



L'IRDA a été constitué en mars 1998 par quatre membres fondateurs, soit le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), l'Union des producteurs agricoles (UPA), le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) et le ministère de l'Économie, de l'Innovation et des Exportations (MEIE).

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement est une corporation de recherche à but non lucratif qui travaille à chaque année sur une centaine de projets de recherche en collaboration avec de nombreux partenaires du milieu agricole et du domaine de la recherche.

#### **Notre mission**

L'IRDA a pour mission de réaliser des activités de recherche, de développement et de transfert en agroenvironnement visant à favoriser l'innovation en agriculture, dans une perspective de développement durable.

#### **Notre vision**

En 2016, l'IRDA est reconnu à l'échelle canadienne comme un chef de file en recherche, développement et transfert en agroenvironnement. L'IRDA se démarque par son approche intégrée et par le dynamisme de ses partenariats qui lui permettent d'anticiper les problèmes et de proposer des solutions novatrices répondant aux besoins des agriculteurs et de la société.

#### **Pour en savoir plus**

[www.irda.qc.ca](http://www.irda.qc.ca)

## **PARTENAIRES**



**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

Présenté au :

**Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des pêcheries du Québec**

*Programme Innov'Action agroalimentaire 2018-2023*

*Volet 2 - Adaptation technologique*

Préparé par :



---

Aubert Michaud, Ph. D

IRDA



---

William Huertas, technicien

IRDA



---

Arianne Blais-Gagnon, ing. M. Sc.

IRDA



---

Eveline Mousseau, agronome

Groupe ProConseil

## **LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIT :**

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.

## ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

- Responsable scientifique et chargé de projet: Aubert Michaud, Ph. D, IRDA
- William Huertas, technicien, IRDA
- Arianne Blais-Gagnon, ing. M.Sc, IRDA
- Eveline Mousseau, agronome, Groupe Proconseil
- Catherine Mercier, chargée de projet, Groupe Proconseil
- Hélène Vincent, technicienne, Groupe Proconseil

## ÉQUIPE DE RÉDACTION DU RAPPORT

- Aubert Michaud, Chercheur principal, IRDA
- William Huertas, technicien agricole, IRDA
- Arianne Blais-Gagnon, Professionnelle de recherche, IRDA

## COLLABORATEURS

- Eveline Mousseau, agronome, Groupe Proconseil

Les lecteurs qui souhaitent commenter ce rapport peuvent s'adresser à :

Simon Ricard, Ph. D

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

2700, rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

Téléphone : 418 643-2380, poste 691

Courriel : [simon.ricard@irda.qc.ca](mailto:simon.ricard@irda.qc.ca)

## REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à une aide financière accordée par le Programme Innov'Action agroalimentaire du Partenariat Canadien pour l'Agriculture et le Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des pêcheries du Québec. Des remerciements s'adressent également à l'IRDA qui a fourni une contribution financière importante dans le cadre de cette étude. Les auteurs remercient également les entreprises agricoles participantes au projet pour leur accueil et leurs contributions financières. L'équipe de réalisation reconnaît également l'appui technique fourni par le personnel de recherche de l'IRDA et du Groupe ProConseil.

## TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction.....	1
2	Revue des travaux antérieurs.....	2
3	Méthodologie.....	6
3.1	Description des sites expérimentaux.....	6
3.2	Dispositif expérimental.....	8
3.3	Propriétés des sols.....	11
3.4	Monitoring des nappes et débits aux drains.....	11
3.4.1	Élévation de la nappe d'eau en continu.....	11
3.4.2	Volume d'eau drainée en continu.....	11
3.5	Monitoring des flux de sédiments et nutriments.....	12
3.6	Suivi des rendements de culture.....	12
4	Résultats.....	13
4.1	Propriétés des sols.....	13
4.2	Niveaux des nappes d'eau, débits aux drains et flux de nutriments.....	14
4.2.1	Site A.....	15
4.2.2	Site B.....	22
4.3	Rendements des cultures.....	27
5	Conclusion.....	29
	Références.....	31
6	Annexes.....	34

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1	Caractéristiques des dispositifs de drainage à l'étude.....	8
Tableau 3-2	Régie des sols et des cultures des quatre champs pour la période d'étude.....	8
Tableau 3-3	Opération des chambres de contrôle par site.....	9
Tableau 4-1	Propriétés physico-chimiques des sols des champs à l'étude.....	13
Tableau 4-2	Propriétés texturales des sols des champs à l'étude.....	14

Tableau 4-3 Débits spécifiques et exportations spécifiques de nitrates et de phosphore dans les collecteurs de drainage des champs avec chambre de contrôle (DC) et en drainage libre (DL) au site de Saint-Jean-Baptiste (A). 22	
Tableau 4-4 Débits spécifiques et exportations spécifiques de nitrates et de phosphore dans les collecteurs de drainage des champs Contrôlé (DC) et au drainage libre (DL) au site de Saint-Angèle-de-Monnoir (B).....	27
Tableau 4-6 Rendements (rapportés à 15 % d'humidité) pour les saisons 2019 et 2020 déterminés par récolte manuelle au site A. ....	28
Tableau 4-7 Rendements (rapportés à 15 % d'humidité) pour les saisons 2019 et 2020 déterminés par récolte manuelle au site B. ....	28

## LISTE DES FIGURES

Figure 3-1 Modèle numérique d'élévation et disposition des piézomètres et des chambres de contrôle aux sites expérimentaux aux sites A (a) et B (b) .....	7
Figure 3-2 Confection des piézomètres (A); dispositif expérimental : chambre de contrôle de drainage, sonde de pression et sonde acoustique (B, C); échantillonnage en novembre 2019 (D); rivière des Hurons (E) et station du site B (F) en mars 2020; station du site B au printemps 2020 (G); relevés RTK lors du démantèlement des sites (H) et échantillonnage des cylindre de sol à l'automne 2021 (I). ....	10
Figure 4-1 Variation des élévations relatives des nappes d'eau aux 24 puits d'observation au cours de la période d'étude. ....	15
Figure 4-2 Précipitations et profondeurs moyennes des nappes du site A-Contrôlé (Rouge) et A-Témoin (Vert) pour la période d'étude .....	21
Figure 4-3 Débits aux chambres de contrôle et profondeurs moyennes des nappes du site A-Contrôlé (Rouge) et A-Témoin (Vert) pour la période d'étude. ....	21
Figure 4-5 Précipitations et profondeurs moyennes des nappes du site B-Contrôlé (Rouge) et B-Témoin (Vert) pour la période d'étude. ....	26
Figure 4-6 Débits aux chambres de contrôle et profondeurs moyennes des nappes du site B-Contrôlé (Rouge) et B-Témoin (Vert) pour la période d'étude. ....	26

# 1 INTRODUCTION

---

La disponibilité de l'eau est un facteur déterminant du rendement des cultures. Une année sur deux, le déficit saisonnier en eau dans le sud du Québec se situe entre 50 mm et 116 mm pour le maïs, et entre 106 et 168 mm pour le soja. Une année sur dix, ce déficit double, pour atteindre 114 mm en maïs sur sol argileux, à plus de 360 mm pour le soja en sol sableux. Les dernières saisons de croissance se sont montrées particulièrement sèches dans certaines régions du Québec. À la fin de juillet dernier, 735 avis de dommages avaient été enregistrés à La Financière (2018), comparativement à 127 en moyenne au cours des cinq dernières années pour cause de sécheresse. Les perspectives de stress hydrique s'accroissent avec l'évolution du climat, alors que les unités thermiques maïs devraient passer en moyenne de 2 390 sous les conditions actuelles à 3 088 à l'horizon 2040, Pour la même période, l'augmentation projetée du déficit hydrique est cependant de l'ordre de 34% (79 à 106 mm). Aussi, il est probable que les rendements moyens plafonnent, deviennent plus variables, ou qu'ils baissent même à des niveaux UTC plus élevés alors que les conditions du sol et l'humidité présente dans le sol s'avèrent des facteurs limitatifs de plus en plus importants. L'enjeu de la qualité de l'eau s'ajoute à celui du rendement des cultures, alors que les suivis hydrologiques réalisés au Québec indiquent qu'une part importante des exportations diffuses de phosphore, et l'essentiel des pertes d'azote, transite par la voie des drains souterrains vers les plans d'eau. Les plans d'eau de la plaine du Saint-Laurent sont particulièrement à risque en raison de la vulnérabilité des sols argileux aux écoulements préférentiels et du drainage systématique des terres agricoles.

