés pour le bassin de la Petite rivière Pot au Beurre. Les séries de sol scénarisées, soit Aston (14%), Joseph (15%) et Kierkoski (29%) occupent 58% de la superficie du bassin.

### 3.1.7 Calibration du modèle hydrologique

La période 2010-2014 a été choisie pour le calage du modèle. Aucune validation sur un jeu de données indépendants n'a été opérée. Les résultats de calibration sont présentés dans Ricard et al. 2023. Ces derniers indiquent une faible performance des débits simulés selon le critère du KGE, principalement découlant d'une surestimation notable du bilan hydrique et de l'ampleur des événements de crue. En contrepartie, la séquence des événements hydrologiques est assez bien reproduite par le modèle ( $r=0,58$ ). Un constat équivalent peut être établi pour les simulations des charges de matières en suspension ( $r=0,9$ ) et phosphore total ( $r=0,9$ ), mais pas pour les charges en nitrates ( $r=0,0$ ).

### 3.1.8 Simulations climatiques

Idem que pour Saint-Germain à la section 2.2.7.

### 3.2 Résultats significatifs obtenus

Les normales climatiques observées à la station 7028200 d'Environnement et Changement climatique Canada (Sorel, températures minimale et maximale, précipitations) ainsi que les projections produites par les simulations climatiques NA-CORDEX sont présentées à l'annexe J. De façon similaire à ce qui a été noté pour le bassin versant Saint-Germain (Section 2.3), il est possible d'observer que les biais évalués à l'échelle mensuelle pour chacune des simulations climatiques varient entre -7 et 5°C pour la simulation des températures et entre -1 et 2 mm/j pour les précipitations. Les simulations climatiques tendent à surestimer les températures en hiver et à les sous-estimer le reste de l'année. Elles tendent aussi à surestimer les précipitations tout au long de l'année, à l'exception des simulations crx3 et crx5 qui tendent à les sous-estimer plus fréquemment. Les biais résiduels affectant les simulations climatiques post-traitées sont notablement réduits et convergent vers zéro, ce qui confirme que le post-traitement corrige les biais de façon adéquate. Les simulations climatiques projettent un changement assez systématique des températures. L'ampleur de ces changements sont cependant plus marqués à l'hiver et au printemps, par rapport à l'été et à l'automne. Les simulations projettent également une augmentation des précipitations, cette dernière étant plus marquée en hiver.

Le Tableau 12 présente l'estimation des composantes du bilan hydrologique simulées sur une base annuelle sur les périodes historique (1970-1999) et future (2040-2069) pour le scénario de référence. Les valeurs de changements relatifs, exprimées en pourcentage, entre les périodes de référence et future sont également présentées. Il est possible d'observer une augmentation de +9,5% des précipitations totales annuelles, combinée à une réduction de -30,7% des précipitations neigeuses. Ce régime projeté des précipitations se traduit par une augmentation du ruissellement de surface (+6%), de l'écoulement hypodermique (+16,0%) et du drainage (+19,7%). L'évapotranspiration projetée présente également une augmentation de +5,1%.

**Tableau 12 : Changement projeté des composantes du bilan hydrique annuel pour le scénario de référence.**

Composante du bilan hydrologique (mm/a)	Période historique (1970-1999)*	Période futures (2040-2069)	Changement (%)
Précipitation totales	990	1084	+9,5
Précipitations neigeuses	151	104	-30,7
Ruissellement de surface	202,3	214,3	+6,0
Écoulement hypodermique	9,7	11,2	+16,0
Drainage	123,0	147,2	+19,7
Évapotranspiration	460,3	483,6	+5,1

\* Valeur médiane issue des 9 simulations climatiques.

Le Tableau 13 présente les charges annuelles moyennes en MES et en phosphore simulées à l'exutoire du bassin versant de la Petite rivière Pot au Beurre en contexte de changements climatiques. Les charges spécifiques annuelles moyennes simulées sur la période historique sont de 0,30 t/ha à la fois pour les MES et pour le phosphore. Ces valeurs se situent dans un ordre de grandeur aux valeurs diffusées par Patoine (2017). Les charges en phosphore projetées sur la période future observent une augmentation, de +6,7% pour les MES et de +8,8% pour le phosphore.

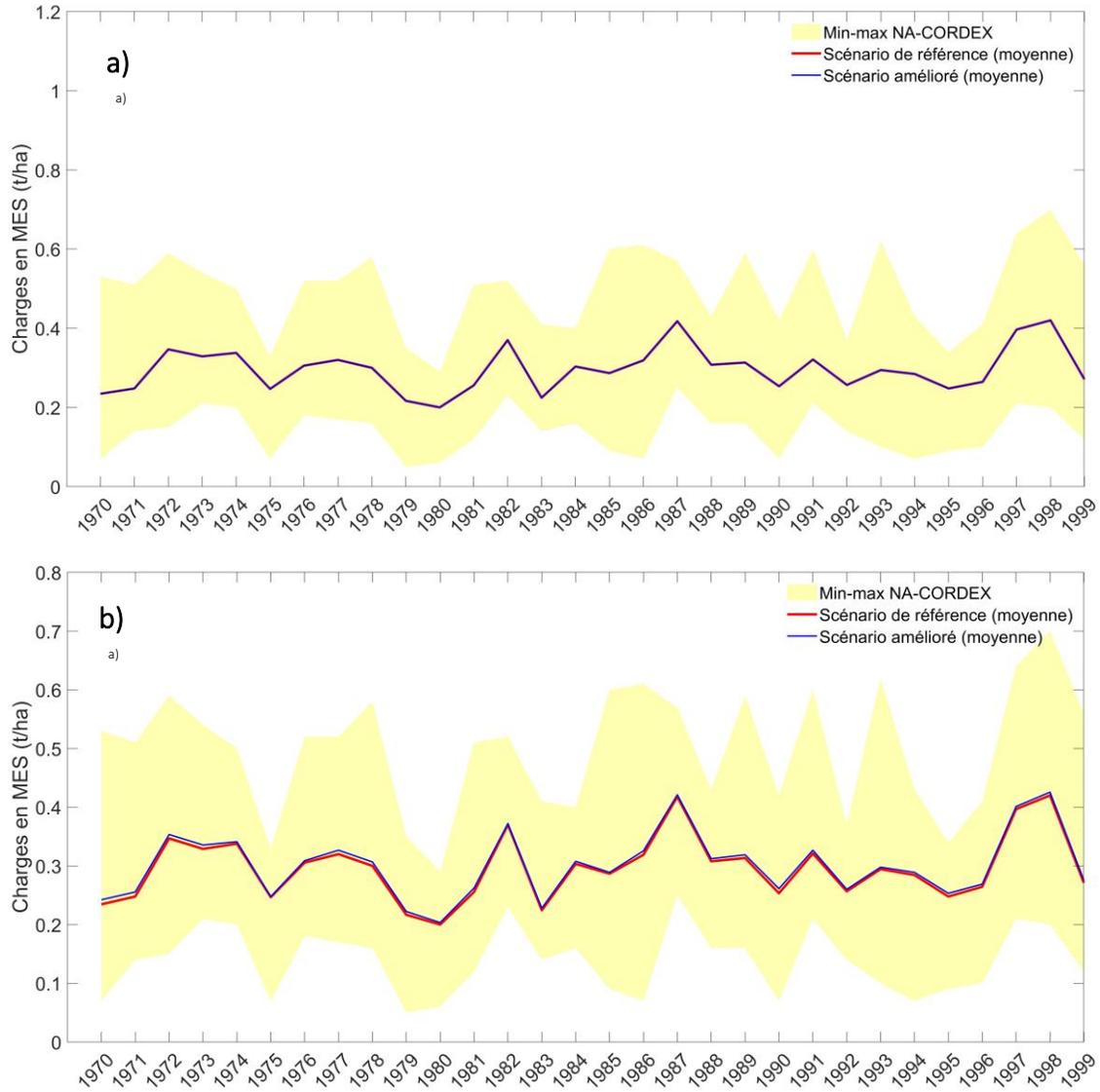
**Tableau 13 : Changement projeté des charges annuelles moyennes (t/ha) en MES et en phosphore.**

Paramètre	Période historique (1970-1999)*	Période futures (2040-2069)	Changement (%)
MES	0,30	0,32	+6,7
Phosphore	0,30	0,33	+8,9

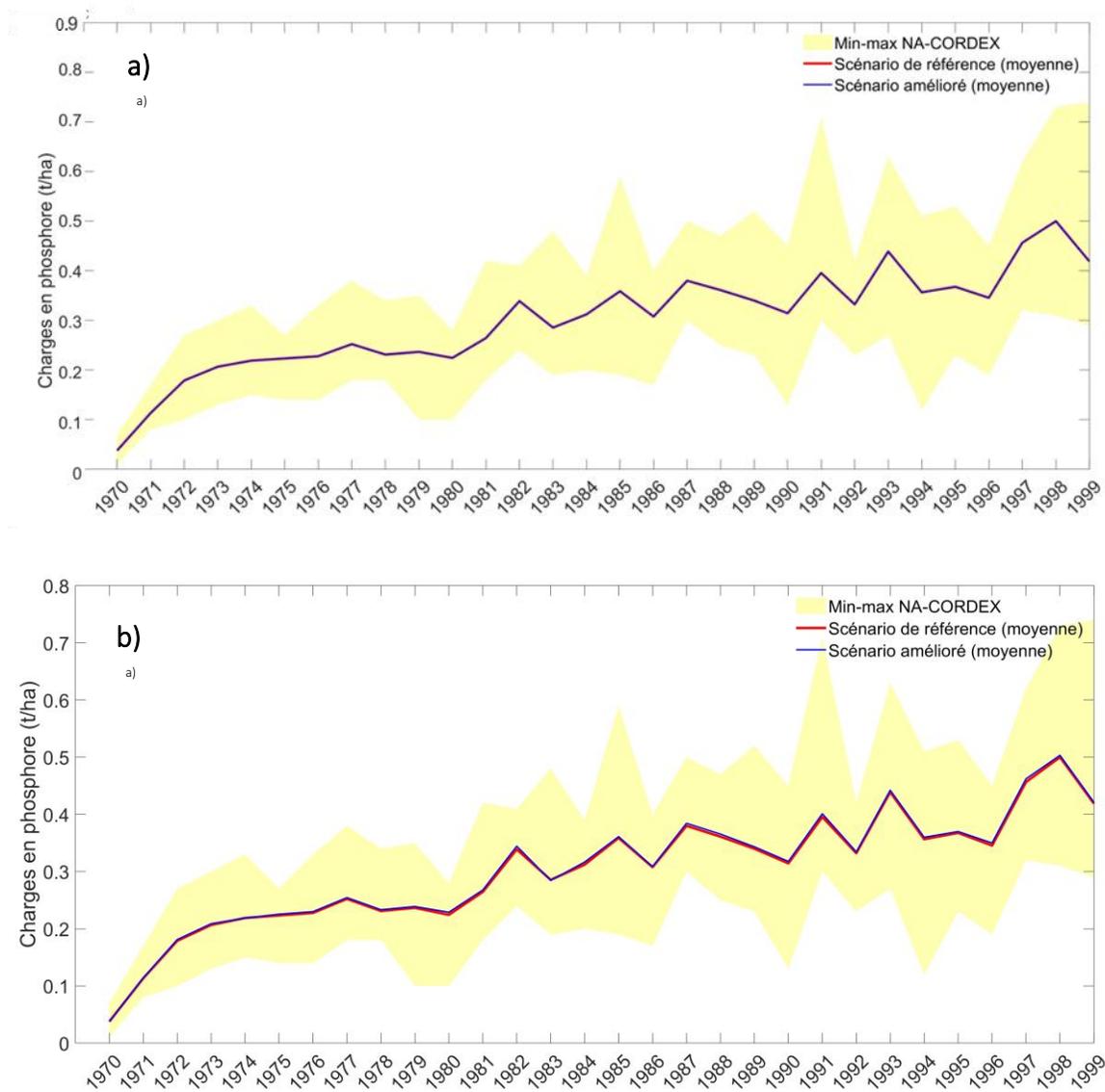
\* Valeur médiane issue des 9 simulations climatiques.

La figure 29a présente l'évolution des charges annuelles de matières en suspension (MES) simulée à l'embouchure du bassin de la Petite rivière Pot au Beurre sur la période historique (1970-1999). Il est possible de constater que les valeurs simulées présentent une évolution relativement constante sur la période de simulation, variant autour de la valeur moyenne de 0.30 tonnes à l'hectare. On peut également y constater que le scénario impliquant une amélioration des pratiques agricoles n'induit qu'un impact marginal sur les charges annuels en MES. Nous jugeons ici que la faible sensibilité de la configuration du modèle agro-hydrologique ne permet pas d'établir une réponse adéquate pour évaluer l'impact des pratiques de conservation sur les charges annuelles en MES. La réponse limitée du scénario amélioré découle donc d'une limitation méthodologique plutôt que d'une incapacité réelle des pratiques de conservation à réduire les charges en MES. La figure 29b présente quant à elle le scénario impliquant une amélioration de la condition physique des sols. Ce dernier n'induit également qu'un impact marginal sur les charges annuels en MES.

La figure 30 présentent l'évolution des charges annuelles en phosphore simulées à l'embouchure du bassin de la Petite rivière Pot au Beurre sur la période de référence (1970-1999). La tendance affectant les valeurs présente une croissance soutenue lors des premières années de simulation, laissant supposer que le bilan de phosphore à l'échelle du bassin n'est pas initialement à l'équilibre. L'analyse des scénarios de pratiques agricoles et de condition physique des sols améliorées conduit à des commentaires similaires que celles soulevées pour les charges en MES (Figure 29). Ce comportement est explicable par le fait que les observations pédologiques décrivant la série Kierkoski (Gasser et al .2023) n'induit aucune modification entre les sols de référence et les sols cultivés pour la masse volumique apparente et la teneur en eau à 10 kPa. Nous rappelons ici que la scénarisation proposée évalue l'impact potentiel d'une amélioration de la condition physique des sols découlant de pratiques de conservation des sols, et non l'impact de ces pratiques elles-mêmes, ces dernières n'ayant pas été explicitement modélisées dans ce scénario. Les changements scénarisés des propriétés physiques pour les séries de sol Aston et Joseph (29% du territoire) n'induisent vraisemblablement qu'une modification marginale de la réponse hydrologique à l'embouchure du bassin.



**Figure 29. : a) Évolution des charges annuelles en MES sur la période historique 1970-1999, comparaison avec le scénario de pratiques agricoles améliorées; b) idem pour le scénario de la condition physique des sols améliorée.**



**Figure 30. : a) Évolution des charges annuelles en phosphore sur la période historique 1970-1999, comparaison avec le scénario de pratiques agricoles améliorées; b) idem pour le scénario de la condition physique des sols améliorée.**

#### **4. Évaluer l'impact des changements climatiques sur les rendements et la rentabilité du maïs-grain et du soya dans le bassin versant de la rivière Pot au Beurre (objectif 4)**

L'IRDA a mandaté le Centre d'études sur les coûts de production en agriculture (CECPA) pour réaliser une étude économique visant à évaluer l'impact des scénarios de changements climatiques sur les rendements et la rentabilité du maïs-grain et du soya dans le bassin versant de la rivière Pot au Beurre. L'analyse intègre l'impact des conditions climatiques sur les rendements et de différentes pratiques agricoles. Elle intègre également ajustement des rendements pour le progrès technologique. Elle évalue finalement pour chaque scénario, les revenus pour les deux cultures ainsi que les charges variables pour trois pratiques culturales : une pratique conventionnelle, une pratique de conservation et le semis direct. Le rapport complet produit par le CECPA est joint à ce rapport.

L'étude s'appuie sur les rendements simulés par le modèle SWAT sur la période historique, auxquels ont été ajoutés un facteur constant de changement déterminé à partir du scénario inférieur défini par l'étude menée par Charbonneau et al. (2014). Ce facteur est de 1,62 pour le maïs et de 1,32 pour le soya. Le choix d'appliquer un facteur de changement issu de la littérature plutôt que d'utiliser directement les projections des rendements simulés dans le cadre de cette étude découle du fait que les rendements simulés en climat futur présentaient des tendances contre-intuitives et difficiles à justifier. Ces données ont conséquemment été exclues de l'analyse. L'application de facteur de changement sur des séries simulées sur la période historique est une pratique courante en modélisation de l'impact des changements climatiques.

L'analyse des résultats indique, toutes choses étant égales par ailleurs, que la culture du maïs-grain selon différents scénarios climatiques permettrait à un cultivateur de la région de dégager une rentabilité positive et ce, particulièrement avec l'adoption de la pratique de semis direct. La rentabilité de la culture du soya serait cependant beaucoup plus faible selon les hypothèses d'analyse posées dans le cadre du présent mandat. Ces conclusions sont à considérer avec retenue et circonspection considérant les limites imposées par méthodologie proposée, principalement la forte variabilité des conditions économiques des marchés agricoles qui n'a pas été prise en compte pour mieux isoler les effets des scénarios climatiques.

## 5. Diffusion des résultats

Suivi hydrométriques présentés aux producteurs, agronomes et UPA. Échanges participatifs visant l'approfondissement et l'analyse des données.	Rencontre en mars 2023. Rencontre en décembre 2023.
Production d'une fiche synthèse des suivis hydrométriques remise aux producteurs en fin de projet.	Janvier 2024.
Résultats de modélisation présentés aux membres du comité de suivi sur le bassin Saint-Germain	Janvier 2024.
Présentation du consortium CentrEau	Printemps 2024.
Affiche scientifique au congrès Colloque sur la Recherche Hydrologique au Québec	Printemps 2024.

## 6. Applications possibles pour l'industrie

Le projet a mis en lumière la pertinence pour certains producteurs de pouvoir observer et analyser les différents suivis hydrométriques au champ. Ces informations permettent une rétroaction constructive sur leurs aménagements hydroagricoles ainsi que sur leurs pratiques de fertilisation et de conservation des sols.

Les résultats présentés dans cette étude (Figure 25) permettent de renforcer l'idée que l'amélioration de la condition physique des sols découlant de la mise en place de pratiques de conservation pourraient agir efficacement comme mécanisme de mitigation de l'impact négatif des changements climatiques sur le ruissellement de surface et la charge en sédiments migrant vers les rivières. Ces conclusions contribuent au développement de l'argumentaire pour encourager l'adoption des pratiques de conservation des sols.

### PERSONNE-RESSOURCE POUR INFORMATION

Simon Ricard, ing., Ph.D.  
Chercheur | Hydrologie  
T. 418 643-2380, poste 691  
F. 418 644-6855  
simon.ricard@irda.qc.ca | www.irda.qc.ca  
Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)  
2700, rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

### REMERCIEMENTS AUX PARTENAIRES FINANCIERS

Nous remercions le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) pour le financement du projet via le Programme d'appui à la lutte contre les changements climatiques en agriculture (PALCCA).

## 7. Références

- Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R., Williams, J.R., Haney, E.B. et 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.
- Canards Illimités Canada, 2021. 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.
- Charbonneau, É., Moreno, J.M., Bélanger, G., Côté, H., Pellerin, D., Bélanger, V. Allard, G. et D. Chaumont, 2014. Première évaluation de l'impact potentiel des changements climatiques sur la durabilité technico-économique et agroenvironnement des fermes laitières au Québec. Ouranos.
- CRAAQ (Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec), 2020. Guide. Valeurs de références pour les volumes et les concentrations d'éléments fertilisants dans les effluents d'élevage. <https://oaq.qc.ca/communications/agro-express/nouveau-guide-valeurs-references-pour-les-volumes-et-les-concentrations-delements-fertilisants-dans-les-effluents-delevage/>
- 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 (Financière agricole du Québec), 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/>.
- Gasser, M.-O., Bossé C., Clément, C.C., Bernard, C., Mathieu, J.-B. et M. E. Tremblay, 2023. Rapport 1 de l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec : État de santé des principales séries de sols cultivées. Rapport final présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ). IRDA. 186 pages.
- GRHQ (Géobase du réseau hydrographique du Québec), 2016. Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles.
- 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, 80-91.
- IRDA (Institut de recherche et de développement en agroenvironnement), 2022. Couverture pédologique de la province du Québec. Seconde version numérique. Couverture complète. Échelle 1:20 000. Produit par AAC, MAPAQ, et IRDA. Distribuée par l'IRDA. Québec, Québec.
- IRDA (Institut de recherche et de développement en agroenvironnement), 2021. Base de Données Hydropédologiques du Québec pour l'horizon de surface des sols agricoles du Québec. Seconde version. Québec.
- Knisel, W.G., 1980. CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. USDA Conservation Research Report. No 26. 643 p.
- 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.
- Leonard, R. A., Knisel, W. G. et D.A. Still, 1987. GLEAMS: Groundwater loading effects on agricultural management systems. *Trans. ASAE* 30 (5), pp 1403-1428.
- Lepinas, F., V. Fortin, G. Roy, P. Rasmussen, et T. Stadnyk, 2015. Performance evaluation of the Canadian Precipitation Analysis (CaPA). *Journal of Hydrometeorology*, no 16, p. 2045-2064.
- Mearns, L.O., et collaborateurs, 2017. The NA-CORDEX dataset, version 1.0. NCAR Climate Data Gateway, Boulder CO, doi:10.5065/D6SJ1JCH.
- MELCCFP (Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs), 2021. Données des déclarations de bilans de phosphore. Base de données contenant les déclarations obligatoires des exploitants de lieux d'élevage et d'épandage en application du Règlement sur les exploitations agricoles. Gouvernement du Québec.
- Michaud, A.R., M. Macrae, Hanck, K et M.A. Niang. 2018a. Managing subsurface drainage water (...). Scientific Report. Quebec-Ontario Cooperation for Agri-Food Research. Project Number 114252. 155p.
- Michaud, A.R., M.-O. Gasser, M.-E Tremblay, A. Blais-Gagnon et W. Huertas. 2018b. Comparaison de la culture annuelle à la culture en fin de saison d'engrais vert de légumineuses pour augmenter la résilience du sol et fournir un apport suffisant de N. Projet Innovation No. 116642. 2016-2019.

Michaud, A.R., W. Huertas, A. Blais-Gagnon et E. Mousseau. 2021. Le contrôle de drainage de précision : pour une meilleure utilisation de l'eau et des nutriments par les cultures et la réduction des pertes dans l'eau de drainage. Rapport final. IRDA et Groupe ProConseil, Programme Innov'Action agroalimentaire, Partenariat Canadien pour l'Agriculture et Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des pêcheries du Québec. 33 pages et annexes.

Michaud, A. R., Sawadogo, M. N, et M. A. Niang, 2022. Développement d'un outil de gestion du bilan de masse du phosphore: application au bassin versant transfrontalier de la rivière de la Roche. Rapport scientifique final. IRDA, OBVBM, Lake Champlain Program. 40 p + annexes.

MFFP (Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs), 2021. Carte écoforestière à jour. Direction des inventaires forestier. Québec. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/carte-ecoforestiere-avec-perturbations>

MRNF (Ministère des Ressources naturelles et des Forêts), 2016. Géobase du réseau hydrographique du Québec. Accessible sur Données Québec.

MRNF (Ministère des Ressources naturelles et des Forêts), 2015. AQRéseau+. Données géospatiales du réseau routier du Québec. Accessible sur Données Québec.

MRNF (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 pages.

Patoine, M., 2017. Charges de phosphore, d'azote et de matières en suspension à l'embouchure des rivières du Québec – 2009 à 2012, Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction générale du suivi de l'état de l'environnement, ISBN 978-2-550-77490-7 (PDF), 25 pages et 11 annexes.

Ricard, S., M.-O. Gasser, E. Chavez, C. Gombault, J. B. Mathieu, N. R. Occéan, A. Blais-Gagnon, W. Huertas, N. M. Sawadogo, F. Umuhire, M. Wu et C. Bossé, 2023. Impacts hydrologiques des systèmes culturaux et de la dégradation des sols. Rapport final. IRDA et partenaires. 148 pages.

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

Themeßl, M. J., Gobiet, A., et A. Leuprecht, 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.

Williams, J.R., Jones, C.A., et P.T. Dyke, 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. ASAE* 27(1), 129-144.

Williams, J.R., Nicks, A.D., et J. G. Arnold, 1985. Simulator for water resources in rural basins. *Journal of Hydraulic Engineering*. 111 (4), 970-986.

Williams, J.R., Chapter 25: The EPIC Model, V.P. Singh (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications, Highlands Ranch, U.S. (1995), 909-1000.

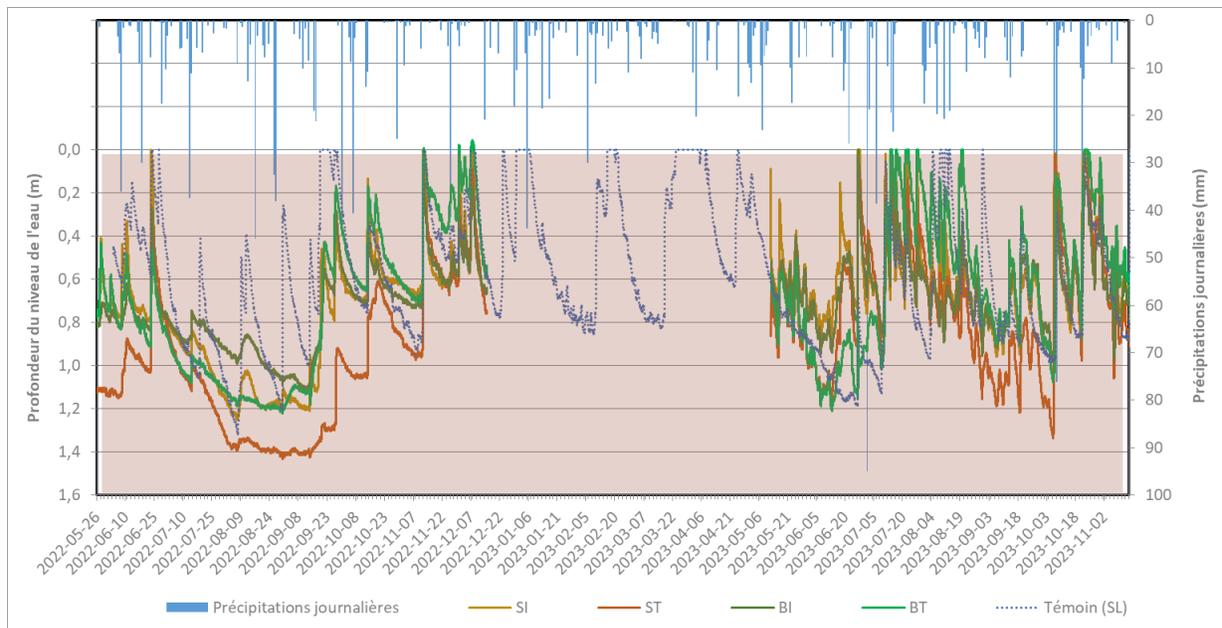
## ANNEXE A – Suivi des hauteurs de nappes moyennes dans les quatre sites du bassin de la Petite rivière Pot au Beurre : rang Sud-Témoin (ST), rang Sud-Intervention (SI), rang Bellevue-Témoin (BT) et rang Bellevue-Intervention (BI).

Les remontées de nappes sont en phase avec les précipitations. Une perte de données due à un manque d'espace mémoire des sondes au début de l'année 2023 explique l'absence des courbes de janvier à avril. La ligne pointillée (*Témoin (SL)*) à cette période a été ajoutée à titre de référence, les données ayant été récoltées dans un champ en grandes cultures de la région.

L'année 2022 offre un portrait plus typique de ce qui est attendu en termes de mouvements de nappe : nappes plus hautes au printemps lors du dégel, baisse des nappes en période estivale avec l'augmentation des besoins en eau des plantes et remontée en automne en post-récolte. La saison 2023, avec sa pluviométrie marquée, offre un portrait tout autre pour la saison estivale alors que les nappes n'ont pratiquement pas le temps de s'abaisser aux drains avant de remonter jusqu'à inonder le profil de sol plusieurs fois en juillet et en août.

Champs du rang Sud: les nappes se tiennent plus basses dans le champ témoin (ST) quand dans le champ intervention (SI), mais les remontées et les descentes sont synchronisées entre les deux champs.

Champs du rang Bellevue : les nappes du champ témoin (BT) descendent davantage et remontent aussi davantage que les nappes du champs intervention (BI), mais les remontées et les descentes sont synchronisées entre les deux champs.



## ANNEXE B – Analyses de laboratoire volet Pot-au-Beurre : masses volumiques apparentes (MVA) et qualité d'eau aux conduites de drains et d'avaloirs.

### MVA Couple Témoin-Intervention du rang Sud :

Rang Sud : Témoin (conservation)

Transect	Point	Profondeur (cm)	MVA (g/cm <sup>3</sup> )	Transect	Point	Profondeur (cm)	MVA (g/cm <sup>3</sup> )	Transect	Point	Profondeur (cm)	MVA (g/cm <sup>3</sup> )
1	1	10	1,33	2	1	10	1,08	3	1	10	1,06
1	1	20	1,44	2	1	20	1,12	3	1	20	1,18
1	1	30	1,56	2	1	30	1,33	3	1	30	0,88
1	1	40	1,63	2	1	40	1,66	3	1	40	1,33
1	1	50	1,56	2	1	50	1,69	3	1	50	1,61
1	1	60	1,60	2	1	60	1,74	3	1	60	1,49
1	2	10	1,19	2	2	10	0,99	3	2	10	1,18
1	2	20	1,34	2	2	20	1,06	3	2	20	1,24
1	2	30	1,32	2	2	30	0,92	3	2	30	1,07
1	2	40	1,39	2	2	40	0,94	3	2	40	0,96
1	2	50	1,57	2	2	50	1,48	3	2	50	1,46
1	2	60	1,52	2	2	60	1,70	3	2	60	1,70
1	3	10	1,36	2	3	10	1,03	3	3	10	1,03
1	3	20	1,41	2	3	20	0,97	3	3	20	1,15
1	3	30	1,39	2	3	30	1,01	3	3	30	1,15
1	3	40	1,59	2	3	40	1,51	3	3	40	0,96
1	3	50	1,60	2	3	50	1,71	3	3	50	1,50
1	3	60	1,50	2	3	60	1,77	3	3	60	1,47
1	4	10	1,21	2	4	10	0,99	3	4	10	1,02
1	4	20	1,42	2	4	20	1,01	3	4	20	1,25
1	4	30	1,31	2	4	30	0,99	3	4	30	1,13
1	4	40	1,60	2	4	40	1,41	3	4	40	1,02
1	4	50	1,55	2	4	50	1,61	3	4	50	0,88
1	4	60	1,54	2	4	60	1,71	3	4	60	-
1	5	10	1,25	2	5	10	0,96	3	5	10	1,04
1	5	20	1,49	2	5	20	1,06	3	5	20	1,11
1	5	30	1,63	2	5	30	1,03	3	5	30	0,94
1	5	40	1,61	2	5	40	1,50	3	5	40	1,32
1	5	50	1,60	2	5	50	1,72	3	5	50	1,64
1	5	60	1,58	2	5	60	1,82	3	5	60	-

Rang Sud : Intervention (conventionnel)

Transect	Point	Profondeur (cm)	MVA (g/cm <sup>3</sup> )	Transect	Point	Profondeur (cm)	MVA (g/cm <sup>3</sup> )	Transect	Point	Profondeur (cm)	MVA (g/cm <sup>3</sup> )
1	1	10	1,23	2	1	10	1,45	3	1	10	1,05
1	1	20	1,44	2	1	20	1,47	3	1	20	1,24
1	1	30	1,44	2	1	30	1,80	3	1	30	1,35
1	1	40	1,48	2	1	40	1,62	3	1	40	1,46
1	1	50	1,47	2	1	50	1,46	3	1	50	1,35
1	1	60	1,37	2	1	60	1,61	3	1	60	1,33
1	2	10	1,47	2	2	10	1,12	3	2	10	1,29
1	2	20	1,48	2	2	20	1,33	3	2	20	1,14
1	2	30	1,49	2	2	30	1,46	3	2	30	1,25
1	2	40	1,65	2	2	40	1,44	3	2	40	1,28
1	2	50	1,55	2	2	50	1,39	3	2	50	1,45
1	2	60	1,52	2	2	60	1,38	3	2	60	1,36
1	3	10	1,31	2	3	10	1,20	3	3	10	1,39
1	3	20	1,31	2	3	20	1,46	3	3	20	1,34
1	3	30	1,33	2	3	30	1,47	3	3	30	1,31
1	3	40	1,49	2	3	40	1,52	3	3	40	1,44
1	3	50	1,43	2	3	50	1,58	3	3	50	1,51
1	3	60	1,42	2	3	60	1,46	3	3	60	1,61
1	4	10	1,38	2	4	10	1,22	3	4	10	1,37
1	4	20	1,51	2	4	20	1,26	3	4	20	1,38
1	4	30	1,50	2	4	30	1,30	3	4	30	1,39
1	4	40	1,62	2	4	40	1,39	3	4	40	1,64
1	4	50	1,55	2	4	50	1,40	3	4	50	1,50
1	4	60	1,51	2	4	60	1,30	3	4	60	1,50
1	5	10	1,35	2	5	10	1,44	3	5	10	1,15
1	5	20	1,43	2	5	20	1,52	3	5	20	1,31
1	5	30	1,48	2	5	30	1,50	3	5	30	1,27
1	5	40	1,43	2	5	40	1,61	3	5	40	1,41
1	5	50	1,52	2	5	50	1,52	3	5	50	1,42
1	5	60	1,35	2	5	60	1,55	3	5	60	1,45

Champ : Sud-Témoins											
Transect	Point	Profondeur (cm)	MVA (g/cm3)	Transect	Point	Profondeur (cm)	MVA (g/cm3)	Transect	Point	Profondeur (cm)	MVA (g/cm3)
1	1	10	1,3	2	1	10	1,1	3	1	10	1,1
1	1	20	1,4	2	1	20	1,1	3	1	20	1,2
1	1	30	1,6	2	1	30	1,3	3	1	30	0,9
1	1	40	1,6	2	1	40	1,7	3	1	40	1,3
1	1	50	1,6	2	1	50	1,7	3	1	50	1,6
1	1	60	1,6	2	1	60	1,7	3	1	60	1,5
1	2	10	1,2	2	2	10	1,0	3	2	10	1,2
1	2	20	1,3	2	2	20	1,1	3	2	20	1,2
1	2	30	1,3	2	2	30	0,9	3	2	30	1,1
1	2	40	1,4	2	2	40	0,9	3	2	40	1,0
1	2	50	1,6	2	2	50	1,5	3	2	50	1,5
1	2	60	1,5	2	2	60	1,7	3	2	60	1,7
1	3	10	1,4	2	3	10	1,0	3	3	10	1,0
1	3	20	1,4	2	3	20	1,0	3	3	20	1,1
1	3	30	1,4	2	3	30	1,0	3	3	30	1,1
1	3	40	1,6	2	3	40	1,5	3	3	40	1,0
1	3	50	1,6	2	3	50	1,7	3	3	50	1,5
1	3	60	1,5	2	3	60	1,8	3	3	60	1,5
1	4	10	1,2	2	4	10	1,0	3	4	10	1,0
1	4	20	1,4	2	4	20	1,0	3	4	20	1,2
1	4	30	1,3	2	4	30	1,0	3	4	30	1,1
1	4	40	1,6	2	4	40	1,4	3	4	40	1,0
1	4	50	1,5	2	4	50	1,6	3	4	50	0,9
1	4	60	1,5	2	4	60	1,7	3	4	60	-
1	5	10	1,3	2	5	10	1,0	3	5	10	1,0
1	5	20	1,5	2	5	20	1,1	3	5	20	1,1
1	5	30	1,6	2	5	30	1,0	3	5	30	0,9
1	5	40	1,6	2	5	40	1,5	3	5	40	1,3
1	5	50	1,6	2	5	50	1,7	3	5	50	1,6
1	5	60	1,6	2	5	60	1,8	3	5	60	-