L'objectif principal de ce projet était d'évaluer les bénéfices agronomiques et environnementaux découlant d'une pratique du drainage contrôlé modulée en fonction des périodes de l'année (Drainage de précision). La gestion du système de drainage souterrain au moyen d'une chambre de contrôle localisée à l'exutoire du collecteur des drains a été proposée comme moyen d'assurer un meilleur approvisionnement en eau des cultures, de même que de limiter le lessivage des éléments nutritifs depuis la couche arable du sol vers le cours d'eau. Il est proposé en hypothèse que le rabattement de la nappe d'eau est ralenti suivant le blocage de système de drainage à une hauteur critique au-dessus des drains. En saison de croissance, une meilleure rétention de l'eau des précipitations dans le profil de sol est dès lors ciblée, afin de favoriser l'approvisionnement en eau des cultures. En période de recharge, de la fin des récoltes à la reprise des travaux au champ, le contrôle de la hauteur de la nappe vise à réduire les pertes d'azote et de phosphore, qui se concentrent presque en totalité durant cette période de l'année. Il est anticipé qu'une opération de la chambre de contrôle permettant d'éviter le rabattement complet de la nappe jusqu'au niveau des drains limitera de façon substantielle la perte de nitrates et de phosphore dont la concentration élevée et très ponctuelle dans le temps est associée à une percolation préférentielle rapide de l'eau à travers les macropores du sol, étroitement connectés au réseau des drains souterrains.

De façon plus spécifique, les effets de la régie du drainage souterrain ont été évalués quant :

- à la rétention de la nappe d'eau et le maintien d'un bilan hydrique favorable à la qualité du sol et au développement des cultures;
- aux exportations d'azote et de phosphore par les drains souterrains;
- au rendement des cultures.

## 2 REVUE DES TRAVAUX ANTÉRIEURS

---

### Bilans hydriques et hauteurs d'eau drainées au Québec

Suivant une approche de séparation des écoulements de surface et souterrain mettant à profit le signal géochimique de l'eau, l'équipe de l'IRDA a décrit les bilans hydriques dominés par les cheminements souterrains pour différents micro-bassins versants de la Montérégie (Michaud et al., 2004; 2009a; 2009b; 2012). Le pourcentage de la lame d'eau souterraine exportée aux exutoires des micro-bassins Petit-Pot-au-Beurre (Sorel), Esturgeon (Saint-Martine) et Ewing (Bedford) représente par exemple entre 74 et 79 % de la lame d'eau annuelle exportée, pour des hauteurs moyennes comprises entre 193 et 363 mm/an. Ce bilan hydrique tributaire en grande partie de l'action des drains souterrains témoigne du potentiel important de retenue des précipitations excédentaires dans le profil du sol par le drainage contrôlé. Au plan agroenvironnemental, une implication pratique de ces observations est toute l'importance de ne pas exacerber la production de ruissellement de surface par le contrôle du drainage, particulièrement en raison des concentrations en phosphore (P) du ruissellement de surface qui sont beaucoup plus élevées que celles observées dans les eaux de drainage.

### Flux de nutriments au drain

Dans deux dispositifs parcellaires en Montérégie-Est présentant des textures de sol contrastées, Enright et Madramootoo (2004) ont évalué que les hauteurs d'eau drainées des champs atteignaient 80% de la hauteur totale d'eau exportée. Les observations d'exportations de P témoignaient de l'influence des propriétés du sol sur la migration préférentielle du P, alors que les exportations en P au drain en sol argileux étaient deux fois moindre que celles d'un loam sableux, pourtant beaucoup plus riche en P. Eastman et al. (2010) ont décrit pour les mêmes champs des pertes de P au drain correspondant entre 33 et 55% des flux totaux de P exporté. Poirier et al. (2012a) et Michaud et al. (2009c) ont décrit la qualité du ruissellement de surface et les écoulements au drain de 10 champs dans la même région d'étude et présentant aussi des textures contrastées. Les études ont mis en relief l'importance des migrations souterraines préférentielles de P particulaire, de nature colloïdale, et présentant une forte biodisponibilité. En s'appuyant sur les signaux de conductivité électrique du ruissellement de surface, des écoulements au drain, et de l'exutoire du bassin versant, Michaud et al. (2018b) a estimé que la migration souterraine du P total dans les eaux de drainage variait entre 27% (automne) et 29% (printemps) de la charge totale exportée en provenance du parcellaire agricole, la plus large part (75-88%) étant associée au cheminement préférentiel dans le sol. Pour le P réactif dissous, la part des drains à la charge totale variait de 43 à 46%, à l'automne et au printemps respectivement. En ce qui a trait à l'azote (N), le réseau expérimental de micro-bassins de l'IRDA a permis de situer les niveaux de flux annuels moyens de N du parcellaire agricole entre 6 et 62 kg N/ha-an pour l'ensemble des sites à l'étude. Les flux les plus élevés de nitrates sont observés dans les bassins plats à vocation culturale intensive du secteur Ouest de la Montérégie (62 kg/N-ha-an). Ces flux de nitrates, essentiellement associés aux transferts souterrains, sont dans la brochette supérieure des taux d'exportations généralement rapportés dans le Nord-Est de l'Amérique.

## Faisabilité du drainage contrôlé

Aux États-Unis, le drainage contrôlé est reconnu officiellement dans plusieurs états comme une pratique de gestion bénéfique réduisant les exportations diffuses d'azote et de phosphore au cours d'eau (NRCS, 2007). Les taux de réduction de 30 et 50 %, respectivement pour l'azote et le phosphore, ont ainsi été rapportés en réponse au contrôle du drainage souterrain dans plusieurs études américaines (Evans, 1995). Plus récemment, Ma et al. (2007) et Fang et al. (2012) ont modélisé des réductions de l'ordre de 22 à 33 % des flux de nitrates au drain en réponse au drainage contrôlé sur la base de ses résultats avec le Root Zone Water Quality Model (RZWQM2). Entre 2005 et 2009, une large coalition impliquant des équipes scientifiques de cinq états (Illinois, Ohio, Minnesota, Indiana et Iowa) ont coordonné leurs suivis de systèmes de contrôle du drainage sur vingt sites de champs jumeaux, comportant un champ témoin et un champ contrôlé. Les stratégies de gestion du drainage ont varié selon la région, mais ont toutes impliqué un contrôle hivernal pour la période de décembre à mars inclusivement suivant une profondeur critique de la nappe (déclenchant le drainage) variant de 10 cm à 20 cm. Toutes les stratégies de gestion rétablissaient le drainage libre en avril et maintenaient un contrôle en période estivale entre 30 et 60 cm. Dans l'ensemble, tous les sites ont démontré des réductions tangibles dans les débits au drain et les flux de nitrates, principal objectif environnemental, en lien avec l'enjeu du Golfe du Mexique. Des réductions de l'ordre de 30 à 60 % des flux d'eau et de N sont prédites en conditions climatiques moyennes pour les producteurs de ces régions (ADMC, 2010).

Au Québec, Madramootoo et al. (1993) démontraient les bénéfices du contrôle du drainage dans la production de soya, avec une augmentation significative du nombre de gousses et de plants par gousse et de teneur en N des grains en réponse au maintien de la nappe à une profondeur de 40 à 80 cm sous la surface. Mejia et Madramootoo (1998) ont par la suite observé au champ des réductions de concentration en nitrates de l'ordre de 84 % et 75 % pour des profondeurs de nappe contrôlées respectivement à 50 et 75 cm. La hauteur d'eau au drain des parcelles contrôlées à 50 cm de profondeur a été réduite de 42 % par rapport au drainage libre. Les auteurs ont ainsi conclu à la justification environnementale et économique de la pratique du drainage contrôlé, associée notamment aux économies potentielles dans les intrants azotés. Des augmentations de rendements de maïs de l'ordre de 3 à 14%, et de 9 à 13 % pour le soya ont également été rapportées (Madramootoo et al., 2000) pour les mêmes sites au Québec, alors que Zhou et al. (2000) ont documenté une réduction de 70% du flux de nitrates. En Ontario, suivant une étude de cinq ans en parcelles expérimentales, Tan et al. (2011) ont conclu que le drainage contrôlé avec irrigation souterraine (DCS) entraînait des pertes annuelles totales de P total dissous, de P réactif soluble et P non réactif similaires au drainage libre, mais réduisait les pertes de P particulaire de 15 % et de P total de 12 %. Plus récemment, l'équipe de AAC (2013) a documenté une augmentation moyenne des rendements de 3 % pour le maïs et de 4 % pour le soya sur des loams limono-argileux en relief plat du bassin hydrographique de la Nation Sud. Le drainage souterrain contrôlé par ailleurs avait réduit la perte des nutriments dans les eaux de surface de champ individuel et à l'exutoire du bassin hydrographique dans l'ordre de 65% pour les nitrates et 63 % pour le phosphore durant la saison de croissance. Enfin, Zhang et al. (2017) concluent à une réduction de 23 % du flux total de P en réponse au drainage contrôlé avec irrigation souterraine et l'implantation d'une culture de couverture sur les parcelles à la station d'Harrow en Ontario. Une réduction de 19 % de la concentration en P soluble est aussi attribuée au seul contrôle du drainage.

## Autres travaux en cours de réalisation ou en préparation au Québec ou au Canada

À notre connaissance, il n'y a pas de travaux de recherche en cours en lien avec le contrôle du drainage au Québec, hormis l'équipe de l'Université Laval en production de canneberges. Un réseau de démonstration du drainage contrôlé (DC) ciblant les grandes cultures a été initié en 2018 par le Groupe ProConseil en Montérégie Est (Mousseau, 2018). Le partenariat proposé avec ce groupe dans le cadre du présent projet a permis de documenter plus en aval les implications agronomiques et environnementales de la pratique du DC. L'Ontario constitue la seule province, à notre connaissance, où des travaux sont actuellement en cours sur le sujet, notamment par l'équipe de AAC à la station expérimentale d'Harrow. L'effet du DC sur les flux de N et P y est étudié depuis 2008, en interaction avec des stratégies distinctes de fertilisation en Ontario.