Champ : Sud-Intervention											
Transect	Point	Profondeur (cm)	MVA (g/cm3)	Transect	Point	Profondeur (cm)	MVA (g/cm3)	Transect	Point	Profondeur (cm)	MVA (g/cm3)
1	1	10	1,2	2	1	10	1,4	3	1	10	1,1
1	1	20	1,4	2	1	20	1,5	3	1	20	1,2
1	1	30	1,4	2	1	30	1,8	3	1	30	1,3
1	1	40	1,5	2	1	40	1,6	3	1	40	1,5
1	1	50	1,5	2	1	50	1,5	3	1	50	1,3
1	1	60	1,4	2	1	60	1,6	3	1	60	1,3
1	2	10	1,5	2	2	10	1,1	3	2	10	1,3
1	2	20	1,5	2	2	20	1,3	3	2	20	1,1
1	2	30	1,5	2	2	30	1,5	3	2	30	1,3
1	2	40	1,6	2	2	40	1,4	3	2	40	1,3
1	2	50	1,6	2	2	50	1,4	3	2	50	1,4
1	2	60	1,5	2	2	60	1,4	3	2	60	1,4
1	3	10	1,3	2	3	10	1,2	3	3	10	1,4
1	3	20	1,3	2	3	20	1,5	3	3	20	1,3
1	3	30	1,3	2	3	30	1,5	3	3	30	1,3
1	3	40	1,5	2	3	40	1,5	3	3	40	1,4
1	3	50	1,4	2	3	50	1,6	3	3	50	1,5
1	3	60	1,4	2	3	60	1,5	3	3	60	1,6
1	4	10	1,4	2	4	10	1,2	3	4	10	1,4
1	4	20	1,5	2	4	20	1,3	3	4	20	1,4
1	4	30	1,5	2	4	30	1,3	3	4	30	1,4
1	4	40	1,6	2	4	40	1,4	3	4	40	1,6
1	4	50	1,6	2	4	50	1,4	3	4	50	1,5
1	4	60	1,5	2	4	60	1,3	3	4	60	1,5
1	5	10	1,3	2	5	10	1,4	3	5	10	1,2
1	5	20	1,4	2	5	20	1,5	3	5	20	1,3
1	5	30	1,5	2	5	30	1,5	3	5	30	1,3
1	5	40	1,4	2	5	40	1,6	3	5	40	1,4
1	5	50	1,5	2	5	50	1,5	3	5	50	1,4
1	5	60	1,3	2	5	60	1,6	3	5	60	1,5

## MVA Couple Témoin-Intervention du rang Bellevue :

Rang Bellevue : Témoin (conservation)

Point	Profondeur (cm)	Masse volumique apparente (g/cc)	Macroporosité 100 cm (g/cc)	Conductivité hydraulique saturée (cm/min)	Humidité à saturation (%)	Humidité à 100 cm (%)
1	0-20	1,30	0,223	0,46	0,532	0,309
1	20-50	1,34	0,207	0,31	0,470	0,263
2	0-20	1,38	0,244	0,25	0,495	0,251
2	20-50	1,48	0,234	0,35	0,396	0,162
3	0-20	1,49	0,182	0,09	0,438	0,257
3	20-50	1,53	0,147	0,88	0,387	0,240
4	0-20	1,32	0,249	0,33	0,502	0,253
4	20-50	1,43	0,202	0,30	0,429	0,228
5	0-20	1,40	0,220	0,12	0,469	0,250
5	20-50	1,48	0,195	0,21	0,423	0,228
6	0-20	1,51	0,157	0,05	0,427	0,270
6	20-50	1,51	0,193	0,09	0,404	0,212
7	0-20	1,50	0,123	0,03	0,411	0,287
7	20-50	1,58	0,122	0,10	0,380	0,258
8	0-20	1,42	0,150	0,10	0,459	0,309
8	20-50	1,55	0,112	0,02	0,394	0,282
9	0-20	1,43	0,201	0,12	0,464	0,263
9	20-50	1,55	0,153	0,08	0,393	0,240

Rang Bellevue : Intervention (conventionnel)

Point	Profondeur (cm)	Masse volumique apparente (g/cc)	Macroporosité 100 cm (g/cc)	Conductivité hydraulique saturée (cm/min)	Humidité à saturation (%)	Humidité à 100 cm (%)
1	0-20	1,38	0,217	0,13	0,478	0,261
1	20-50	1,44	0,177	0,10	0,427	0,250
2	0-20	1,39	0,220	0,05	0,470	0,251
2	20-50	1,50	0,159	0,03	0,406	0,248
3	0-20	1,39	0,239	0,22	0,476	0,237
3	20-50	1,59	0,152	0,08	0,396	0,245
4	0-20	1,39	0,241	0,11	0,479	0,238
4	20-50	1,64	0,121	0,01	0,373	0,252
5	0-20	1,45	0,193	0,06	0,443	0,249
5	20-50	1,62	0,077	0,01	0,349	0,272
6	0-20	1,46	0,197	0,03	0,443	0,245
6	20-50	1,42	0,211	0,12	0,444	0,232
7	0-20	1,47	0,169	0,05	0,432	0,263
7	20-50	1,60	0,106	0,01	0,366	0,260
8	0-20	1,45	0,166	0,05	0,431	0,265
8	20-50	1,59	0,117	0,02	0,374	0,257
9	0-20	1,51	0,152	0,01	0,424	0,272
9	20-50	1,62	0,099	0,00	0,358	0,259

Champ: Bellevue-Témoïn						
Point	Profondeur (cm)	Masse volumique apparente (g/cc)	Macroporosité 100 cm (g/cc)	Conductivité hydraulique saturée (cm/min)	Humidité à saturation (%)	Humidité à 100 cm (%)
1	0-20	1,30	0,223	0,46	0,532	0,309
1	20-50	1,34	0,207	0,31	0,470	0,263
2	0-20	1,38	0,244	0,25	0,495	0,251
2	20-50	1,48	0,234	0,35	0,396	0,162
3	0-20	1,49	0,182	0,09	0,438	0,257
3	20-50	1,53	0,147	0,88	0,387	0,240
4	0-20	1,32	0,249	0,33	0,502	0,253
4	20-50	1,43	0,202	0,30	0,429	0,228
5	0-20	1,40	0,220	0,12	0,469	0,250
5	20-50	1,48	0,195	0,21	0,423	0,228
6	0-20	1,51	0,157	0,05	0,427	0,270
6	20-50	1,51	0,193	0,09	0,404	0,212
7	0-20	1,50	0,123	0,03	0,411	0,287
7	20-50	1,58	0,122	0,10	0,380	0,258
8	0-20	1,42	0,150	0,10	0,459	0,309
8	20-50	1,55	0,112	0,02	0,394	0,282
9	0-20	1,43	0,201	0,12	0,464	0,263
9	20-50	1,55	0,153	0,08	0,393	0,240

Champ: Bellevue-Intervention						
Point	Profondeur (cm)	Masse volumique apparente (g/cc)	Macroporosité 100 cm (g/cc)	Conductivité hydraulique saturée (cm/min)	Humidité à saturation (%)	Humidité à 100 cm (%)
1	0-20	1,38	0,217	0,13	0,478	0,261
1	20-50	1,44	0,177	0,10	0,427	0,250
2	0-20	1,39	0,220	0,05	0,470	0,251
2	20-50	1,50	0,159	0,03	0,406	0,248
3	0-20	1,39	0,239	0,22	0,476	0,237
3	20-50	1,59	0,152	0,08	0,396	0,245
4	0-20	1,39	0,241	0,11	0,479	0,238
4	20-50	1,64	0,121	0,01	0,373	0,252
5	0-20	1,45	0,193	0,06	0,443	0,249
5	20-50	1,62	0,077	0,01	0,349	0,272
6	0-20	1,46	0,197	0,03	0,443	0,245
6	20-50	1,42	0,211	0,12	0,444	0,232
7	0-20	1,47	0,169	0,05	0,432	0,263
7	20-50	1,60	0,106	0,01	0,366	0,260
8	0-20	1,45	0,166	0,05	0,431	0,265
8	20-50	1,59	0,117	0,02	0,374	0,257
9	0-20	1,51	0,152	0,01	0,424	0,272
9	20-50	1,62	0,099	0,00	0,358	0,259

Qualité d'eau aux sites du rang Sud :

Site	Date	MES mg/l	N-NH4 mg/l	N-NO3+N-NO2 mg/l	P réactif ug/l	P NaOH+EDTA ug/l	P Per. ug/l	P mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L	Na mg/L	Conductivité uS/cm à 25
SIA	2022-03-18	93	0,133	1,30	32	100	156	0,034	4,93	68,4	35,8	58,4	871
SIA	2022-04-16	3	0,04	4,43	11	20	35	0,01	1,87	43,6	12,2	15,2	386
SIA	2021-11-13	21	0,05	2,35	31	86	56	0,04	2,08	41,8	14,3	23,0	417
SIA	2022-05-03	15	0,01	3,88	446	485	513	0,48	12,3	35,3	15,0	30,1	475
SIA	2022-05-17	120	0,41	0,03	21	85	361	0,04	4,07	71,5	31,1	45,1	747
SIA	2022-09-09	20	0	5,56	142	168	192	152	4,00	71,1	23,6	39,8	695
SIA	2022-09-20	10	0,061	0,37	138	179	229	0,17	5,06	49,7	16,5	41,1	558
SIA	2022-03-18	18	0,027	0,192	86	248	165	0,10	4,35	43,5	14,5	22,7	412
SIA	2022-04-06	12	0,02	3,49	17	16	63	0,02	2,11	55,6	17,5	31,7	547
SIA	2022-05-17	50	0,02	5,63	65	106	180	0,08	2,91	50,8	15,6	21,1	462
SIA	2022-09-20	13	0,02	3,01	13	52	52	0,02	2,37	71,5	23,8	48,5	712
SIA	2023-04-18	13	0	7,74	58	108	109	0,07	4,37	68,4	20,0	29,9	594
SIA	2023-04-25	42	0,05	7,91	65	149	150	0,07	3,54	52,5	14,3	19,2	457
SIA	2023-05-04	0	0,01	5,21	14	26	28	0,02	3,29	90,5	27,7	6,94	636
SID	2021-12-02	20	0	5,81	3	26	36	0	2,34	49,9	17,2	18,4	468
SID	2022-03-18	35	0,18	0,72	41	71	110	0,04	1,57	8,06	2,93	4,20	89
SID	2021-11-13	0	0,02	7,68	44	61	63	0,05	6,34	102	46,4	78,9	1190
SID	2022-05-03	3	0,01	6,58	6	16	33	0,01	2,46	45,6	11,5	21,8	413
SID	2022-05-17	2	0	8,91	15	25	43	18,7	2,89	51,3	13,0	19,1	459
SID	2022-05-18	0	0,030	5,99	5	19	27	0	2,52	45,3	11,7	20,4	421
SID	2022-06-03	0	0,011	5,95	7	25	27	0,01	2,55	45,4	11,6	20,5	420
SID	2022-06-10	0	0,014	5,86	2	20	33	0	2,62	45,9	11,7	20,9	421
SID	2022-06-18	0	0,023	5,89	4	31	393	0	2,57	45,7	11,7	20,6	421
SID	2022-09-09	0	0,012	5,95	10	29	39	0,01	2,99	39,2	8,98	20,5	379
SID	2022-09-20	0	0,013	7,61	8,7	49,4	32,8	0,01	3,45	44,9	10,2	19,3	401
SID	2023-04-18	12	0,02	6,73	10	13	37	0,01	2,43	48,5	13,1	17,3	421
SID	2023-04-25	16	0,03	7,12	8	28	55	0,01	2,59	40,5	10,1	16,9	370
SID	2023-05-04	16	0	6,82	15	36	42	0,01	2,43	48,9	13	19,1	425
SID	2023-07-21	43	0	15,7	20	65,8	93	0,03	3,76	62,0	16,2	18,9	516
STA	2022-03-18	24	1,88	1,03	572	614	752	0,68	10,9	11,0	3,93	11,3	193
STA	2022-03-29	11	0,73	1,04	339	379	440	0,38	9,60	31,6	14	27,9	430
STA	2022-04-16	26	0,59	0,67	356	469	413	0,41	7,19	14,8	6,00	9,55	189
STA	2021-11-13	18	0	8,79	8	16	57	0,01	2,54	66,0	18,7	18,0	531
STA		9	0,26	0,28	75	107	208	0,13	14,2	102	61,7	165	1798
STA	2022-05-17	59	0,08	6,87	388	455	1705	433	15,2	72,5	33,0	94,1	1118
STA	2022-09-20	20	0,137	1,60	591	684	745	0,66	27	57,7	22	44,5	733
STA	2022-12-08	85	0,234	2,18	490	601	751	0,54	23,3	66,1	28,6	52,0	830
STA	2022-03-18	24	1,88	1,03	572	614	752	0,68	10,9	11,0	3,93	11,3	193
STA	2022-03-29	24	0,40	2,25	396	484	531	0,45	12,8	65,4	28,9	67,3	861
STA	2022-04-06	114	0,40	2,44	708	911	1093	0,79	18,9	37,1	12,4	21,9	428
STA	2022-05-17	51	0,08	2,66	475	635	688	0,56	15,9	56,5	21,3	35	609
STA	2022-09-20	53	0,80	1,71	1203	1374	1506	1,42	45,3	58,4	20,6	41,7	728
STA	2022-12-08	63	0,26	1,31	728	928	1007	0,84	24,1	30,5	9,90	12,6	339
STD	2021-12-02	126	0	2,61	21	103	144	0,019	6,70	60,9	26,1	34,5	664
STD	2022-03-18	37	0,26	2,04	250	295	349	0,28	9,75	44,3	21,1	32,5	570
STD	2022-03-29	18	0,07	5,83	135	145	220	0,15	8,16	71,5	37	56,2	918
STD	2021-11-13	7	0	6,29	68	84	91	0,08	3,78	80,2	28,8	43,9	768
STD	2022-05-03	21	0,05	6,11	7	15	90	0,01	8,58	107	49,1	69,6	1197
STD	2022-05-17	570	0,11	6,02	251	531	3082	257	13,8	89,5	40,3	65,7	1072
STD	2022-05-18	51	0,017	4,89	30	69	117	0,03	9,48	106	47,0	70,2	1208
STD	2022-06-03	63	0	5,20	37	94	154	0,04	9,35	106	47,2	70,2	1209
STD	2022-06-10	476	0,024	5,33	88	327	765	0,10	9,58	106	47,2	70,8	1201
STD	2022-06-18	170	0,011	5,19	76	186	343	0,08	9,54	106	47,3	70,6	1200
STD	2022-09-20	319	0,035	2,95	636	982	1301	0,70	38,3	61,6	27,5	39,7	791
STD	2023-04-18	4	0,03	12,7	39	52	62	0,04	9,72	80,6	35,8	46,6	905
STD	2023-04-25	12	0,03	17,1	31	37	83	0,04	10,3	68,7	29,4	31,4	730
STD	2023-05-04	10	0	14,6	29	53	49	0,03	12,7	74,8	33,4	42,5	837
STD	2023-07-21	8	0,31	18,1	310	379	389	0,35	17,9	77,7	31,3	38,1	827

Qualité d'eau aux sites du rang Bellevue :

Site	Date	MES mg/l	N-NH4 mg/l	N-NO3+N-NO2 mg/l	P réactif ug/l	P NaOH+EDTA ug/l	P Per. ug/l	P mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L	Na mg/L	Conductivité uS/cm à 25
BTA	2022-03-18	60	0,43	0,45	12	54	135	0,02	0,42	1,13	0,27	0,45	17
BTA	2022-03-29	0	0,03	0,03	58	68	129	0,08	3,37	5,64	1,81	0,24	51
BTA	2022-04-16	5	0,19	0,37	197	286	245	0,25	7,05	8,59	2,26	0,35	81
BTA	2022-12-08	9	0,083	0,19	460	494	514	0,51	18,3	20,1	4,73	1,01	193
BTA	2022-03-18	60	0,43	0,45	12	54	135	0,02	0,42	1,13	0,27	0,45	17
BTA	2022-03-29	0	0,03	0,03	58	68	129	0,08	3,37	5,64	1,81	0,24	51
BTA	2022-04-06	5	0,19	0,37	197	286	245	0,25	7,05	8,59	2,26	0,35	81
BTA	2022-12-08	9	0,083	0,19	460	494	514	0,51	18,3	20,1	4,73	1,01	193
BTA	2023-04-18	0	0,02	2,38	0	23	19	0,01	2,76	67,1	22,9	7,54	514
BTA	2023-04-25	12	5,31	4,35	212	250	322	0,25	23,6	29,3	6,81	1,01	338
BTA	2023-05-04	17	0,10	0,45	138	180	224	0,18	16,5	43,8	10	1,69	338
BTA	2023-07-21	61	0,04	0,43	374	465	597	0,45	34,5	15,5	3,34	0,64	205
BTA	2023-10-23	3	0,03	0,01	105	129	154	0,14	10,3	15,1	3,30	0,64	126
BTD	2021-12-02	24	0,027	5,95	3	11	26	0	3,26	57,8	19,1	4,25	438
BTD	2022-03-29	22	0,03	7,62	4	13	50	0	3,67	67,7	23,6	6,91	536
BTD	2022-05-03	0	0,01	10,1	3	22	26	0,01	4,28	67,0	22,1	4,99	519
BTD	2022-05-17	7	0,05	6,57	12	28	51	17,2	3,91	70,9	23,6	10,5	570
BTD	2022-05-18	0	0,02	9,50	7	14	37	8,56	4,80	69,2	22,5	5,46	548
BTD	2022-06-10	0	0	9,72	0	62,5	22,5	0,01	4,96	72,2	23,9	5,93	560
BTD	2022-09-14	133	0,023	2,91	19	221	254	0,02	5,87	64,2	19	6,32	480
BTD	2022-09-20	0	0,021	6,45	4,6	78,7	24,7	0,01	4,86	65,5	20,6	5,47	502
BTD	2022-12-08	0	0,049	4,80	0	15	0	0	3,58	87,8	30,7	6,22	669
BTD	2022-03-29	22	0,03	7,62	4	13	50	0	3,67	67,7	23,6	6,91	536
BTD	2023-04-18	11	0,30	0,40	476	553	604	0,57	16,3	23,7	4,83	0,96	206
BTD	2023-04-25	0	0,02	2,27	0	0	39	0,01	2,61	73,0	25,9	5,27	536
BTD	2023-05-04	2	0,01	2,22	0	15	7	0	3,3	67,6	23,2	5,91	511
BTD	2023-07-21	4	0	1,46	0	15,5	12	0	3,77	80,8	26,1	5,74	580
BTD	2023-10-23	20	0,05	0,82	3	44	66	0,01	3,39	83,2	27,9	6,27	603
BIA	2021-12-02	108	0,032	0,51	31	110	149	0,033	8,16	60,7	34,8	13,8	605
BIA	2022-03-29	0	0,05	0,55	51	64	96	0,07	4,92	46,5	15,4	4,19	357
BIA	2022-04-16	3	0,13	0,70	31	60	43	0,04	3,13	41,9	13,8	3,66	324
BIA	2022-05-03	0	0,05	1,79	4	22	44	0,01	2,88	58,5	39,8	20,2	786
BIA	2022-05-17	2	0	0,49	109	175	208	124	6,33	84,2	27,8	8,30	618
BIA	2022-05-18	10	0	0,46	30	46	102	39,6	4,86	104	33,6	12,1	753
BIA	2022-06-10	2	0,015	0,381	81	152	154	0,09	4,67	90,4	27,9	7,4	626
BIA	2022-09-20	0	0,061	5,89	244	284	284	0,27	19,4	64,4	18,9	6,66	536
BIA	2022-12-08	0	0,104	3,69	19	27	14	0,02	4,69	92,3	31,2	7,50	680
BIA	2022-03-29	0	0,05	0,55	51	64	96	0,07	4,92	46,5	15,4	4,19	357
BIA	2022-04-06	3	0,13	0,70	31	60	43	0,04	3,13	41,9	13,8	3,66	324
BIA	2023-04-18	3	0,03	1,19	25	39	59	0,03	2,30	72,2	22,8	6,93	513
BIA	2023-04-25	0	0,05	3,35	21	44	67	0,03	2,48	79,9	25,9	6,19	577
BIA	2023-05-04	2	0,03	1,09	13	41	35	0,02	2,44	90,2	28,8	8,78	628
BIA	2023-07-21	9	0,06	4,33	70	139	135	0,08	5,88	96,8	30,0	8,31	685
BIA	2023-10-23	0	0,01	5,21	14	26	28	0,02	3,29	90,5	27,7	6,94	636
BID	2021-12-02	13	0	17,8	4	19	32	0	5,19	57,9	15,5	3,03	438
BID	2022-03-18	0	0,01	15,3	6	17	31	0,01	4,40	63,4	19,1	3,96	490
BID	2022-04-16	3	0,01	14,9	4	22	16	0,01	4,12	60,9	18,5	3,62	470
BID	2022-05-03	0	0	12,1	5	18	32	0,01	3,66	60,5	19,2	3,69	466
BID	2022-05-17	0	0	10,7	15	32	36	15,4	5,79	49,7	12,3	4,13	382
BID	2022-05-18	0	0	11,1	9	36	44	12,2	5,15	52,2	14,5	3,50	404
BID	2022-06-10	0	0,010	11,0	7,6	41,8	32,5	0,01	5,73	54,2	14,5	3,79	405
BID	2022-09-14	7	0,017	6,95	3,6	56,4	70,1	0,01	6,06	41,3	13	2,14	328
BID	2022-09-20	0	0,018	10,0	4,2	42,1	20,6	0,01	6,78	48	11,8	2,46	360
BID	2022-12-08	0	0,036	10,4	10	24	0	0,01	4,86	62,9	17,7	3,85	473
BID	2023-04-18	2	0,52	6,41	0	16	18	0	4,29	48,3	14,2	3,78	367
BID	2023-04-25	4	1,73	6,29	0	5	36	0,01	5,11	45,0	12,9	3,68	360
BID	2023-05-04	6	0,65	6,06	0	23	25	0	4,3	48,4	14,3	3,9	369
BID	2023-06-14	11	0,06	5,20	3	25,5	8	0,01	4,01	51,4	16,1	3,32	382
BID	2023-07-21	26	0,27	20,8	8	35,4	50	0,01	7,51	75,0	15,8	6,21	539
BID	2023-10-23	1	0,81	19,2	0	0	0	0	6,85	67,2	15,8	4,45	493

**ANNEXE C - Détail des régies de cultures, travail de sol et fertilisation dans les quatre sites du bassin de la Petite rivière Pot au Beurre : rang Sud-Témoin (ST), rang Sud-Intervention (SI), rang Bellevue-Témoin (BT) et rang Bellevue-Intervention (BI).**

**Couple Témoin-Intervention du rang Sud :**

Rang Sud : Témoin (conservation)	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Culture principale	Maïs grain	Soya	Maïs grain	Maïs grain	Soya	Seigle prn	Soya	Maïs grain
Intercalaire : oui (ajouter type si possible) ou non	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	non	oui
Couverture hivernale : oui (ajouter type si possible) ou non	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	avoine-seigle	non	<i>à confirmer à l'automne</i>
Travail de sol : moment et type	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	AUT : aucun travail de sol	PRN : aucun travail	PRN : aucun travail
Fertilisation : moment et quantité	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	Apports : 120 unités de N.	Apports : 80 unités de N.	Apport prévu au semis de 50 unités de N, 40 unités de P et 40 unités de K. Apport prévu en pos-levée de 124 unités de N, 0 unité de P et 0 unité de K.
Rang Sud : Intervention (conventionnel)	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Culture principale	Maïs grain	Maïs grain	Soya	Maïs grain	Maïs grain	Soya	Maïs grain	Maïs grain
Intercalaire : oui (ajouter type si possible) ou non	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	16kg/ha d'un mélange agrocentre Mel inter-9 Trio annuel (60% raygrass+25% trèfle incarnat+15%radis décompacteur (6x25kg). Semé à un stade avancé du maïs (le maïs était à 8 feuilles pliées) semé le 17 juin 22	non
Couverture hivernale : oui (ajouter type si possible) ou non	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	non, intercalaire travaillé au chisel AUT	<i>à confirmer à l'automne</i>
Travail de sol : moment et type	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	PRN : vibro x2 AUT : roulette	PRN : vibro x2 AUT : chisel	AUT : chisel	PRN : vibro AUT : chisel	PRN : vibro AUT : chisel	AUT : PRN : vibro x2
Fertilisation : moment et quantité	Apports : 128 unités de N, 54 unités de P, 20 unités de K.	Apports : 190 unités de N, 56 unités de P, 21 unités de K.	Apports : 18 unités de N, 27 unités de P, 63 unités de K.	Apports : 146 unités de N, 57 unités de P, 21 unités de K.	Apports : 191 unités de N, 57 unités de P, 21 unités de K.	Apports : 14 unités de N, 35 unités de P, 60 unités de K.	Apports prévus : 151 unités de N, 43 unités de P, 0 unité de K.	Apport prévu en pré-semis : 51 unités de N, 0 unité de P et 53 unités de K. Apport prévu au semis : 50 unités de N, 50 unités de P et 0 unité de K. Apport prévu en post-levée : 80 unités de N, 0 unité de P et 0 unité de K. Total pour la culture prévu : 181 unités de N, 50 unités de P et 53 unités de K.

Champ : ST	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Culture principale	Maïs grain	Soya	Maïs grain	Maïs grain	Soya	Seigle prn	Soya	Maïs grain
Intercalaire : oui (ajouter type si possible) ou non	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	non	oui
Couverture hivernale : oui (ajouter type si possible) ou non	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	avoine-seigle	non	omne
Travail de sol : moment et type	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	AUT : aucun travail de sol	PRN : aucun travail	PRN : aucun travail
Fertilisation : moment et quantité	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	Apports : 120 unités de N.	Apports : 80 unités de N.	Apport prévu au semis de 50 unités de N, 40 unités de P et 40 unités de K. Apport prévu en pós-levée de 124 unités de N, 0 unité de P et 0 unité de K.
Champ : SI	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Culture principale	Maïs grain	Maïs grain	Soya	Maïs grain	Maïs grain	Soya	Maïs grain	Maïs grain
Intercalaire : oui (ajouter type si possible) ou non	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	16kg/ha d'un mélange agrocentre Mel inter-9 Trio annuel (60% raygrass+25% trèfle incarnat+15%radis décompacteur (6x25kg). Semé à un stade avancé du maïs (le maïs était à 8 feuilles pliées) semé le 17 juin 22	non
Couverture hivernale : oui (ajouter type si possible) ou non	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	non, intercalaire travaillé au chisel AUT	omne
Travail de sol : moment et type	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	PRN : vibro x2 AUT : roulette	PRN : vibro x2 AUT : chisel	AUT : chisel	PRN : vibro AUT : chisel	PRN : vibro AUT : chisel	AUT : PRN : vibro x2
Fertilisation : moment et quantité	Apports : 128 unités de N, 54 unités de P, 20 unités de K.	Apports : 190 unités de N, 56 unités de P, 21 unités de K.	Apports : 18 unités de N, 27 unités de P, 63 unités de K.	Apports : 146 unités de N, 57 unités de P, 21 unités de K.	Apports : 191 unités de N, 57 unités de P, 21 unités de K.	Apports : 14 unités de N, 35 unités de P, 60 unités de K.	Apports prévus : 151 unités de N, 43 unités de P, 0 unité de K.	Apport prévu en pré-semis : 51 unités de N, 0 unité de P et 53 unités de K. Apport prévu au semis : 50 unités de N, 50 unités de P et 0 unité de K. Apport prévu en post-levée : 80 unités de N, 0 unité de P et 0 unité de K. Total pour la culture prévu : 181 unités de N, 50 unités de P et 53 unités de K.

Couple Témoin-Intervention du rang Bellevue :

Rang Bellevue : Témoin (conservation)	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Culture principale	Soya	Maïs grain	Soya	Blé de printemps	Haricot	Soya	Canola	Blé hiver
Intercalaire : oui (ajouter type si possible) ou non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	
Couverture hivernale : oui (ajouter type si possible) ou non	Non	Non	Non	Blé hiver, pois fourrager, radis, tournesol	Oui	Non	Blé semé à la mi-septembre, après coupe haute (1 pi) du canola (chaume laissé au sol)	Prévue après la récolte
Travail de sol : moment et type	semis direct	semis direct	semis direct	Semis direct Chisel et vibro avant le semis d'engrais vert suivant le blé	Semis direct	Semis direct	Semis direct	Semis direct
Fertilisation : moment et quantité	Aucun	145 kg/ha 10-29-9 263 l/ha 32-0-0	Aucun	315 kg/ha 12-9-17 225 l/ha 28-0-0	7-22-15 150kg/ha	250 kg/ha 0-0-40	260kg/ha 11-9-20avant semis 200kg/ha 16-0-5 rosettes, épandage de P le 10 oct dans le blé	
Rang Bellevue : Intervention (conventionnel)	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Culture principale	Soya	Maïs grain	Maïs grain	Soya	Maïs grain	Maïs grain	Soya avec blé d'automne après la récolte	Blé de printemps- Maïs grain
Intercalaire : oui (ajouter type si possible) ou non	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	non	non
Couverture hivernale : oui (ajouter type si possible) ou non	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	semis de blé d'automne annulé	<i>à confirmer à l'automne</i>
Travail de sol : moment et type	<i>pas d'infos</i>	<i>pas d'infos</i>	PRN : vibro AUT : chisel	PRN : vibro AUT : roulette	AUT : chisel	PRN : vibro AUT : chisel	PRN : vibro AUT : chisel	AUT PRN : vibro x2
Fertilisation : moment et quantité	Apports : 23 unités de N, 34 unités de P, 80 unités de K.	Apports : 190 unités de N, 56 unités de P, 21 unités de K.	Apports : 191 unités de N, 57 unités de P, 21 unités de K.	Apports : 18 unités de N, 27 unités de P, 63 unités de K.	Apports : 191 unités de N, 57 unités de P, 21 unités de K.	Apports : 191 unités de N, 57 unités de P, 21 unités de K.	pas d'apport prévu	<i>Transposition de l'apport prévu dans les champs voisins en maïs grain : Apport (organique) en pré-semis : 59 unités de N, 49 unités de P et 45 unités de K. Apport prévu au semis : 50 unités de N, 50 unités de P et 0 unité de K. Apport prévu en post-levée : 82 unités de N, 0 unité de P et 0 unité de K. Total pour la culture prévu : 191 unités de N, 99 unités de P et 45 unités de K.</i>

Champ : BT	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Culture principale	Soya	Maïs grain	Soya	Blé de printemps	Haricot	Soya	Canola	Blé hiver
Intercalaire : oui (ajouter type si possible) ou non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	
Couverture hivernale : oui (ajouter type si possible) ou non	Non	Non	Non	Blé hiver, pois fourrager, radis, tournesol	Oui	Non	Blé semé à la mi-septembre, après coupe haute (1 pi) du canola (chaume laissé au sol)	Prévue après la récolte
Travail de sol : moment et type	semis direct	semis direct	semis direct	Semis direct Chisel et vibro avant le semis d'engrais vert suivant le blé	Semis direct	Semis direct	Semis direct	Semis direct
Fertilisation : moment et quantité	Aucun	145 kg/ha 10-29-9 263 l/ha 32-0-0	Aucun	315 kg/ha 12-9-17 225 l/ha 28-0-0	7-22-15 150kg/ha	250 kg/ha 0-0-40	260kg/ha 11-9-20avant semis 200kg/ha 16-0-5 rosettes, épandage de P le 10 oct dans le blé	
Champ : BI	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Culture principale	Soya	Maïs grain	Maïs grain	Soya	Maïs grain	Maïs grain	Soya avec blé d'automne après la récolte	Blé de printemps – Maïs grain
Intercalaire : oui (ajouter type si possible) ou non	pas d'infos	pas d'infos	pas d'infos	pas d'infos	pas d'infos	pas d'infos	non	non
Couverture hivernale : oui (ajouter type si possible) ou non	pas d'infos	pas d'infos	pas d'infos	pas d'infos	pas d'infos	pas d'infos	semis de blé d'automne annulé	e
Travail de sol : moment et type	pas d'infos	pas d'infos	PRN : vibro AUT : chisel	PRN : vibro AUT : roulette	AUT : chisel	PRN : vibro AUT : chisel	PRN : vibro AUT : chisel	PRN : vibro x2
Fertilisation : moment et quantité	Apports : 23 unités de N, 34 unités de P, 80 unités de K.	Apports : 190 unités de N, 56 unités de P, 21 unités de K.	Apports : 191 unités de N, 57 unités de P, 21 unités de K.	Apports : 18 unités de N, 27 unités de P, 63 unités de K.	Apports : 191 unités de N, 57 unités de P, 21 unités de K.	Apports : 191 unités de N, 57 unités de P, 21 unités de K.	pas d'apport prévu	Transposition de l'apport prévu dans les champs voisins en maïs grain : Apport (organique) en pré-semis : 59 unités de N, 49 unités de P et 45 unités de K. Apport prévu au semis : 50 unités de N, 50 unités de P et 0 unité de K. Apport prévu en post-levée : 82 unités de N, 0 unité de P et 0 unité de K. Total pour la culture prévu : 191 unités de N, 99 unités de P et 45 unités de K.