## Travaux antérieurs réalisés par l'équipe de projet

Les suivis hydrométriques (débits et géochimie) réalisés par l'IRDA depuis 1997 de 18 micro-bassins versants agricoles du Québec ont permis de bien discriminer leurs écoulements souterrains et de surface. Les hauteurs d'eau drainées les plus élevées (entre 74 et 79 % de la lame d'eau annuelle exportée) sont observées en Montérégie, en terrains plats. Une étude coordonnée par l'IRDA couplant les observations des eaux de ruissellement de surface et d'eau de drainage de 10 champs avec celle de leur micro-bassin versant en Montérégie-Est a permis de décrire les cheminements distinctifs et la spéciation (formes) des sédiments, d'azote et de phosphore par les voies du ruissellement, des drains et de la résurgence de la nappe peu profonde (Poirier et al., 2012; Michaud et al., 2018a). Le transport préférentiel du phosphore vers les drains a été estimé à 29 % de la charge globale de P total et à 46 % du P réactif soluble (Michaud et al., 2018a).

Plus récemment, les équipes de l'IRDA et de l'Université de Waterloo (Michaud et al., 2018b) ont examiné les impacts agronomiques et environnementaux du drainage contrôlé, en climat actuel et futur, suivant une approche combinant des mesures au champ et en cours d'eau, de même que des exercices de modélisation hydrologique. Des mesures en continu au champ des hauteurs des nappes d'eau, des débits au drain et des flux associés de sédiments, d'azote et de phosphore au drain des deux champs à Yamaska, en Montérégie, ont été mis à profit dans le calage et la validation de modèles hydrologiques afin d'évaluer les effets du drainage contrôlé sur les mouvements de l'eau et des nutriments dans les sols et les cours d'eau. Il a été conclu que la faisabilité du DC était limitée pour réduire le stress hydrique des cultures en raison du rabattement hâtif de la nappe au printemps sous le niveau des drains. Il était également estimé que le drainage de surface et interne du sol étaient des facteurs déterminants de la faisabilité agronomique et des bénéfices associés au DC. En ce qui a trait aux effets du DC sur la qualité de l'eau, il est apparu que les bénéfices étaient spécifiques aux sites à l'étude. Dans l'étude ontarienne réalisée sur un loam argileux en pente, l'activation du DC a exacerbé l'émission du ruissellement de surface et conduit à la détérioration de la qualité de l'eau de surface. Dans l'étude québécoise, le niveau de la nappe s'est maintenu sous le niveau des drains malgré la fermeture de la chambre de contrôle durant les deux saisons de croissance à l'étude. Une forte migration préférentielle de phosphore au drain via les macropores du sol a cependant été observée sur les champs argileux au relief plat. Il a ainsi été estimé que le DC pouvait réduire ces charges souterraines de phosphore en période de recharge hydrologique, à la condition qu'il ne conduise pas à un accroissement du ruissellement de surface. Le volet d'étude en modélisation hydrologique a conclu à une

faisabilité limitée de retenir de l'eau par la fermeture des collecteurs en climat futur, malgré le réchauffement hâtif au printemps. L'augmentation anticipée des précipitations hivernale et printanière en climat futur se traduit en effet en risque accrue de ruissellement de surface.

Enfin, un essai réalisé à la ferme expérimentale de l'IRDA à Saint-Bruno-de-Montarville a comparé cinq scénarios d'interculture de légumineuses quant à l'apport de N en production de grains biologiques (Michaud et al., 2018c). Le dispositif incluait un traitement de contrôle du drainage en saison de production sur un des deux champs à l'étude, avec mesure des flux de nitrates au drain et des hauteurs de la nappe dans les deux champs. Les conditions sèches de la période d'étude n'ont pas permis de générer des conditions contrastées dans les régimes hydriques des deux champs à l'étude. Les profondeurs des nappes observées sont demeurées à toutes fins pratiques semblables, et sans effet anticipé sur le développement des cultures ou la mobilisation de l'azote du sol.

## 3 MÉTHODOLOGIE

---

La démarche du projet a consisté à mesurer en continu des hauteurs de la nappe d'eau au champ, de même que les exportations d'eau et des flux de sédiments, d'azote et de phosphore au drain de quatre champs en production de grandes cultures en Montérégie. Les dispositifs expérimentaux en paires de champs jumeaux, a permis de comparer effets du drainage contrôlé et de drainage libre sur la rétention et les flux d'eau et de nutriments dans les champs. Des mesures de rendements des cultures ont complété l'évaluation de la gestion du drainage contrôlé à l'essai sur les sites à l'étude.

### 3.1 DESCRIPTION DES SITES EXPÉRIMENTAUX

Les sites A et B sont respectivement localisés à Saint-Jean-Baptiste et Saint-Angèle-de-Monnoir en Montérégie. Chaque site comporte deux champs adjacents, organisés suivant un dispositif de champs jumeaux. Le champ Témoin en drainage libre (DL) et le champ Contrôlé avec un dispositif de contrôle du drainage (DC) présentent des géométries, des superficies, des propriétés de sol, des reliefs et des régies de culture semblables.

Les champs ont un relief plat (Figure 3-1) et se distinguent d'un site à l'autre sur le plan des propriétés des sols. Le site A longeant la rivière des Hurons est représentatif de la série de sol Sainte-Rosalie, en phase argile limoneuse. Les zones basses des champs (24 m+) sont sujettes à l'inondation lors des crues de la rivière. Le site B occupe une position relativement plus haute dans le paysage (43 m+) et est caractérisé par la série de sol Laprairie, de texture loameuse. Le Tableau 3-1 présente les caractéristiques générales des dispositifs de drainage à l'étude. Le Tableau 3-2 indique la régie des sols et des cultures pour la durée du projet, sur retour de cultures de blé au site A et de prairie de luzerne au site B.

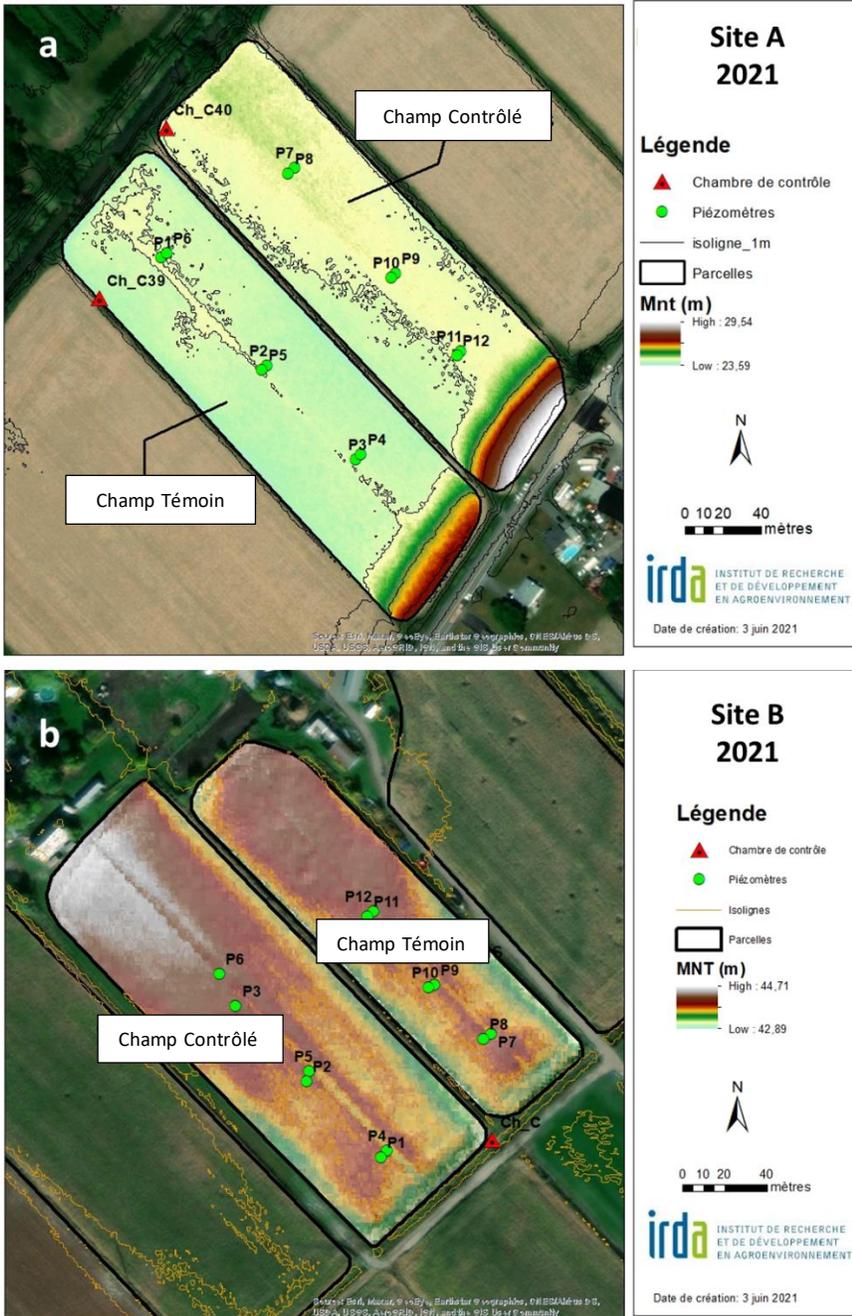


Figure 3-1 Modèle numérique d'élévation et disposition des piézomètres et des chambres de contrôle aux sites expérimentaux aux sites A (a) et B (b).

**Tableau 3-1** Caractéristiques des dispositifs de drainage à l'étude.

Site	Traitement	Dimension de la tour de contrôle	Superficie	Profondeur du collecteur	Pente longitudinale	Série de sol
		po	ha	po	%	
A	Contrôlé	6	2,0	60	0,06	Sainte-Rosalie
	Témoin	8	1,8	60	0,05	
B	Contrôlé	8	3,4	60	0,11	Laprairie
	Témoin	6	3,4	60	0,11	

**Tableau 3-2** Régie des sols et des cultures des quatre champs pour la période d'étude.

Site	Traitement	Culture	année 2019		année 2020		
			Apport de N kg N/ha	Apport de P kg P2O5/ha	Culture	Apport de N kg N/ha	Apport de P kg P2O5/ha
A	Contrôlé	maïs	186	31	soya	0	0
	Témoin	maïs	186	31	soya	0	0
B	Contrôlé	maïs	195	16	maïs	243	111
	Témoin	maïs	195	16	maïs	243	111

## 3.2 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Sur chacune des fermes à l'étude, deux champs adjacents ont profité de suivis agronomiques et hydrométriques selon un protocole identique destiné à comparer les effets de deux traitements de drainage, soit:

- un champ avec contrôle du drainage (DC) modulé en fonction de la saison, nommé champ Contrôlé ;
- un champ avec drainage libre (DL), sans contrôle de drainage, qui fait office de champ Témoin.

Les hauteurs de la nappe, les propriétés des sols et les rendements des cultures ont été évalués sur six points de mesure distincts pour chacun des champs (P1 à P12, Figure 3-1). La localisation des sites de mesures suit un dispositif apparié basé sur l'éloignement du point de mesure par rapport au collecteur, de même que sur la position relative du point de mesure par rapport au drain (au-dessus vs entre-drain). Ainsi, pour chaque champ jumeau, trois paires de sites sont alignées suivant un éloignement croissant par rapport au collecteur des drains et correspondant à des distances équivalentes à 25, 50 et 75% de la longueur du champ. Aussi, chaque paire de points de mesure sont espacées de 10 m, soit environ la moitié de l'écartement des drains.

Le contrôle de la profondeur de la nappe dans les champs profitant du drainage contrôlé (DC) a été réalisé au moyen de chambres de contrôle installés à l'exutoire du collecteur des drains du champ à l'étude. La hauteur critique de la nappe dans les champs Contrôlés a été établie à 50 cm sous le niveau de la surface du champ à proximité de la chambre de contrôle, au moyen de palplanches insérées dans les tours. Le Tableau 3-3 présente les dates de mise en place et de retrait des contrôles de nappe aux deux sites d'études pour la durée du projet. L'approche retenue consistait à mettre en place les contrôles le plus tôt possible au printemps, suivant le pic de

fonte et de ruissellement de surface printanier. Le contrôle était également maintenu tardivement en post-récolte. Le drainage libre a cependant été rétabli pour la période hivernale par crainte de dommages aux systèmes de drainage par le gel. La Figure 3-2 présente quelques photos prises lors de l'étude.

**Tableau 3-3 Opération des chambres de contrôle par site.**

<u>Site A</u>	
Période	Statut de la chambre
2019-07-17 au 2019-10-17	Fermé
2019-10-18 au 2020-03-23	Ouvert
2020-03-23 au 2020-09-23	Fermé
2020-09-30 au 2020-12-06	Fermé
2020-12-06 au 2021-03-30	Ouvert
2021-03-30 au 2021-05-11	Fermé

<u>Site B</u>	
Période	Statut de la chambre
2019-07-17 au 2019-10-17	Fermé
2019-10-18 au 2020-04-30	Ouvert
2020-05-01 au 2020-10-29	Fermé
2020-10-29 au 2021-04-14	Ouvert



**Figure 3-2 Confection des piézomètres (A); dispositif expérimental : chambre de contrôle de drainage, sonde de pression et sonde acoustique (B, C); échantillonnage en novembre 2019 (D); rivière des Hurons (E) et station du site B (F) en mars 2020; station du site B au printemps 2020 (G); relevés RTK lors du démantèlement des sites (H) et échantillonnage des cylindre de sol à l'automne 2021 (I).**

### 3.3 PROPRIÉTÉS DES SOLS

Des échantillons composites des sols aux sites de mesures suivant les strates de profondeur de 0-20 cm et 20-50 cm ont été prélevés et analysés en laboratoire pour leur teneur en matière organique et éléments P, Ca, Mg et Al (Mehlich-3). Des cylindres non dérangés ont également été prélevés aux mêmes sites dans les strates 0-20 cm et 20-50 cm et leurs propriétés texturales (densité apparente, macroporosité (100 cm) et conductivité hydraulique saturée) ont été déterminées au laboratoire de l'IRDA à l'automne 2021.

### 3.4 MONITORAGE DES NAPPES ET DÉBITS AUX DRAINS

#### 3.4.1 Élévation de la nappe d'eau en continu

Le dispositif comprend l'aménagement de 24 puits d'observation (6 par champ) afin d'enregistrer au pas de temps de 15 minutes les mouvements de la nappe d'eau. Les puits d'une profondeur supérieure à celle des drains (en moyenne 1,5 m dans le sol) sont constitués de tuyaux de PVC perforés sur la partie inférieure et enrobés d'une d'un géotextile afin de prévenir la sédimentation dans le tuyau. Des sondes à pression (HOBO U20L-04 Water Level Data Logger; 13 pieds) ont été déposées au fond de chaque puits. Une sonde à pression a aussi été installée à l'air libre afin d'enregistrer la pression barométrique ambiante. L'élévation de la colonne d'eau en continu pour les 24 sites de mesure a été estimée par le différentiel de pression entre les sondes dans les puits et celle à l'air libre pour la durée du suivi hydrométrique. Les mesures de pression par les sondes ont également permis d'établir les durées et hauteurs des épisodes d'inondation au site expérimental A en lien avec les sorties du lit de la rivière des Hurons.

#### 3.4.2 Volume d'eau drainée en continu

Chacune des quatre chambres de contrôle des drains souterrains ont été équipées de débitmètres acoustiques (ISCO Teledyne 2150 Area Velocity Module) et de sondes à pression (HOBO U20L-04). Les débits au drain au pas de temps de 15 minutes ont été calculés sur la base du produit des vitesses et des sections d'écoulement dans les collecteurs de drainage à leur entrée dans la chambre de contrôle suivant la formule suivante :

$$Q = V * A$$

Où

Q = Débit (m<sup>3</sup>/s)

V = Vitesse (m/s)

A = Surface d'écoulement (m<sup>2</sup>)

### 3.5 MONITORAGE DES FLUX DE SÉDIMENTS ET NUTRIMENTS

Des échantillonnages ponctuels des eaux de drainage des quatre chambres de contrôle ont été réalisés de façon synchronisée au cours de la période d'étude. Un total de 16 échantillons au site A et de 20 échantillons au site B ont ainsi été prélevés au cours de la période d'étude. Les dates de prélèvements et les résultats des dosages analytiques des échantillons sont présentés en Annexe 1.

Les échantillons ont été conservés au froid (< 4 °C) jusqu'au dosage en laboratoire pour les paramètres de matières en suspension, azote minéral (NH<sub>4</sub> + NO<sub>3</sub>) et phosphore (total, réactif dissous et biodisponible). Les taux de matières en suspension (MES) ont été déterminés par filtration à 0.45 µm (Eaton et al., 2005a). Le phosphore réactif dissous (PRD) a été déterminé par colorimétrie sur les échantillons filtrés (< 0,45 µm) par la méthode molybdenum-bleu de Murphy et Riley (1962), alors que le phosphore total (TP) a été mesuré par digestion au persulphate (Eaton et al., 2005b). L'azote (ammoniac et nitrates) a été déterminé par la méthode de réduction du cadmium (Greenberg et al., 2005). Le phosphore biodisponible (BioP) a été déterminé suivant la méthode d'extraction au NaOH (0,1 N) de Sharpley et ses collaborateurs (1991).