## **ANNEXE D – Comptes-rendus des rencontres avec les partenaires locaux (producteurs, agronomes, UPA) portant sur l’analyse du suivi hydrométrique aux champs rang Sud et rang Bellevue**

Mercredi 29 mars 2023 – 14 :00

Rencontre projet Pot-au-Beurre : présentation des résultats préliminaires

Étaient présents : Martin Cournoyer (producteur), Paul Caplette (producteur), Yasmina Larbi-Youcef (UPA), Gabrielle Bibeau (UPA), Karen J-Desmarais (agronome), Claire Grall (agronome), Arianne Blais-Gagnon (IRDA), William Huertas (IRDA), Neysa Mireille Sawadogo (IRDA), Simon Ricard (IRDA)

### 1. Suivis hydrométriques (William Huertas)

- Présentation des résultats préliminaires
- Échanges sur les raisons pouvant expliquer les différences observées entre les champs témoins et interventions (configuration des avaloirs, accumulation de la neige, structure du sol)
- Les résultats restent préliminaires car il y a juste un an de suivi et dans plusieurs équipements ont enregistré perte de données par brise à cause des mulots.
- **Les données sources et les graphiques seront transmis par l’IRDA aux producteurs, agronomes de club et UPA avant la fin du mois d’avril.**

### 2. Compensations aux producteurs

- Les paramètres de compensation proposé par l’IRDA conviennent.
- Le nombre d’échantillonnages effectués par les producteurs est confirmé à 4 sorties en 2022.
- **Simon va confirmer les modalités de facturation avec le service des finances de l’IRDA.**

### 3. Prochaines rencontres

- Les analyses statistiques seront présentées à l’automne 2023.
- Un fiche synthèse personnalisée sera produite par l’IRDA et remise aux producteurs en fin de projet.
- Intérêt manifesté pour donner suite au projet et maintenir les instruments en place.
- **Une rencontre à l’automne sera tenue pour échanger à ce sujet.**

Jeudi 14 décembre 2023 – 10 :00

Rencontre projet Pot-au-Beurre : présentation des résultats

Étaient présents : Martin Cournoyer (producteur), Paul Caplette (producteur), Yasmina Larbi-Youcef (UPA), Karen J-Desmarais (agronome), Arianne Blais-Gagnon (IRDA), William Huertas (IRDA), Simon Ricard (IRDA).

### 1. Tour de table et retour sur la saison

### 2. Suivis hydrométriques aux champs (débits aux conduites, hauteurs de nappe, flux de nutriments (phosphore et azote) et de sédiments) :

- Les pratiques agricoles ne permettent pas à elles seules d’expliquer les comportements inverses entre les champs du rang Sud et ceux du rang Bellevue.
- Plusieurs paramètres viennent impacter les résultats : type et état de santé du sol, chemins de l’eau (nivellement, raies de curage, superficies réellement drainées), design et état de santé de réseau de drainage et des avaloirs, régie de fertilisation ...
- La présentation soulève plus de questions que de réponses : est-ce que les avaloirs sont efficaces à retenir les sédiments, faut-il évacuer rapidement l’eau de surface, est-ce que les pratiques de conservation sont la solution à l’amélioration de la qualité de l’eau, quelle est la part de MES végétales vs minérales dans les valeurs analysées au laboratoire, est-ce que l’aire de drainage utilisée dans les calculs correspond à la réalité ...
- 

### 3. Suites :

- Dépôt du rapport de projet : fin janvier 2024
- Une fiche synthèse personnalisée sera diffusée aux producteurs.



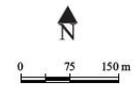


La réforme cadastrale n'a pas encore été réalisée pour cette municipalité ce qui explique qu'un décalage peut se produire entre l'orthophoto et la matrice.

**MRC de Drummond**  
 SCHÉMA D'AMÉNAGEMENT  
 ET DE DÉVELOPPEMENT  
 RÉVISÉ

**Annexe 6**  
 Carte 27  
**Zones inondables  
 de la Rivière Saint-Germain**  
 Wickham

Légende  
 Zone inondable de grand courant (0 - 20 ans)



Sources:  
 MRC de Drummond  
 Orthophotos 2015  
 Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles  
 © Gouvernement du Québec

Réalisation:  
 MRC de Drummond  
 12 avril 2017

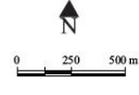


La réforme cadastrale n'a pas encore été réalisée pour cette municipalité ce qui explique qu'un décalage peut se produire entre l'orthophoto et la matrice.

**MRC de Drummond**  
 SCHÉMA D'AMÉNAGEMENT  
 ET DE DÉVELOPPEMENT  
 RÉVISÉ

**Annexe 6**  
 Carte 28  
**Zones inondables  
 de la Rivière Saint-Germain**  
 Wickham  
 Lefebvre

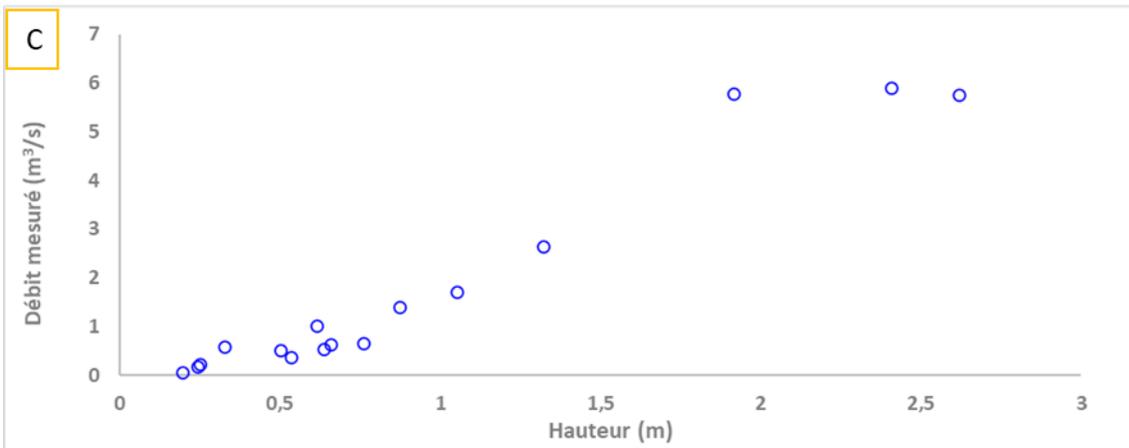
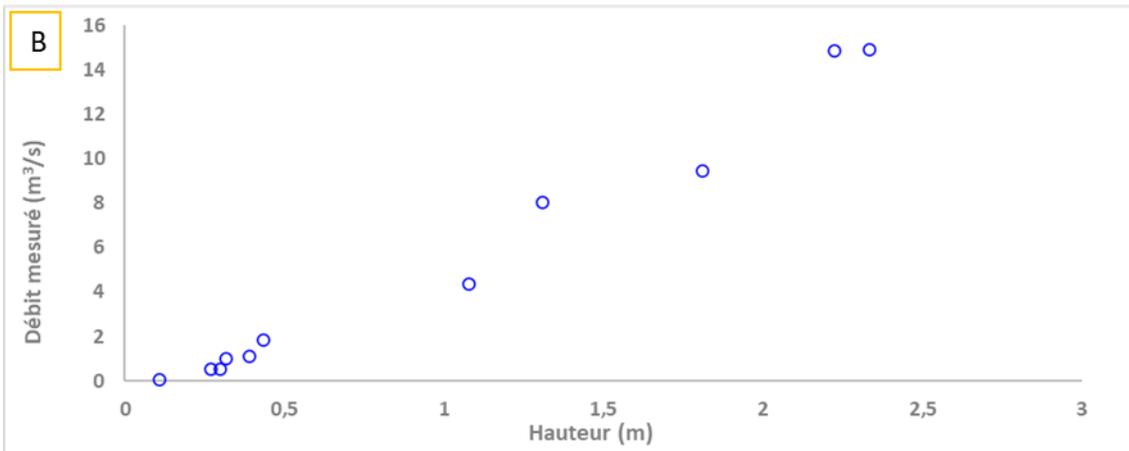
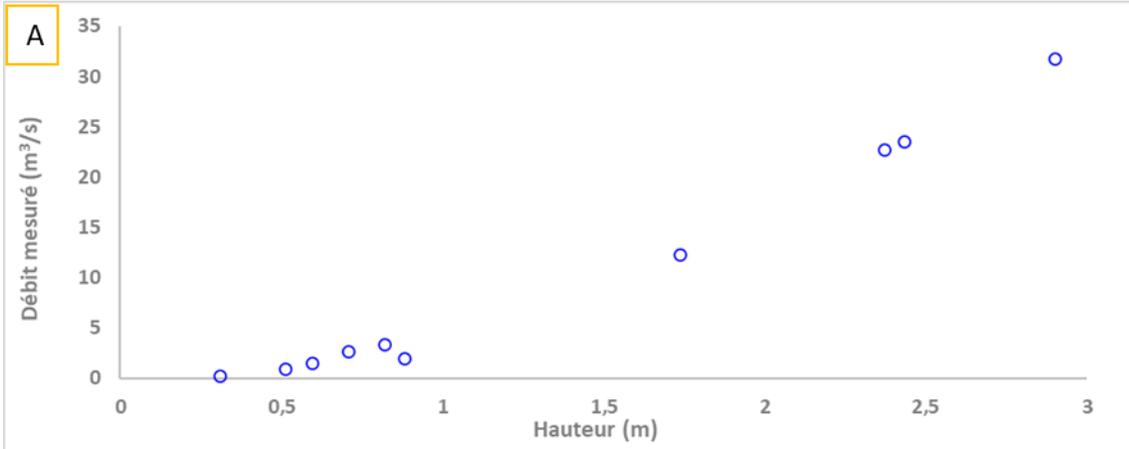
Légende  
 Zone inondable de grand courant (0 - 20 ans)



Sources:  
 MRC de Drummond  
 Orthophotos 2015  
 Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles  
 © Gouvernement du Québec

Réalisation:  
 MRC de Drummond  
 12 avril 2017

**ANNEXE F – Points de tarage aux stations St-Germain (A), Brébeuf (B) et Berry (C).**

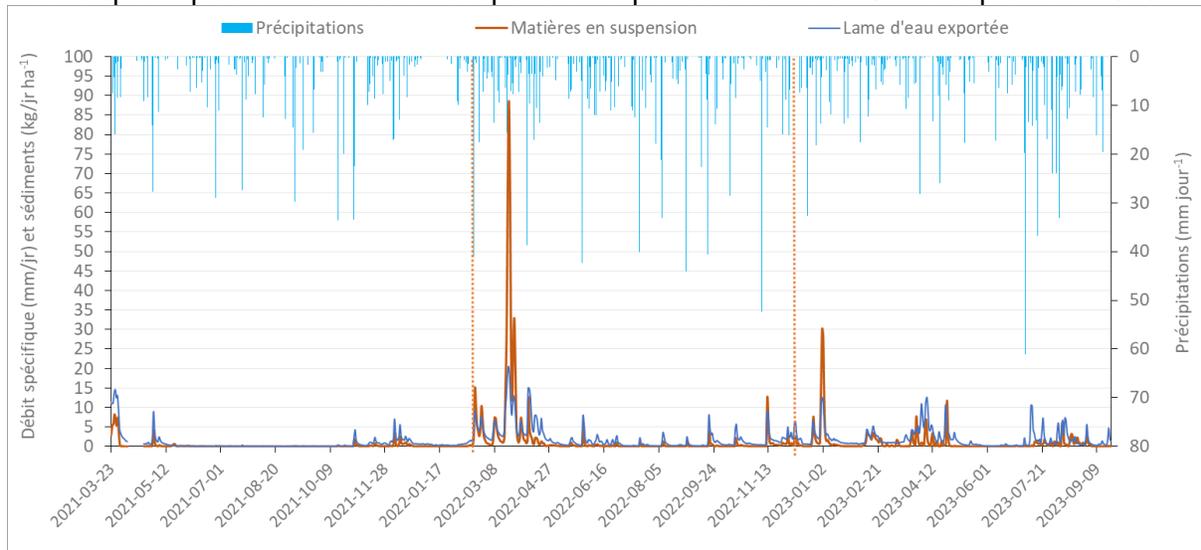


## ANNEXE G – Flux de sédiments et séparation des hydrogrammes aux trois stations.

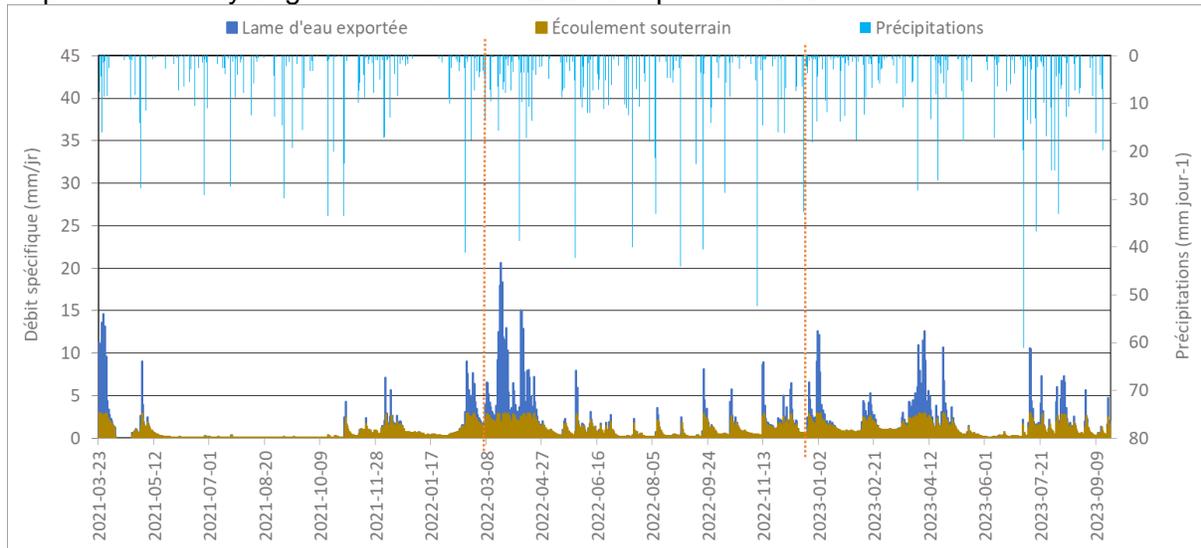
Bassin	Superficie du sous-bassin (ha)	Durée du suivi (jr)	Volume d'eau annualisé (m3)	Hauteur d'eau annualisée (mm/an)	Exportation de sédiments annuelle (T /an)	Exportation de sédiments annuelle spécifique (kg /ha-an)
17_STG	20 614	900	13 154 731	638	8 490	412
17_BER	12 955	900	6 646 502	513	3 613	279
17_BRE	3 579	901	2 845 696	795	2 868	801

Station Saint-Germain (17\_STG) :

### Débits spécifiques et matières en suspension exportées de mars 2021 à septembre 2023

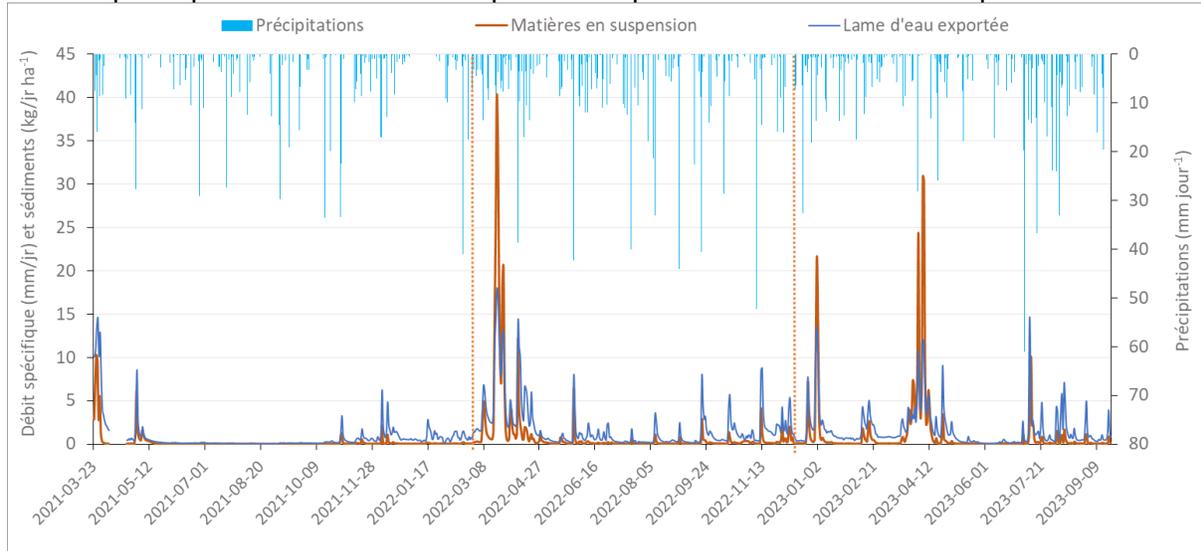


### Séparation des hydrogrammes de mars 2021 à septembre 2023

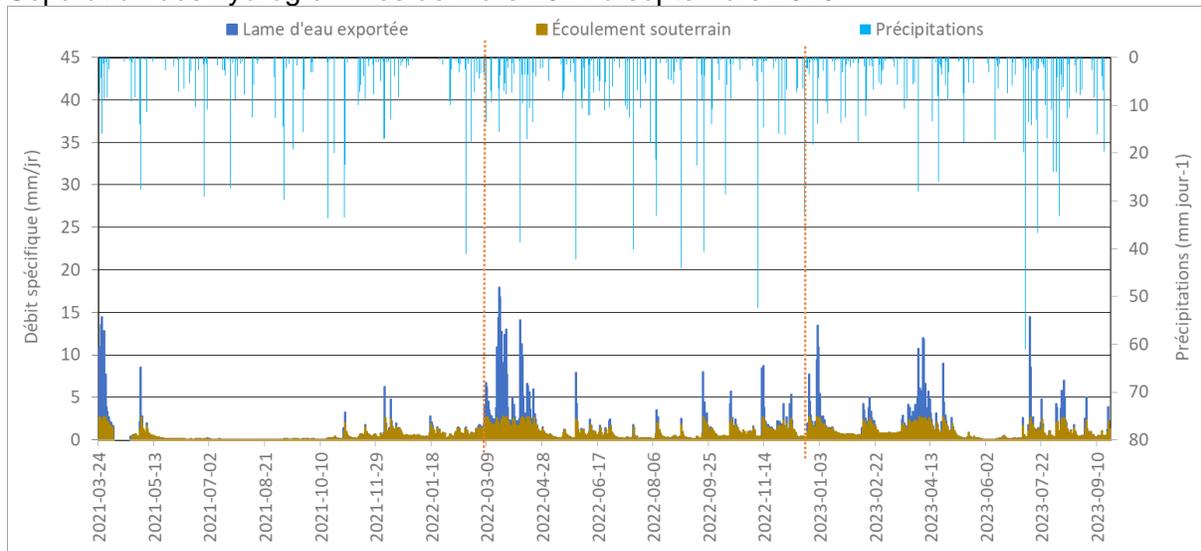


Station Brébeuf (17\_BRE):