Les flux journaliers de nutriments (N et P) ont été estimés suivant une approche statistique de régression linéaire projetant la concentration en MES, N et P en fonction du débit des collecteurs de drain. La suite logicielle FLUX<sub>32</sub> Version 4.0 (Walker, 2019) a été utilisée pour établir les modèles statistiques sur la base des observations instantanées de concentration et de débits (pas de temps de 15 min) au collecteur. La qualité de l'ajustement du modèle a été évalué suivant une approche de validation croisée (Jack knife). La comparaison des concentrations moyennes pondérées pour le débit et des charges spécifiques (charges annuelles exportées par unité de surface – kg/ha), avec ou sans contrôle du drainage, a permis d'évaluer, de façon globale, l'influence du contrôle de la nappe sur la qualité de l'eau.

### 3.6 SUIVI DES RENDEMENTS DE CULTURE

Les rendements des cultures sont déterminés par récoltes manuelles aux alentours des six sites de suivi de nappe de chacun des champs. Trois longueurs (rangs) de 3 mètres sont récoltées autour de chaque puits d'observation. Les récoltes sont rapportées à la station Saint-Lambert-de-Lauzon de l'IRDA pour y être battues. Des sous-échantillons de grains sont séchés à l'étuve et pesés afin d'obtenir la teneur en eau lors de la récolte.

## 4 RÉSULTATS

### 4.1 PROPRIÉTÉS DES SOLS

Les Tableau 4-1 et Tableau 4-2 présentent les propriétés physico-chimiques et texturales des sols des quatre champs à l'étude.

Au site A, les sols argileux des champs sont exempts de sable, avec une teneur en limon qui dépasse 40 %. La densité apparente en surface et en profondeur demeure particulièrement élevée pour ces argiles, avec une moyenne qui atteint 1,48 g/cc au site Témoin A (DL), en surface comme en profondeur. Le site Témoin A se distingue également par une faible macroporosité (< 6 % en moyenne à 100 cm de tension) et une conductivité hydraulique saturée presque nulle (< 0,001 cm/min en moyenne), ce qui témoigne d'une condition physique moins favorable qu'au site sous drainage contrôlé (DC). Les indicateurs de la condition physique du champ Contrôlé sont en effet sensiblement meilleurs, tant sur le plan de la densité, de la macroporosité et de la conductivité hydraulique. Puisque la texture est relativement homogène entre les deux champs, le contraste dans les conditions physiques du sol serait tributaire des régies historiques des sols. Finalement, la richesse en phosphore de la couche arable du champ Contrôlé est plus de deux fois supérieure à celle du Témoin.

Au site B, les conductivités hydrauliques saturées et les macroporosités des sols des champs Témoin et Contrôlé demeurent relativement homogènes et témoignent globalement d'une meilleure condition physique qu'au site argileux A. Le champ Témoin du site B présente cependant un taux de matière organique du sol supérieur à 10 %, beaucoup plus élevé qu'au champ Contrôlé. La densité apparente du champ Témoin demeure ainsi moins élevée, et réciproquement, sa porosité totale est plus élevée qu'au champ Contrôlé, reflétant le gradient de taux de matière organique entre les parcelles. La richesse en phosphore de la couche 0-20 cm du champ Contrôlé est plus de deux fois supérieure à celle du Témoin.

**Tableau 4-1 Propriétés physico-chimiques des sols des champs à l'étude.**

Site	Traitement	Profondeur cm	Matière organique %	P	K	Ca	Mg	Al	Sable	Limon	Argile	Texture
				mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	%	%	%	
A	Contrôlé	0 - 20	4,76	69,4	134	2714	586	1043	1	41	58	Argile limoneuse
		20 - 50	4,51	58,8	96,2	2382	780	1088	0	39	64	Argile lourde
	Témoin	0 - 20	3,94	32,5	123	2491	612	1095	4	41	55	Argile limoneuse
		20 - 50	2,81	9,17	103	2400	875	1064	0	36	66	Argile lourde
B	Contrôlé	0 - 20	6,26	103	149	2444	149	868	34	41	25	Loam
		20 - 50	5,19	75,9	58,3	2174	151	916	32	42	26	Loam
	Témoin	0 - 20	11,2	46,2	116	3582	164	934	27	42	31	Loam argileux
		20 - 50	10,2	40,4	57,6	3191	145	997	24	45	31	Loam argileux

**Tableau 4-2 Propriétés texturales des sols des champs à l'étude.**

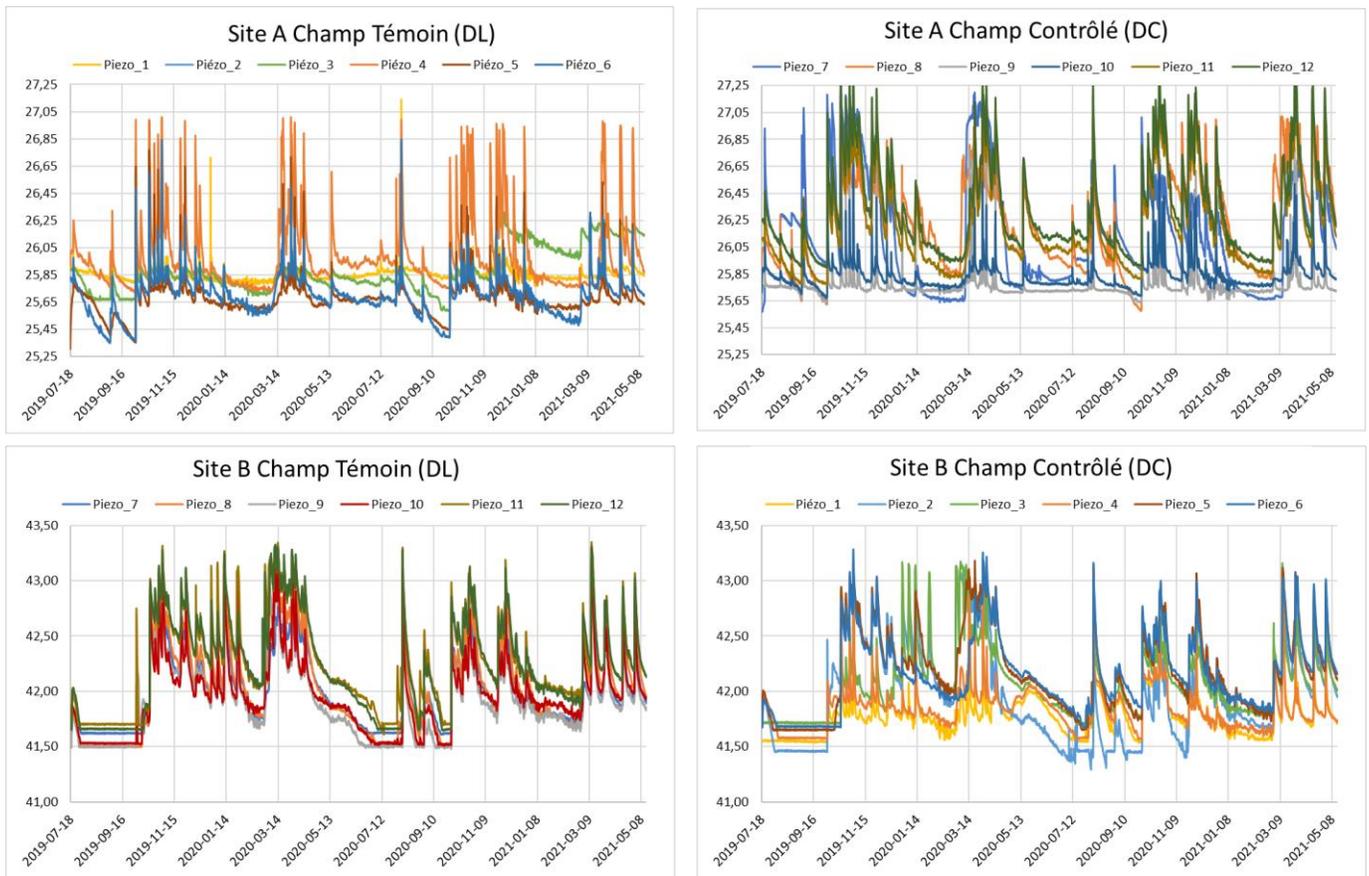
Site	Traitement	Profondeur cm	Densité apparente g/cc	Porosité totale g/cc	Porosité 100 cm g/cc	Macroporosité 100 cm g/cc	Conductivité hydraulique saturée cm/min
A	Contrôlé	0 - 20	1,35	0,486	0,396	0,089	0,1007
		20 - 50	1,44	0,459	0,417	0,042	0,0067
	Témoin	0 - 20	1,48	0,457	0,399	0,057	0,0003
		20 - 50	1,48	0,452	0,406	0,046	0,0150
B	Contrôlé	0 - 20	1,32	0,494	0,349	0,145	0,0710
		20 - 50	1,48	0,421	0,322	0,099	0,0880
	Témoin	0 - 20	1,14	0,563	0,395	0,168	0,1027
		20 - 50	1,33	0,473	0,374	0,099	0,1670

## 4.2 NIVEAUX DES NAPPES D'EAU, DÉBITS AUX DRAINS ET FLUX DE NUTRIMENTS

La variation des élévations relatives des nappes d'eau aux 24 puits d'observation au cours de la période d'étude est illustrée en Figure 4-1. Dans l'ensemble, aux sites A et B, les déplacements des nappes des champs Témoin et Contrôlé sont en phase, alors que les amplitudes dans les élévations témoignent de la position relative des puits d'observation.

Au site A, deux facteurs contribuent à la variabilité spatiale des hauteurs des nappes. D'une part, le niveau de la rivière et ses inondations en période hivernale et printanière hâtive contribuent aux remontées de la nappe, particulièrement dans le secteur nord-ouest du champ Contrôlé (piézomètres 7 et 8). À l'autre extrémité du champ (au sud-est), le cassé de pente lié au rehaussement abrupte du terrain sous-jacent à la route contribue vraisemblablement au rehaussement de la nappe, tel que suggéré par les observations aux puits 11 et 12. De façon similaire au champ Témoin, l'effet de la rivière est traduit par les observations des puits 1 et 6, alors que le cassé de pente à proximité de la route influence les observations colligées dans les puits 3 et 4.

Au site B, les élévations relatives des nappes observées aux puits d'observation reflètent dans l'ensemble le gradient topographique. La hauteur de la nappe tend ainsi à s'élever alors que l'on s'éloigne de la chambre de contrôle.



**Figure 4-1 Variation des élévations relatives des nappes d'eau aux 24 puits d'observation au cours de la période d'étude.**

Afin de mettre en relief l'influence du drainage contrôlé sur le comportement de la nappe (comparaison DC vs DL), les profondeurs moyennes de la nappe par rapport à la surface du sol ont été estimées à l'échelle de chacun des champs Contrôlé et Témoin sur la base des observations individuelles des puits. Ces résultats de variation de la profondeur moyenne de la nappe pour l'ensemble des périodes d'étude sont reproduits avec les précipitations journalières en figures Figure 4-2 et Figure 4-4, respectivement, pour les sites A et B. Les débits journaliers des collecteurs du drainage souterrain sont, pour leur part, superposés aux profondeurs moyennes des nappes en figures Figure 4-3 et Figure 4-5. Les sections suivantes commentent les résultats d'ensemble du suivi hydrométrique, successivement pour les sites A et B.

#### 4.2.1 Site A

La Figure 4-2 superpose les séries chronologiques de profondeurs moyennes des nappes des champs Contrôlé (DC) et Témoin (DL) et les hauteurs journalières de précipitations, pour la période d'étude. Cette figure met particulièrement en relief l'influence des précipitations sur les remontées des nappes, avec ou sans effet de

l'activation du contrôle de nappe au site DC. La Figure 4-3 substitue les observations de débits journaliers des collecteurs de drainage aux données de précipitations. Cette figure traduit alors l'influence de la hauteur de la nappe sur les débits au drain des champs, selon que le contrôle de drainage soit actif au champ DC, ou alors que les deux champs soient sous drainage libre (hiver et printemps hâtif). Les données brutes de qualité d'eau sont présentées à l'Annexe 2.

Le Tableau 4-3 présente les totaux de débits spécifiques et d'exportations spécifiques de nitrates et de phosphore dans les collecteurs de drainage des champs Contrôlé (DC) et Témoin (DL) pour le site de Saint-Jean-Baptiste (A). Les totaux de débits et de flux de nutriments sont rapportés par période d'activation du contrôle au champ DC, ou en période de drainage libre hivernal, de façon à mettre en relief l'influence du drainage contrôlé sur la réponse hydrologique. Les résultats sont interprétés ci-après par période d'activation, ou non, du drainage contrôlé.

### Période estivale 2019, période de drainage contrôlé (7 juillet 2019 au 17 octobre 2019)

Suivant l'installation des dispositifs de suivi hydrométrique en juillet 2019, les nappes des deux champs étaient déjà sous le niveau des drains souterrains. En réponse aux précipitations, les migrations des nappes sont synchronisées. Un seul événement de précipitation, le 1<sup>er</sup> octobre 2019 (54 mm) se traduit en remontée significative des nappes, provoquant un faible écoulement aux collecteurs des drains dans les deux champs. Au global, peu d'écoulement est mesuré dans les collecteurs en raison de conditions relativement sèches à l'été 2019. Pour l'ensemble de la période, le champ Contrôlé exporte une hauteur d'eau de 21 mm, contre 38 mm sous drainage libre, pour une différence de 17,8 mm qui pourrait être attribuée à l'effet du contrôle de drainage. Les pertes de N et P demeurent par ailleurs marginales, compte tenu des faibles hauteurs d'eau exportées.

### Période hivernale 2019-2020, période de drainage libre (18 octobre 2019 au 23 mars 2020)

En période hivernale 2019-2020, alors que les deux champs sont sous drainage libre, les remontées des nappes sont en phase. Le niveau de l'eau dans les puits du champ Témoin remonte jusqu'en surface à trois reprises alors que la rivière Des Hurons sort de son lit. Ces inondations coïncident avec les débits de crues enregistrés à la station hydrométrique au pont-route du Chemin de la Rivière-des-Hurons Ouest (Station 030415 Des Hurons, DEH/MELCC). Les 16 et 17 octobre 2020 se succèdent 31,0 et 16,5 mm de précipitations, provoquant un débit de la rivière qui culmine à 30,8 m<sup>3</sup>/s. Les observations enregistrées dans les puits témoignent d'une inondation qui atteint 15 cm d'hauteur moyenne au champ contrôlé le 17 octobre, alors que la hauteur d'eau moyenne des puits du champ Témoin frôle la surface (5 cm de profondeur en moyenne). La brève inondation provoque un écoulement d'une hauteur de 14,3 mm au champ Contrôlé, contre 5,5 mm au champ Témoin.

Le 27 octobre 2019, une nouvelle précipitation de 32 mm de hauteur provoque à nouveau la remontée du niveau de l'eau jusqu'à la surface dans les puits du champ Contrôlé. La nappe demeure sous les 35 cm de profondeur au champ Témoin. Les hauteurs d'écoulement atteignent 2,3 et 2,4 mm aux champs Contrôlé et Témoin, respectivement.

Le 31 octobre, une précipitation de 66 mm de hauteur provoque une nouvelle sortie du lit de la rivière (débit de pointe à 39,1 m<sup>3</sup>/s le 2 novembre). Le niveau des puits atteint la surface dans les deux champs. En 48 heures, au 1<sup>er</sup> novembre, 18,5 et 27,3 mm de hauteur d'eau, respectivement, auront été évacués des champs Témoin et Contrôlé. Encore ici, on ne peut distinguer les contributions de la remontée des nappes perchées ou des eaux d'inondation qui s'infiltrèrent depuis la surface dans les systèmes de drainage.

Le 11 janvier 2020, 47 mm de pluie s'abat sur la région et provoque une nouvelle inondation (débit de pointe de 65,8 m<sup>3</sup>/s le 16 janvier). Alors que le niveau d'eau dans les puits demeure très bas aux deux sites (1,0 m de profondeur), d'importantes lames d'eau s'infiltrèrent dans le système de drainage du champ Témoin, en position plus basse du relief. Au global, 59,8 mm d'hauteur d'eau est évacué du champ Témoin les 11 et 12 janvier 2020. Le débit dans la chambre du champ Contrôlé demeure relativement modeste pour la même période, soit à 11,8 mm de hauteur. Ces observations témoignent d'une dissociation complète entre les processus d'écoulement de surface et souterrain en période hivernale. L'important transfert d'eau de surface n'aura en effet pas conduit à la montée significative des nappes des champs à l'étude.

Les nappes atteignent en février leur plus bas niveau, sous les drains, jusqu'au dégel. La remontée graduelle de la nappe s'amorce au début mars. Au 13 mars, 14,5 mm de précipitation génère une exportation d'eau journalière de 10,8 mm au champ Témoin et pratiquement aucun débit dans le collecteur du champ Contrôlé. Encore ici, l'eau exportée du champ Témoin est attribuée à l'infiltration de l'eau de surface, alors que les niveaux des puits demeurent en moyenne sous 41 et 82 cm de profondeur aux champs Contrôlé et Témoin.

Au final, pour la période hivernale sous drainage libre, la hauteur d'eau totale exportée depuis la chambre du champ Témoin totalise 249 mm (volume exprimé par rapport à la superficie du champ) alors que 68 mm d'hauteur d'eau est mesuré à la chambre du champ Contrôlé. L'abondant écoulement au champ Témoin se traduit en flux significatif de phosphore (0,75 kg P/ha), en large partie attribué à l'infiltration de l'eau de surface des champs inondés. L'exportation de nitrates demeure relativement faible, soit de l'ordre de 6,69 et 2,59 kg N/ha aux champs Témoin et Contrôlé respectivement, reflétant des concentrations généralement faibles associées au ruissellement de surface.