Débits spécifiques et matières en suspension exportées de mars 2021 à septembre 2023

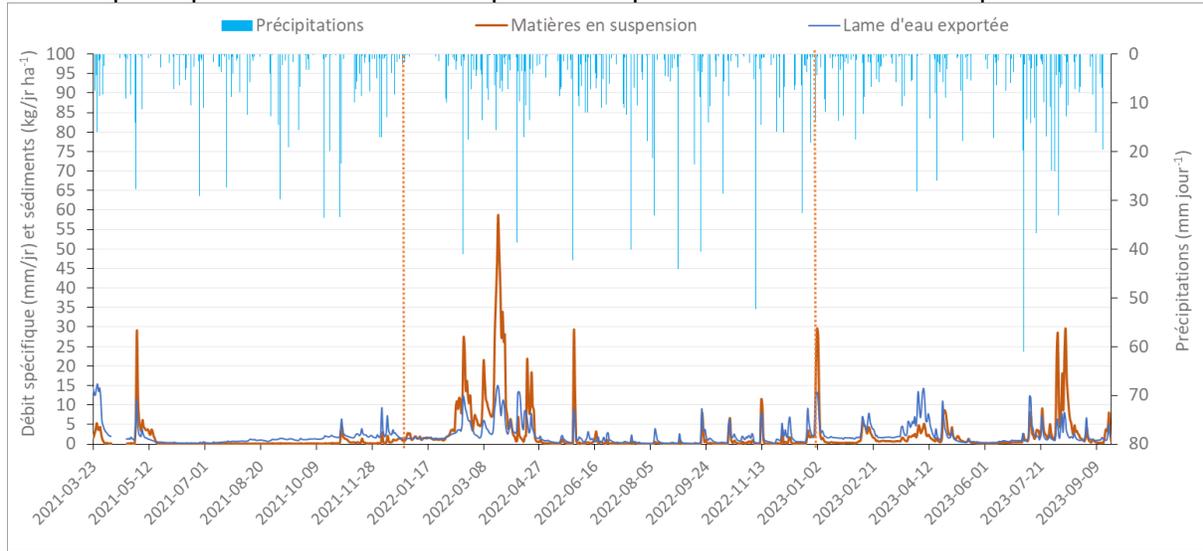


Séparation des hydrogrammes de mars 2021 à septembre 2023

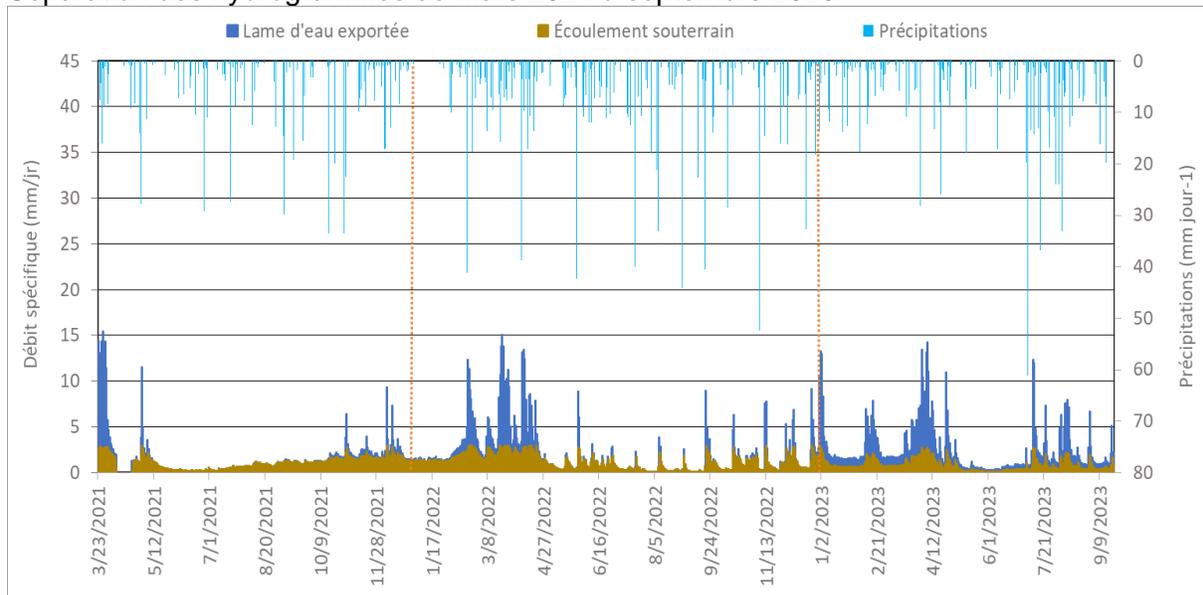


Station Berry (17\_BER) :

Débits spécifiques et matières en suspension exportées de mars 2021 à septembre 2023



Séparation des hydrogrammes de mars 2021 à septembre 2023



## ANNEXE H – Description sommaire de la scénarisation des pratiques agricoles sur le bassin de la Petite rivière Pot au Beurre.

Année d'optimisation Pratiques	2010-2015	
	Pot-au-Beurre	
	Référence	Amélioré
<b>Fertilisation (% agricole)</b>		
Épandage automnale ; Applicable sur les céréales, prairies/pâturage, maïs ensilage. Pas d'épandage sur le soya et le maïs grain.	15%	0%
Enfouie 48h00 ; Culture annuelle maïs, soya, cereales.	51%	
Non enfouie ; Prairies + semi-direct.	19%	
<b>Travail du sol (% semé ou travaillée, prairie exclus - cultures annuelles)</b>		
Travail conventionnel (labour): secondaire printemps (30%) ; primaire automne (95%)	17%	10%
Labour des prairies à l'automne: (% des prairies)	oc.s statique pas de labour	50%
Travail réduit: secondaire printemps (25%); primaire automne (30%)	69%	65%
Conservation: semi-direct; pas de travail de sol (5%) Sur soya et maïs (Sol GrH A,B)	14%	25%
<b>Utilisation du sol (% agricole)</b>		
Cultures annuelles (maïs/soya)	Statique; 2010: 77%	40%
Céréales	Statique; 2010: 2%	15%
Prairies	Statique; 2010: 9%	35%
<b>Protection du sol (% superficie agricole)</b>		
Couverture hivernale ; Céréales automne, prairie, pâturage, autre couverture hivernale	19%	60%
Couverture intercallaire ; sur maïs et soya (trèfle)	5%	40%
Couverture en rive	-	-
Note: % agricole signifie que le % des cultures est calculé sur le % de l'utilisation agricole. Les forêt autres occupations non agricoles ne sont pas considérées dans le calcul du %.		
oc.s = occupation du sol		

Une description détaillée est fournie par Ricard et al. 2023.

Commentaires formulés lors de la consultation pour le scénario de référence :

	Référence	Partenaire 1	Partenaire 2
<b>Fertilisation</b>	% de la zone agricole		
Quel est le pourcentage des producteurs qui épandent à l'automne?	33%	En ce qui concerne les entreprises clientes qui exploitent des superficies dans cette zone de bassin, nous pouvons estimer que 30% de celles-ci n'épandent qu'à l'automne et que 50% de celles-ci épandent moyennement au printemps et à l'automne.	Plusieurs producteurs n'ont pas d'engrais organiques. Il y a souvent épandage après le 1er octobre sur le maïs ensilage ou après le soya, 15% des superficies semble bon.
Quel est le pourcentage des producteurs qui incorporent leur engrais en 48h?	54%	Selon les entreprises comprises sur ce territoire dont nous possédons l'information, nous avançons que 20% d'entre elles pratiquent le non enfouissement des engrais étant donné une régie en semis direct / non travail de sol. À l'inverse, il reste donc une estimation que 60% des entreprises qui épandent à l'automne l'enfouissent ensuite.	Environ 80% est incorporé en 48h (sauf prairies et semis direct)
<b>Travail du sol</b>	% de la zone en cultures annuelles		
Quelles sont les superficies de cultures annuelles en travail conventionnel (labour) ?	17%	De façon très approximative, une estimation de 10% seulement des superficies concernées sont justifiablement labourées.	Ok.
Quelles sont les superficies de cultures annuelles en conservation (semis direct) ?	34%	20% des producteurs pratiquent majoritairement le semis direct ; 10% additionnels en pratiquent en partie.	Ok.
Quelles sont les superficies de cultures annuelles en travail réduit (chisel) ?	69%	D'accord pour la compensation, estimée à 80%.	Ok.
<b>Utilisation du sol</b>	% de la zone agricole		
Quelles sont les superficies agricoles en cultures annuelles (maïs et soya)?	77%	D'accord si selon BDPPAD.	
Quelles sont les superficies agricoles en céréales?	7%	D'accord si selon BDPPAD.	
Quelles sont les superficies agricoles en prairies?	9%	D'accord si selon BDPPAD.	
<b>Protection du sol</b>	% de la zone agricole		
Quelles sont les superficies agricoles où on retrouve des couvertures hivernales?	19%	D'accord si selon BDPPAD.	
Quelles sont les superficies agricoles où on retrouve des couvertures intercalaires?	5%	D'accord si selon BDPPAD.	

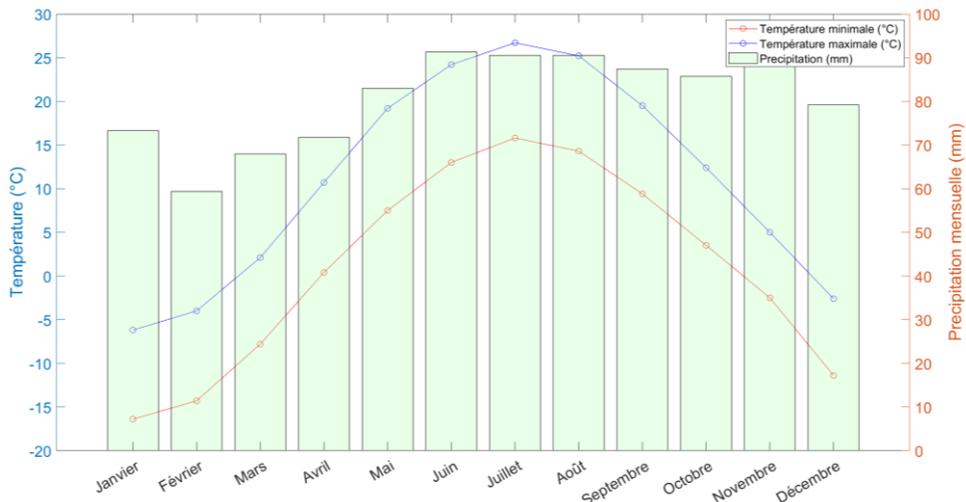
## Commentaires formulés lors de la consultation pour le scénario amélioré:

	Amélioré	Partenaire 1	Partenaire 2
<b>Fertilisation</b>	% de la zone agricole		
Est-ce que les producteurs pourraient diminuer les épandages à l'automne?	10%	En ce qui concerne les entreprises clientes qui exploitent des superficies dans cette zone de bassin, nous aimerions avancer que tous les producteurs qui épandent après le 1er octobre seraient en mesure de le gérer antérieurement. Le pourcentage des producteurs qui épandent à l'automne ne changerait qu'à long terme.	C'est presque impossible, les fosses des producteurs vont déborder. 5% à 10% serait le plus bas.
Est-ce que les producteurs pourraient être plus nombreux à incorporer leur engrais en 48h?	10%	En accord avec la vision pour les entreprises en régie de travail de sol seulement ; le pourcentage resterait le même entre l'actuel et le prévisionnel.	Oui il pourrait y avoir amélioration
<b>Travail du sol</b>	% de la zone en cultures annuelles		
Comment les superficies de cultures annuelles en travail conventionnel (labour) évolueraient ?	10%	Au départ estimé déjà à 10%, nous avançons une pratique du labour terminée (0%) dans un scénario amélioré.	Je crois que souvent seul un changement de propriétaire va faire passer du labour au travail réduit.
Comment les superficies de cultures annuelles en conservation (semis direct) évolueraient ?	20%	La proportion est juste et continueraient d'augmenter.	Plus 20%
Comment les superficies de cultures annuelles en travail réduit (chise) évolueraient ?	60%	La proportion inverse au semis direct évolueraient proportionnellement.	Plus 70%.
<b>Utilisation du sol</b>	% de la zone agricole		
Comment évolueraient les superficies agricoles en cultures annuelles (maïs et soya)?	40%	Nous préférons avancer une majorité de ces cultures annuelles encore en pratique, compte tenu de contextes fonciers et économiques ; le changement amélioré de la régie pourraient déjà constituer une différence.	Pour plusieurs la rotation soya-maïs est la plus rentable, en dessous de 60% c'est irréaliste.
Comment évolueraient les superficies agricoles en céréales?	10%	D'accord avec cette avenue de diversité, en céréales fourragère, de couverture ou pour le grain et la litière.	Idéalement un gain pourrait être fait ici, peut-être 15-20%
Comment évolueraient les superficies agricoles en prairies?	20%	D'accord avec cette avenue de fourrages pérennes à augmentation plus lente, ou au prorata de l'augmentation des superficies en céréales (céréales fourragères par exemple, fourrages annuels).	Il est irréaliste de compter sur une grande augmentation des prairies. Le nombre de fermes laitières diminue et l'expérience du foin pour la vente n'est pas concluante. Je laisserais 10% ou au plus 15%
<b>Protection du sol</b>	% de la zone agricole		
Comment évolueraient les superficies agricoles où on retrouve des couvertures hivernales?	10%	D'accord, et davantage selon les incitatifs et les démonstrations des bénéficiaires avoisinants.	50% serait élevé.
Comment évolueraient les superficies agricoles où on retrouve des couvertures intercalaires?	40%	Plutôt 10% et augmentation graduelle.	30% est plus réaliste.