### Période printanière et estivale 2020, période de drainage contrôlé (23 mars au 23 septembre 2020)

Les palplanches ont été remises en place dès le 23 mars 2020 afin de favoriser la rétention de l'eau dans les sols. Au 29 mars 2020, une précipitation journalière de 37,5 mm va provoquer une nouvelle inondation de la rivière (69,3 m<sup>3</sup>/s de débit de pointe le 30 mars). L'eau des puits du champ Contrôlé remonte alors jusqu'en surface, pour une hauteur moyenne d'inondation de 12 cm. La remontée de l'eau des puits du champ Témoin va se limiter à 26 cm de profondeur pour la même période. Au final, le 3 avril, 32,2 et 13,7 mm d'hauteurs d'eau moyennes, respectivement, auront été exportés des champs Témoin et Contrôlé. La position relativement plus basse du champ Témoin aura à nouveau favoriser l'infiltration et l'exportation de l'eau de surface par sa chambre de

contrôle, malgré que sa nappe perchée n'ait pas atteint la surface. La remontée en surface de la nappe au champ Contrôlé suggère un transfert d'eau de surface depuis le champ Contrôlé vers la chambre du champ Témoin.

Suivant la crue du début avril, les nappes amorcent leur cycle synchronisé de descentes et de remontées. Bien qu'en phase dans leur mobilité, la nappe du champ Contrôlé demeure relativement moins profonde, reflétant l'influence du contrôle de nappe. Puisque le niveau de la nappe du champ Contrôlé atteint néanmoins le seuil de contrôle de profondeur à 50 cm, l'écoulement est rétabli de façon occasionnelle. Au final, le rabattement de la nappe du champ Contrôlé est ralenti par rapport au champ Témoin jusqu'à la toute fin avril, où les nappes des deux champs atteignent le niveau des drains. Au 15 mai, une précipitation de 22 mm occasionne une remontée des niveaux d'eau dans les puits, sans provoquer d'écoulement significatif dans les systèmes de drainage. L'effet du contrôle du drainage est cependant perceptible lors de cet événement de précipitation, alors qu'un nouveau déphasage dans le rabattement de la nappe superficielle du champ contrôlé (une semaine) est révélé par les observations des puits.

La période pluvieuse du 26 juillet au 5 août (152 mm) déclenche une remontée des nappes, qui culmine le 4 août avec 73 mm de pluie. La sortie du lit de la rivière (débit de pointe de 70,4 m<sup>3</sup>/s le 5 août) provoque à nouveau une brève inondation, d'une hauteur moyenne de 15 cm sur les deux champs. Au total, une hauteur d'eau équivalente à 45,8 mm est évacuée du champ Témoin, alors qu'elle n'est que de 18,2 mm au champ Contrôlé. Compte tenu de l'effet de l'inondation, il demeure cependant impossible d'isoler l'effet du contrôle de nappe au champ contrôlé sur les débits. En effet, les hauteurs d'eau aux puits indiquent que les deux champs ont été inondés, ce qui ne permet pas de distinguer l'origine des eaux exportées aux drains. Celles-ci sont composées, selon des proportions indéterminées, de la remontée de la nappe et de l'infiltration de l'eau de surface vers les chambres de contrôle depuis les superficies inondées. Suivant la crue des eaux, les nappes perchées redescendent en phase pour atteindre le niveau des drains le 15 août. Les observations aux puits témoignent d'un rabattement un peu plus lent au champ Contrôlé.

Le cumul des précipitations de 9,5, 9,0 et 20 mm, les 24, 28 et 29 août 2020 provoquent un écoulement de 4,1 mm d'hauteur d'eau au champ Témoin. Les niveaux dans les puits demeurent néanmoins au niveau des drains dans les deux champs. L'écoulement au collecteur du champ Témoin est dès lors attribué à l'infiltration de l'eau dans le sol, plutôt qu'à une remontée de la nappe. Au champ Contrôlé, aucun écoulement n'est observé, témoignant de l'effet du contrôle de nappe. Les nappes des deux champs s'abaissent graduellement au cours d'un mois de septembre sec, nettement sous le niveau des drains.

## Période automnale 2020, période de drainage contrôlé (30 septembre au 6 décembre 2020)

Suivant une brève ouverture de la chambre du champ Contrôlé pour la récolte du soya (23-29 septembre), 57 mm de pluie s'abattent sur les champs. Dans la foulée de la remontée progressive des nappes, 24,1 mm d'eau est exporté des collecteurs du champ Témoin, alors que le niveau d'eau des puits remonte en moyenne à 73 cm de la surface. Aucun écoulement significatif n'est cependant observé au champ Contrôlé, alors que la nappe se limite au niveau de contrôle de 50 cm de profondeur.

Les précipitations du 7 octobre (12,0 mm), du 13 octobre (13,5 mm), du 15 octobre (12 mm), du 19 octobre (23 mm), du 23 octobre (8,5 mm) et du 26 octobre (12 mm) soutiennent les remontées des nappes des deux champs. Sous l'effet du contrôle de nappe, les hauteurs d'eau des puits du champ Contrôlé demeurent systématiquement plus élevées en octobre, d'environ 30 cm, qu'au champ Témoin, mais exempt d'écoulement. Le champ Témoin évacue progressivement les eaux dans son système de drainage souterrain.

En novembre, les nappes des deux champs replongent jusqu'au niveau des drains. Le 15 novembre, une précipitation de 8 mm rehausse légèrement le niveau des eaux dans les puits des deux champs. Par la suite, une abondante précipitation le 22 novembre (26,0 mm) initie un flux régulier d'eau au collecteur du champ Témoin (8,5 mm sur huit jours), alors que le niveau des puits monte à 39 cm de la surface. Au même moment, la profondeur moyenne des eaux des puits du champ Contrôlé atteint 10 cm, sans provoquer d'écoulement substantiel (0,50 mm pour la même période).

Les précipitations du 30 novembre (9 mm) et du 1<sup>er</sup> décembre (12 mm) vont générer une importante lame d'eau au champ Témoin, dont 20,4 mm pour la seule journée du 2 décembre, sans écoulement significatif au champ Contrôlé. Les nappes atteignent alors les profondeurs moyennes de 50 et 25 mm au champ Témoin et Contrôlé, respectivement. Le 6 décembre, les palplanches sont retirées au champ Contrôlé et le drainage libre est ainsi rétablie aux deux champs pour la période hivernale.

Au global, pour la période post-récolte du 30 septembre au 6 décembre 2020, le drainage contrôlé aura eu un effet manifeste sur la position de la nappe et l'exportation d'eau des systèmes de drainage. Une hauteur d'eau totale de 81 mm d'eau a été évacuée par le collecteur de drainage au champ Témoin, contre seulement 4 mm au champ Contrôlé (Tableau 4-3). Cette lame d'eau drainée se traduit en pertes nettes spécifiques de 0,23 kg P/ha et de 3,9 kg N/ha au champ Témoin, alors qu'elles sont, à toutes fins pratiques, nulles au champ Contrôlé. Sur le plan environnemental, pour un automne pluvieux, le contrôle du drainage s'est donc avéré efficace à prévenir les pertes de nutriments dans le système de drainage souterrain. Par ailleurs, le contrôle du drainage n'a pas conduit à un rehaussement de la nappe suffisant pour provoquer l'émission de ruissellement de surface. Le bilan environnemental du recours au drainage contrôlé demeure donc très positif pour la période automnale.

## Période hivernale 2020-2021, période de drainage libre (6 décembre 2020 au 30 mars 2021)

Le redoux du 25 décembre 2020 conduit à une exportation de 13,4 mm d'eau dans le collecteur du champ Témoin. Cette exportation est principalement associée à l'infiltration de l'eau de fonte vers la chambre de contrôle, alors que le niveau d'eau dans les puits des champs Contrôlé et Témoin remontent depuis le niveau des drains jusqu'à 38 et 57 mm de la surface, respectivement. Une portion indéterminée de la lame d'eau du champ Témoin peut dès lors être associée à une contribution du champ Contrôlé, qui évacue pour sa part que 0,16 mm d'hauteur d'eau dans son collecteur.

Le dégel et la fonte du couvert de neige le 12 et 13 mars provoque un important ruissellement vers les chambres de contrôle d'une hauteur de 37,4 et 35,3 mm, respectivement, aux champs Témoin et Contrôlé. L'exportation d'eau des collecteurs est principalement associée à l'infiltration d'eau de fonte, alors que le niveau de l'eau dans

les puits remonte depuis le niveau des drains jusqu'à 85 et 60 cm de la surface des champs Témoin et Contrôlé, respectivement.

Le 26 mars, une pluie de 17 mm provoque à nouveau une importante lame de ruissellement et/ou d'inondation qui s'infiltré principalement vers la chambre du champ Témoin, pour une hauteur d'eau cumulée de 51,7 mm jusqu'au 29 mars. L'exportation au collecteur du champ Contrôlé se limite à 9,0 mm pour la même période, témoignant à nouveau d'un transfert de surface vers le champ Témoin, en position plus basse dans le relief. Le 30 mars, le contrôle du drainage est rétabli sur le champ Contrôlé.

### Période printanière 2021, période de drainage contrôlé (30 mars au 11 mai 2021)

Alors que les niveaux de l'eau dans les puits sont à encore à plus de 90 cm de profondeur dans les deux champs, une forte précipitation le 15 avril (26 mm) provoque la remontée de l'eau jusqu'en surface au champ Contrôlé. La remontée de l'eau au champ Témoin plafonne plutôt à 40 cm de la surface. Il en résulte une hauteur d'eau exportée du collecteur du champ Contrôlé de 82,7 mm, entre le 16 et le 18 avril, contre 26,6 mm au champ Témoin. Manifestement, le drainage contrôlé aura exacerbé la hauteur d'eau exportée dans le système de drainage en favorisant l'accumulation d'eau dans le profil de sol, plutôt que son évacuation vers l'aquifère plus profond.