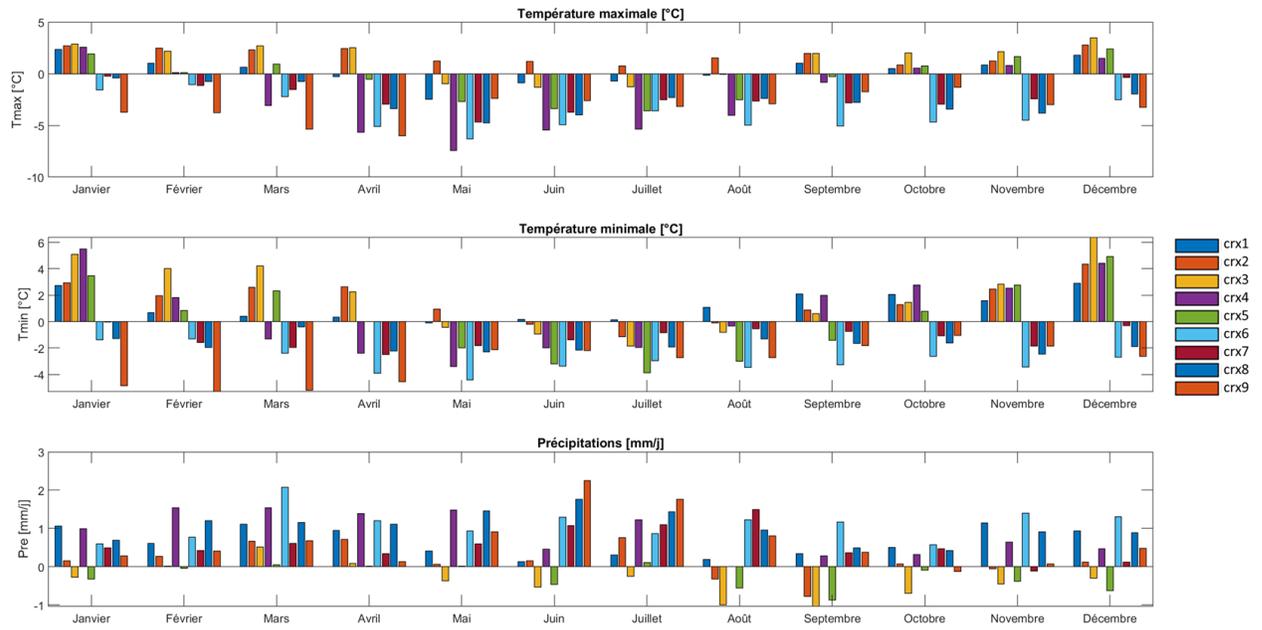
**ANNEXE I – Propriétés physiques entre des sols cultivés et témoin issues des échantillons analysés dans l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec, Petite rivière Pot au Beurre**

<b>Aston (AST - 14,43%)</b>	Cultivé (n=16)	Témoin(n=8)	Amélioration	Horizons	Scénarios
Masses Volumiques Apparentes (MVA, g/cm3)	1,68	1,38	-22%	AP2+B	-0,22%
Conductivité hydraulique (K, cm/h)	0,00176	0,00569	69%	AP2+B	+69%
Teneur en eau à 10 kPa (TE100, -)	13,14	23,22	43%	AP2+B	+23%
<b>Joseph (DFF - 14,53%)</b>	Cultivé (n=16)	Témoin(n=8)	Amélioration	Horizons	Scénarios
Masses Volumiques Apparentes (MVA, g/cm3)	1,57	1,36	-16%	AP2+B	-16%
Conductivité hydraulique (K, cm/h)	0,00000	0,00000	0%	Aucun	0%
Teneur en eau à 10 kPa (TE100, -)	17,40	23,38	26%	AP2+B	+26%
<b>Kierkoski (KRY - 29,32%)</b>	Cultivé (n=16)	Témoin(n=8)	Amélioration	Horizons	Scénarios
Masses Volumiques Apparentes (MVA, g/cm3)	1,53	1,51	-1%	B	0%
Conductivité hydraulique (K, cm/h)	0,00014	0,00029	51%	AP2+B	+51%
Teneur en eau à 10 kPa (TE100, -)	0,00	0,00	0%	Aucun	0%

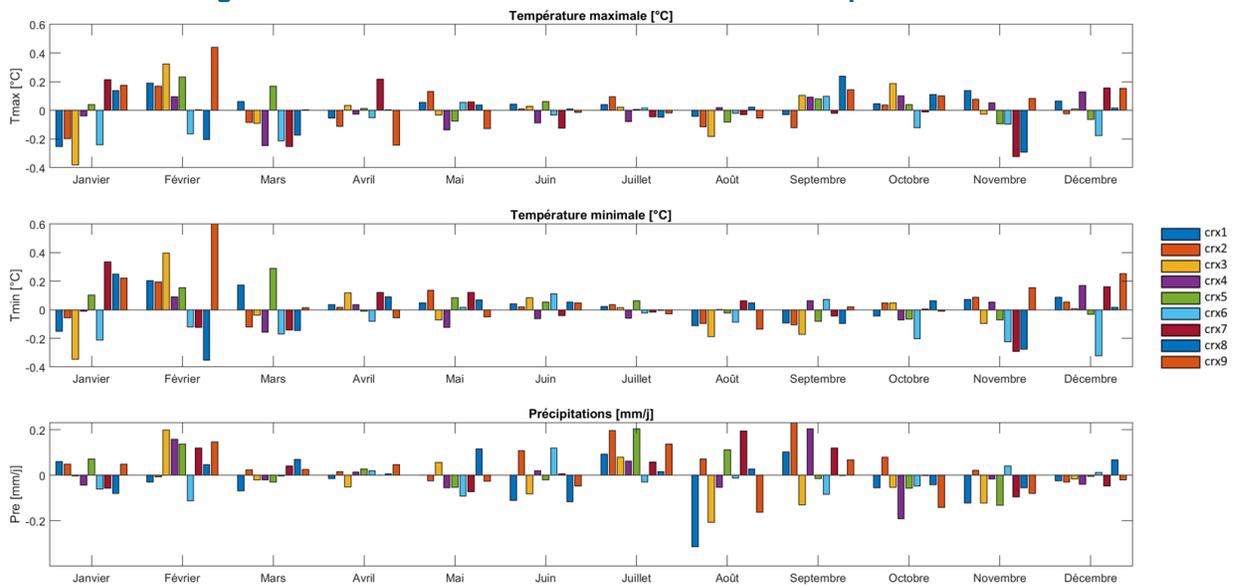
**ANNEXE J – Normales climatiques observées, biais affectant les simulations climatiques et changements projetés pour le bassin versant de la Petite rivière Pot au Beurre**



**Figure H1 : Normales climatiques mensuelles observées à la ECCC-7028200 (Sorel)**



**Figure H2 : Biases mensuels des simulations climatiques brutes.**



**Figure H3 : Biases mensuels des simulations climatiques post-traitées.**

**Tableau H1 : Changements projetés des températures et précipitations sur la période 2040-2069**

ID	Température minimale (°C)				Température maximale (°C)				Précipitations (mm/j)			
	DJF*	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON
<b>crx1</b>	5.2	3.8	3.7	3.6	3.6	3.4	3.9	3.6	0.5	0.2	0.1	-0.1
<b>crx2</b>	6.1	3.6	3.7	3.7	4.0	3.2	3.7	4.1	0.4	0.4	0.5	0.0
<b>crx3</b>	5.4	3.5	3.4	3.4	4.0	2.8	3.2	3.5	0.8	0.6	-0.1	0.1
<b>crx4</b>	2.1	4.7	2.1	0.5	1.4	4.5	2.1	0.1	0.4	0.1	0.3	0.5
<b>crx5</b>	4.7	2.7	2.8	2.2	3.3	2.3	2.5	2.2	0.5	0.2	0.1	0.2
<b>crx6</b>	3.5	2.7	1.9	2.6	2.4	2.1	2.5	2.7	0.3	0.0	0.1	0.2
<b>crx7</b>	4.9	3.8	2.8	3.7	3.9	3.2	3.1	3.7	0.4	0.6	-0.1	0.6
<b>crx8</b>	4.5	2.4	2.6	3.0	2.7	2.1	3.1	3.0	0.2	0.4	-0.1	0.4
<b>crx9</b>	4.8	3.9	2.8	2.7	3.1	3.4	2.4	2.5	0.4	0.4	0.2	0.2

\*DJF pour décembre à février; MAM pour mars à mai; JJA pour juin à août; SON pour septembre à novembre.

**ANNEXE K – Bilans annuels des hauteurs de ruissellement et de drainage**

<b>Champ</b>	<b>Superficie du sous-bassin (ha)</b>	<b>Durée du suivi (jr)</b>	<b>Volume d'eau annualisé (m3)</b>	<b>Hauteur d'eau annualisée (mm/an)</b>
Sud_int_av	4.78	741	257	54
Sud_tem_av	3.24	741	228	70
Sud_int_dr	4.78	741	805	168
Sud_tem_dr	3.24	741	401	124
Bel_int_av	9.61	741	126	13
Bel_tem_av	9.92	741	152	15
Bel_int_dr	9.61	741	145	15
Bel_tem_dr	9.92	741	437	44

**ANNEXE L – Analyse économique**

# Simulations de changements climatiques dans le bassin versant de la rivière Pot-au-Beurre

Projet no. 400243

Analyse économique

Rapport final

21 février 2024

## TABLES DES MATIÈRES

MANDAT.....	3
RÉSERVES ET LIMITES.....	3
ASSURANCE QUALITÉ.....	3
APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE.....	4
Ajustement pour progrès technologique.....	4
Revenus de cultures.....	5
Marges sur charges variables.....	5
ANALYSES ET CONSTATS.....	7
LIMITES.....	11
CONCLUSION.....	11
RÉFÉRENCES.....	12

## LISTES DES FIGURES

Figure 1. Rendements réels ASREC pour le maïs-grain et le soya de la zone du bassin versant de la rivière Pot au Beurre (1995 à 2021).....	4
Figure 2 : Variabilité des rendements de maïs-grain et de soya pour les neuf simulations climatiques.....	7
Figure 3 : Valeurs présentes des marges sur charges variables futures pour le maïs-grain et le soya, pratiques conventionnelle, conservation et semi direct pour neuf simulations climatiques (dollars de 2023).....	8
Figure 4 : Distribution des marges sur charges variables pour la pratique semis direct par simulation climatique pour le maïs-grain et le soya.....	10

## LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1. Spécificités du travail du sol selon les scénarios de pratiques culturales.....	5
Tableau 2. Coûts de semences, de fertilisation, de pesticides, de mise en marché et autres coûts variables.....	6
Tableau 3. Valeurs des regroupements de charges variables selon scénarios de pratiques culturales.....	6
Tableau 4. Résultats des calculs des marges sur charges variables en valeurs actualisées cumulées des neuf simulations climatiques.....	8

## MANDAT

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) réalise le projet « Projection des réponses hydrologiques en réponse à l'amélioration de la condition physique des sols des bassins versants de la Petite rivière Pot au Beurre ». L'objectif est d'évaluer l'impact des scénarios de changements climatiques sur les rendements et la rentabilité du maïs-grain et du soya dans le bassin versant de la rivière Pot au Beurre (rivière Yamaska) en spécifiant :

- les impacts des conditions climatiques sur les rendements;
- les impacts économiques de différentes pratiques.

L'IRDA a sollicité l'appui du Centre d'études sur les coûts de production en agriculture (CECPA) pour la réalisation de l'analyse économique des résultats. Notre mandat consiste donc à :

- l'évaluation des revenus pour chaque scénario climatique pour les deux (2) cultures;
- l'évaluation des charges variables pour chaque scénario et pour trois (3) pratiques culturales (conventionnelle, conservation et semi direct);
- la comparaison des marges sur les charges variables obtenues pour les scénarios et les pratiques de manière sommaire.

## RÉSERVES ET LIMITES

Ce rapport a été préparé à la demande de l'IRDA dans le cadre du projet no. 400243, « Projection des réponses hydrologiques en réponse à l'amélioration de la condition physique des sols des bassins versants de la Petite rivière Pot au Beurre ». Il ne doit ni faire l'objet d'aucune diffusion, ni être utilisé à d'autres fins que celles qui ont été convenues, sans avoir obtenu au préalable la permission écrite du CECPA ou de l'IRDA. Nous n'assumons aucune responsabilité pour des pertes qui pourraient être occasionnées aux parties en cause, à leurs partenaires, à leurs administrateurs, à leurs employés ou à toute autre partie, à la suite de la circulation de la référence ou de l'utilisation de ce rapport. Pour finir, le CECPA se réserve le droit de réviser ses constats et ses conclusions si des informations pertinentes, antérieurement non disponibles ou non fournies, lui étaient communiquées subséquemment.

## ASSURANCE QUALITÉ

Un protocole de vérification interne par tests a été établi afin de valider les processus de compilation. Celui-ci a démontré l'absence d'anomalie significative. Certaines données hors normes ont été détectées et corrigées. Aussi, des observations ont été formulées afin de faciliter l'analyse des données cumulées dans la banque de données.

Le CECPA a également procédé à la validation des résultats obtenus à la suite de la compilation et de l'analyse de la banque de données au moyen de sources d'informations internes et externes. Les références économiques produites par le Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), les enquêtes de prix du CECPA et les données d'indexation de la Financière agricole du Québec ont ainsi été utilisées pour s'assurer d'un degré de confiance suffisant dans les résultats produits. Les références économiques consultées figurent en annexe 2 du présent rapport. Ce second protocole de validation a permis au CECPA de vérifier que les résultats obtenus étaient relativement comparables aux données de référence existantes.

## APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Le CECPA a utilisé les données de rendements pour les neufs (9) scénarios climatiques futurs (2040 à 2069) et historiques (1970 à 1999) de l'IRDA (Ricard *et al.* 2023). Un ajustement des rendements afin de tenir compte des progrès technologiques anticipés a été appliqué sur la base de la tendance des rendements réels du programme ASREC pour la zone concernée, suivant la recommandation du CECPA. L'approche méthodologique consiste, dans un premier temps, à fournir l'évaluation des coûts et des revenus à partir de ces informations. Les marges sur charges variables<sup>1</sup> futures obtenues sont ensuite ramenées en valeurs actualisées de 2023.

### Ajustement pour progrès technologique

Les rendements des cultures sont non seulement influencés par les conditions climatiques mais également par le progrès technologique. Conséquemment, des gains de productivité ont été ajoutés aux simulations de rendements en fonction des scénarios climatiques. Ce gain de productivité correspond au gain annuel moyen observé dans les rendements réels du programme ASREC entre 1995 et 2021 (FADQ, 2021).

Comme le montre la Figure 1, des gains de productivité annuels d'environ 127 kg par hectare pour le maïs-grain et de 16 kg par hectare pour le soya sont observés pour la zone ASREC à l'étude. Conséquemment, les simulations de rendements ont été corrigées par les mêmes taux de gain de productivité pour les deux cultures.

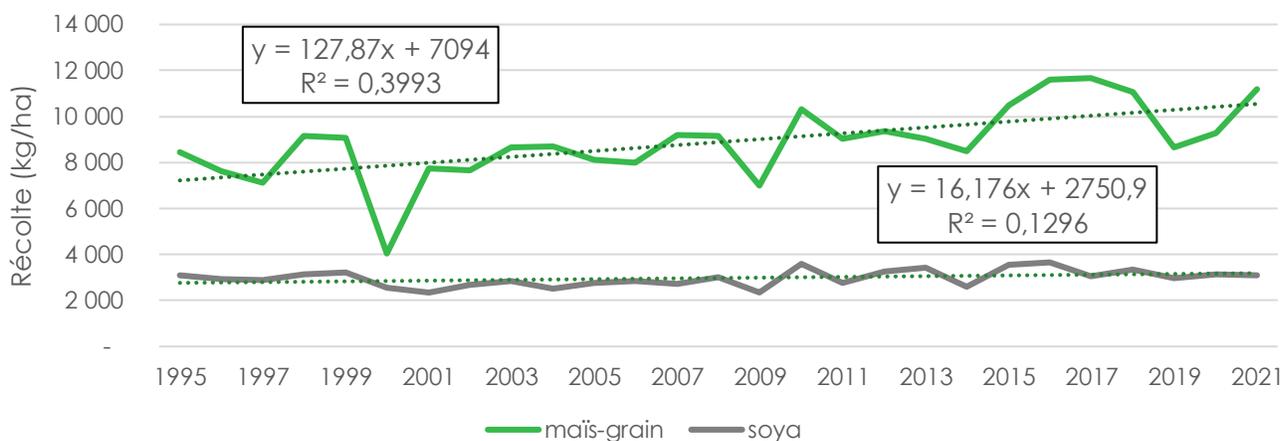


Figure 1. Rendements réels ASREC pour le maïs-grain et le soya de la zone du bassin versant de la rivière Pot au Beurre (1995 à 2021)

<sup>1</sup> Marge sur charges variables = revenus – charges variables

## Revenus de cultures

Les revenus de cultures sont calculés à partir des rendements simulés et de l'extension des prix tirés des projections de long terme du département américain de l'agriculture (USDA) pour l'horizon 2022-2032 (Dohlman et al 2023). Les prix projetés du maïs-grain et du soya pour alimentation animale de 2032 sont projetés de 2040 à 2069. Cette hypothèse implique que les prix nominaux de long terme demeureront stables et qu'une baisse des prix réels sur l'horizon est probable. Cette tendance est en effet conséquente avec l'évolution historique des dernières décennies. Par ailleurs, les prix et autres taux futurs utilisés dans l'analyse n'ont pas été corrigés pour l'inflation future afin de ne pas indûment ajouter de variabilité aux résultats. Les prix retenus pour le maïs-grain et le soya sont de 218,54 \$ et 521,94 \$ par tonne métrique respectivement.

## Marges sur charges variables

L'approche retenue calcule une marge sur charges variables, soit les revenus de cultures auxquels sont soustraits les coûts des intrants, de travail du sol, de la main d'œuvre, de la récolte, etc. Cette approche considère que les charges fixes sont similaires entre les cultures et les pratiques. Conséquemment, l'hypothèse posée soutient que ce type de charges n'influence pas l'écart de rentabilité entre scénarios simulés.

Les marges sur charges variables pour les différents scénarios sont ensuite actualisées et sommées pour les ramener en valeur présente de 2023. Cette approche permet de comparer les flux de trésorerie nets (entrées moins sorties d'argent) associés aux différentes pratiques et scénarios en tenant compte de la valeur temporelle de l'argent. Les marges sont ramenées en valeur par hectare. Le taux d'actualisation utilisé correspond au taux des obligations du Canada à long terme en date du 21 novembre 2023, soit 3,49 % (Banque du Canada, 2023).

Le CECPA a attribué un coût de semences, de fertilisation, de pesticides, de mise en marché et autres coûts variables par hectare pour le maïs-grain (CRAAQ, 2021a) et le soya (CRAAQ, 2021b). De plus, le CECPA a attribué un coût d'opérations culturales effectuées selon la pratique. La source utilisée est le document *Machinerie - coûts d'utilisation et taux à forfait*, réalisé par le CRAAQ (2023). Le taux retenu est le coût à forfait minimum recommandé par hectare puisque ce dernier comprend l'ensemble des frais d'opération (carburant, lubrifiant, entretien et temps de travail). Les spécificités des pratiques ont été fournies par l'IRDA et sont rapportées au tableau suivant.

**Tableau 1. Spécificités du travail du sol selon les scénarios de pratiques culturales**

Pratique	Travail de sol
Conventionnelle	pré-semis: cultivateur; post-récolte : charrue
Conservation	pré-semis: herse à disques; post-récolte : chisel
Semis direct	n/a

Les coûts à l'hectare associés aux intrants et autres charges variables pour les deux cultures à l'étude sont indiqués au Tableau 2. Les charges varient quelque peu selon la culture, plus particulièrement pour les coût de semence et de fertilisation. Dans le cas du maïs-grain, aucune dépense en inoculant n'est considérée.

**Tableau 2. Coûts de semences, de fertilisation, de pesticides, de mise en marché et autres coûts variables**

Poste de dépense		Maïs-grain	Soya
	<i>Unités</i>	<i>\$/ha</i>	<i>\$/ha</i>
Semence		310	178
Fertilisant		396	99
Chaux		24	9
Herbicide		77	55
Inoculant		n/a	14
Mise en marché		149	72
Autres charges variables		68	48
<b>Total</b>		<b>1024</b>	<b>475</b>

Source : CRAAQ (2021a, 2021b)

Le Tableau 3 présente les différents regroupements de charges variables utilisés selon la pratique. Les coûts d'opération sont considérés comme étant les mêmes pour les deux cultures. Ces coûts sont plus faibles pour la pratique de semis direct, à 448 \$ par hectare, étant donné les moindres coûts de préparation du sol.

**Tableau 3. Valeurs des regroupements de charges variables selon scénarios de pratiques culturales**

Équipement		Conventionnel	Conservation	Semis direct
	<i>Unités</i>	<i>\$/ha</i>	<i>\$/ha</i>	<i>\$/ha</i>
Cultivateur		38	-	-
Charrue		183	-	-
Chisel		-	83	-
Herse à disque		-	50	-
Semi-directe		-	-	116
Fertilisant		45	45	45
Semis		80	80	-
Récolte		287	287	287
<b>Total</b>		<b>633</b>	<b>544</b>	<b>448</b>

## ANALYSES ET CONSTATS

Cette section propose quelques constats en lien avec les calculs et analyses effectués. La Figure 2 illustre l'évolution générale des rendements pour le maïs-grain et le soya sur la période à l'étude (2040 à 2069) pour les neuf (9) simulations climatiques. Les rendements moyens pour la période simulée sont de 15,1 tonnes à l'hectare pour le maïs-grain et de 2,1 tonnes à l'hectare pour le soya. Les rendements pour le maïs-grain affichent une augmentation constante pour la période, alors que ceux pour le soya affichent une diminution après 2050. Ceci peut s'expliquer par le fait que les simulations hydrologiques produites en climat futur dans le cadre de cette étude prévoient une tendance baissière de l'eau de rétention, c'est-à-dire la portion de l'eau maintenue dans le sol par adhésion aux pores inférieurs à 10 µm grâce à la tension superficielle de l'eau. Nous posons ici l'hypothèse que les racines du soya s'étendent moins en profondeur que celles du maïs et que cette tendance en climat futur affecte davantage les rendements de soya. La variabilité des rendements est le principal facteur de variabilité des résultats économiques décrits plus bas.

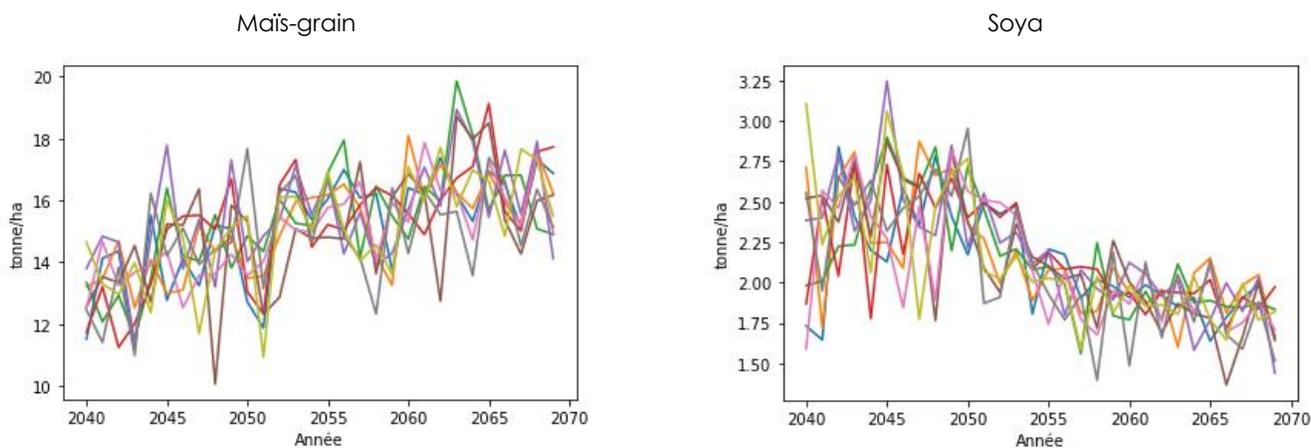


Figure 2. Variabilité des rendements de maïs-grain et de soya pour les neuf simulations climatiques

La marge sur charges variables moyenne la plus élevée est celle associée à la pratique de semis direct, tant pour le maïs-grain que le soya. La pratique conventionnelle est celle dont la rentabilité est la plus faible, toutes choses étant égales par ailleurs. Ce résultat doit toutefois être considéré avec circonspection étant donné les limites de l'analyse (voir section « Limites »).

Le Tableau 4 montre les sommes de marges en valeurs actualisées cumulées<sup>2</sup> pour les neuf (9) simulations climatiques pour la période de 2040 à 2069 ramenées en dollars de 2023. Étant donné que l'écart-type des marges est fixe dû aux coûts constants à travers les pratiques, on peut voir que la variabilité des résultats est légèrement plus élevée pour le soya (coefficient de variation de 8 % pour le soya contre 2 % pour le maïs-grain).

---

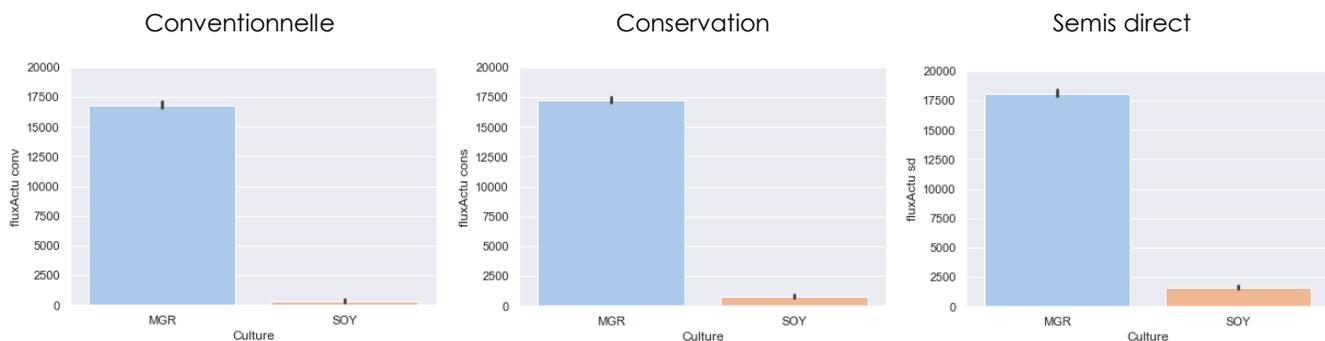
<sup>2</sup> Les marges en valeurs actualisées cumulées correspondent à la somme des marges sur charges variables annuelles ramenées en dollars de 2023.

**Tableau 4. Résultats des calculs des marges sur charges variables en valeurs actualisées cumulées des neuf simulations climatiques**

		Mais-grain	Soya
	n	9	9
	Unités	\$/ha	\$/ha
Conventionnelle	Marge actualisée cumulée	16 814	469
Conservation	Marge actualisée cumulée	17 753	1408
Semis direct	Marge actualisée cumulée	18 781	2436
	Écart-type	456	203
Rendement	Moyenne (t/ha)	15,123	2,137

La Figure 3 illustre graphiquement le niveau et la variabilité des marges sur charges variables selon les cultures et les pratiques. Il est possible de constater que la valeur présente générée par la culture du maïs-grain est supérieure à celle du soya. À noter toutefois que les flux de trésorerie correspondant aux marges sur charges variables de 2023 à 2039 n'ont pas été considérés dans l'analyse. La valeur générée pour ces années a donc été exclue de l'analyse.

Dans un autre ordre d'idées, la valeur présente des marges sur charges variables futures cumulées est un bon indicateur de la valeur économique d'un hectare de terre agricole additionnel pour un cultivateur. À titre de référence, le prix des terres agricoles transigées en Montérégie-Est en 2022 allait de 3400 \$ à 71 900 \$ l'hectare (FADQ, 2022).



*Figure 3. Valeurs présentes des marges sur charges variables futures pour le maïs-grain et le soya, pratiques conventionnelle, conservation et semi direct pour neuf simulations climatiques (dollars de 2023)*

Le Tableau 5 présente les valeurs moyennes non cumulées de revenus, de charges variables et de marges par pratique pour les neuf (9) simulations climatiques sur les trente années à l'étude (n=270) en dollars courants. Étant donné que les revenus par hectare sont tenus constants, les charges variables déterminent le niveau de la marge. Malgré les charges variables plus faibles du soya, l'écart de revenus à l'hectare ne permet pas de dégager une marge aussi appréciable que celle du maïs-grain.

**Tableau 5. Résultats des calculs de revenus, de charges variables et de marges moyennes non cumulées en dollars courants**

		Mais-grain	Soya
	n	270	270
	Unités	\$/ha	\$/ha
	Revenus	3305	1116
	Écart-type	373	189
Conventionnelle	Charges variables	1657	1108
	Marge sur charges variables	1648	8
Conservation	Charges variables	1568	1019
	Marge sur charges variables	1737	96
Semis direct	Charges variables	1472	923
	Marge sur charges variables	1833	193

La Figure 4 permet de poser un regard plus détaillé sur les marges sur charges variables par culture et par simulation climatique pour les années à l'étude. Afin d'alléger le document, seules les marges se rapportant à la pratique de semis direct sont présentées. La présence de données aberrantes est relativement rare, ce qui indique que les simulations climatiques n'impliquent pas de scénarios dits catastrophiques. Les marges sur charges variables du maïs-grain sont positives pour toute la période à l'étude tandis que des marges négatives sont observées de manière relativement fréquente pour le soya. Les écarts de rendements expliquent en bonne partie les écarts de marges entre les deux cultures.

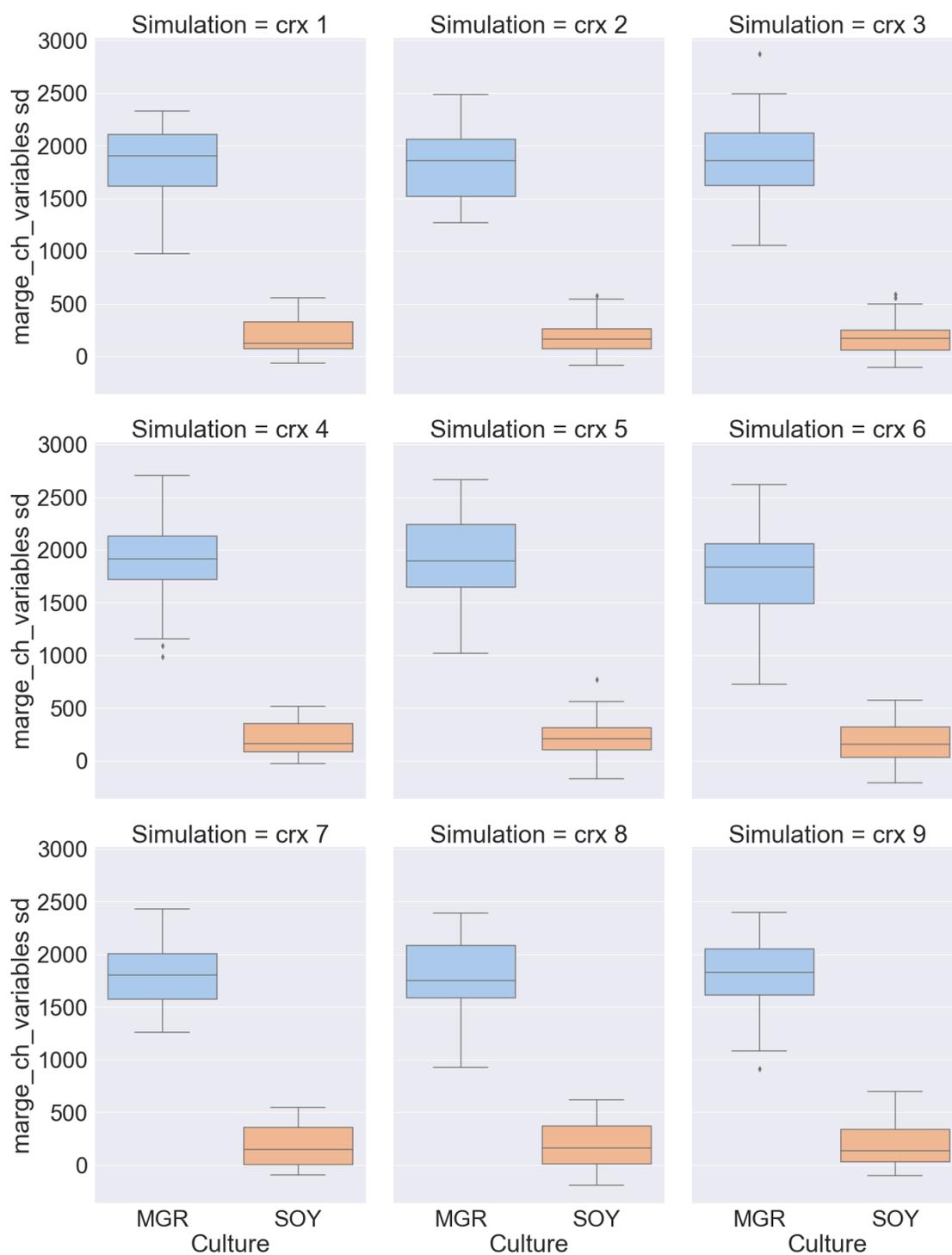


Figure 4. Distribution des marges sur charges variables pour la pratique semis direct par simulation climatique pour le maïs-grain et le soya

## LIMITES

La présente analyse suppose que les pratiques culturales n'ont pas d'incidence sur les rendements. Il est possible que l'amélioration des rendements selon l'adoption d'une pratique particulière puisse changer le portrait décrit précédemment. Par ailleurs, les effets bénéfiques de l'ajout du soya à l'intérieur d'une rotation n'ont pas été considérés, ni les coûts supplémentaires associés à un choix de rotation particulier. De plus, les simulations de rendements ont été corrigées pour tenir compte des progrès technologiques au fil du temps. Si ces progrès ne se manifestaient pas, les résultats économiques seraient plus faibles que ceux présentés plus haut. Finalement, l'hypothèse de coûts et de revenus constants est évidemment une hypothèse très forte. Les fluctuations de prix futurs pourraient faire en sorte que les résultats économiques réellement observés entre 2040 et 2069 soient considérablement différents de ceux présentés dans cette analyse.

## CONCLUSION

Les résultats du calcul de la valeur présente des marges sur charges variables futures en lien avec des simulations climatiques pour la région du bassin versant de la Petite rivière Pot au Beurre ont permis de dégager certains constats. Toutes choses étant égales par ailleurs, la culture du maïs-grain selon différents scénarios climatiques permettrait à un cultivateur de la région de dégager une rentabilité positive et ce, particulièrement avec l'adoption de la pratique de semis direct. La rentabilité de la culture du soya est cependant beaucoup plus faible selon les hypothèses d'analyse posées dans le cadre du présent mandat. La forte variabilité des conditions économiques des marchés agricoles a été mise de côté dans la présente analyse afin de mieux isoler les effets des scénarios climatiques. Cette variabilité est cependant un aspect critique quant à la rentabilité des entreprises agricoles. Les résultats de l'analyse doivent donc être considérés avec circonspection.

## RÉFÉRENCES

- Banque du Canada. (2023). *Rendements des obligations*. <https://www.bankofcanada.ca/rates/interest-rates/canadian-bonds/>.
- Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec. (2023). *Machinerie – coûts d'utilisation et taux à forfait suggérés*. AGDEX 740/825. CRAAQ. 22 pages.
- Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec. (2021a). *Maïs-grain – budget à l'hectare*. AGDEX 111/821. CRAAQ. 6 pages.
- Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec. (2021b). *Soya RR – budget à l'hectare*. AGDEX 141/821. CRAAQ. 7 pages.
- Dohlman E, Hansen J et Chambers W. (2023). *USDA Agricultural Projections to 2032*. USDA. 119 pages.
- Financière agricole du Québec (2021). *Assurance récolte - Rendements réels*. <https://www.fadq.qc.ca/statistiques/assurance-recolte/rendements-reels>. FADQ.
- Financière agricole du Québec (2022). *Bulletin Transc-TERRES*. <https://www.fadq.qc.ca/salle-de-presse/bulletins-dinformation/bulletin-transac-terres/bulletin-transac-terres-2023-1>. FADQ.
- Ricard, S., Huertas, W., Gombault, C., Blais-Gagnon, A., Osina, M., Sawadogo, M., et S. Rougerie-Durocher, 2023. *Projection des réponses hydrologiques en réponse à l'amélioration de la condition physique des sols des bassins versants de la Petite rivière Pot au Beure et de la rivière Saint-Germain*. Rapport IRDA et partenaires. 46 pages.



# CECPA

CENTRE D'ÉTUDES SUR LES COÛTS  
DE PRODUCTION EN AGRICULTURE

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

T : 418 833-2515 | F : 418 933-9125 | [www.cecpa.qc.ca](http://www.cecpa.qc.ca)