La situation se répète dix jours plus tard lors des précipitations du 28 (7,5 mm), du 29 (16 mm) et du 30 avril (16,5 mm). Du 30 avril au 2 mai, il en résulte en des hauteurs d'eau de 61,9 et 23,4 mm aux collecteurs des champs Contrôlé et Témoin respectivement. Le drainage contrôlé est estimé responsable de la hauteur d'eau plus importante exportée au collecteur, alors que le niveau moyen des puits du champ Contrôlé atteint 10 cm de la surface du sol. Au champ Témoin, sous drainage libre, le niveau maximal de l'eau des puits plafonne à 35 cm de la surface. Il faudra attendre jusqu'au 13 mai pour que le niveau des puits des deux champs atteigne une profondeur similaire, à plus de 90 cm.

Au global, pour la période printanière du 30 mars au 14 mai, le collecteur du drain du champ Contrôlé a exporté 139 mm d'hauteur d'eau, contre 66 mm au champ Témoin. L'augmentation de la lame d'eau exportée est attribuée à l'effet du drainage contrôlé qui aura contribué à la rétention d'eau dans le profil du sol. Ce taux d'exportation doublé au champ Contrôlé a généré une perte de nitrates de 5,0 kg N/ha, contre 1,9 kg/ha au champ Témoin. Les taux de perte de P similaires (0,25 (DL) et 0,29 (DC) kg P/ha) témoignent peut-être d'une richesse en P du champ Contrôlé beaucoup plus élevée qu'au champ Témoin (Tableau 4-1). Cet enrichissement relativement plus élevé du sol se traduit dès lors en concentration plus élevée de l'eau de drainage mesurée au collecteur du champ Contrôlé. Cet important gradient dans les richesses en P des eaux de drainage rappelle l'importance de la première ligne de défense agroenvironnementale sur le plan du contrôle des pertes de phosphore, soit le contrôle à long terme de l'enrichissement du sol.

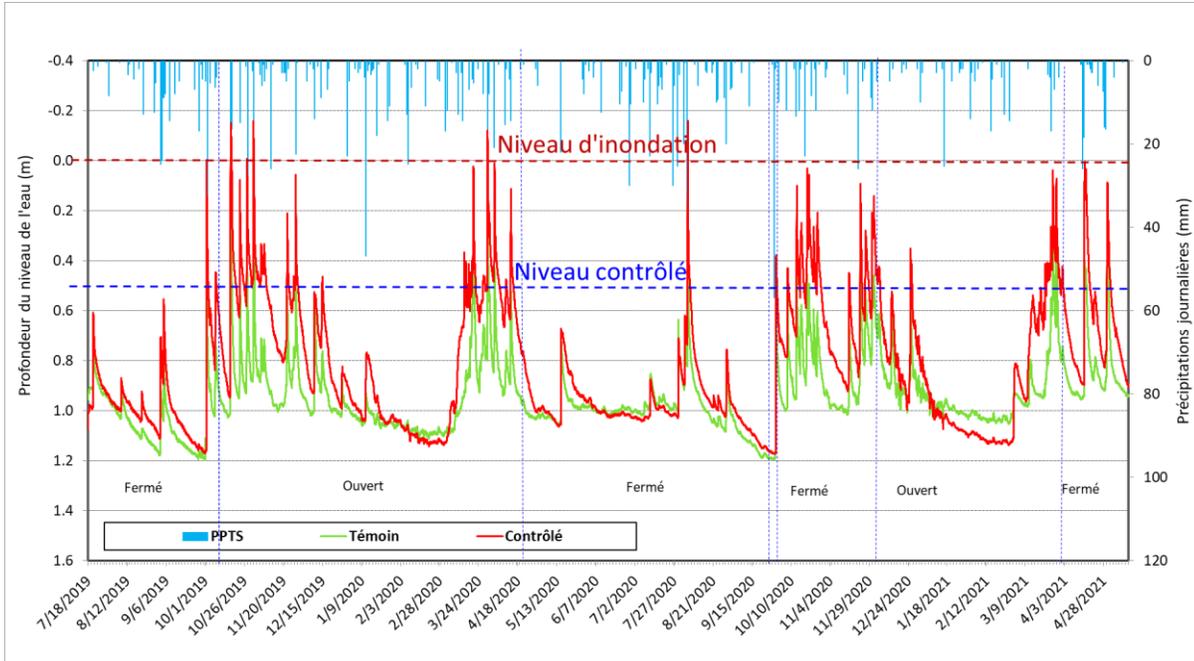


Figure 4-2 Précipitations et profondeurs moyennes des nappes du site A-Contrôlé (Rouge) et A-Témoïn (Vert) pour la période d'étude.

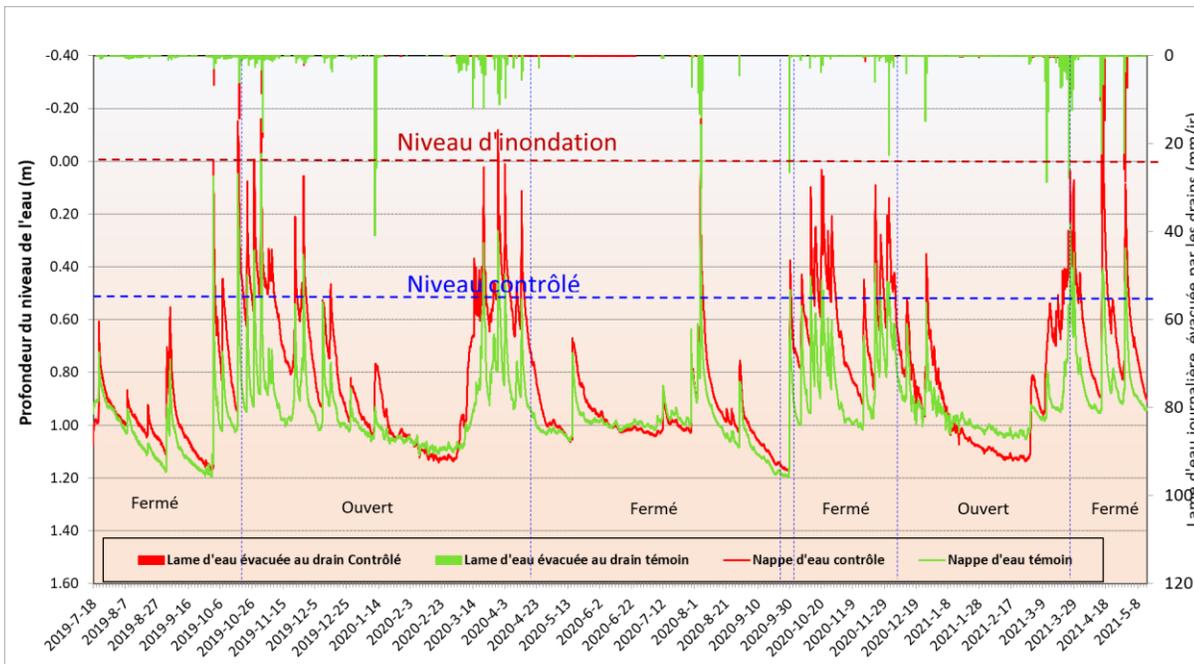


Figure 4-3 Débits aux chambres de contrôle et profondeurs moyennes des nappes du site A-Contrôlé (Rouge) et A-Témoïn (Vert) pour la période d'étude.

**Tableau 4-3 Débits spécifiques et exportations spécifiques de nitrates et de phosphore dans les collecteurs de drainage des champs avec chambre de contrôle (DC) et en drainage libre (DL) au site de Saint-Jean-Baptiste (A).**

Période	Statut de la chambre	Débits spécifiques				Perte de nitrates				Perte de phosphore			
		DC (mm)	DL (mm)	Différence *		DC (kg N/ha)	DL (kg N/ha)	Différence		DC (kg P/ha)	DL (kg P/ha)	Différence	
2019-07-17 au 2019-10-17	Fermé	21	38	-18	-46%	1,1	0,6	0,4	68%	0,08	0,10	-0,02	-21%
2019-10-18 au 2020-03-23	Ouvert	68	249	-181	-73%	2,6	6,7	-4,1	-61%	0,14	0,75	-0,61	-81%
2020-03-23 au 2020-09-23	Fermé	23	77	-54	-71%	0,9	0,6	0,3	52%	0,05	0,38	-0,33	-87%
2020-09-30 au 2020-12-06	Fermé	4	81	-77	-95%	0,2	3,9	-3,7	-96%	0,01	0,23	-0,22	-96%
2020-12-06 au 2021-03-30	Ouvert	60	164	-104	-63%	2,2	6,2	-4,0	-65%	0,11	0,52	-0,41	-78%
2021-03-30 au 2021-05-11	Fermé	139	66	73	110%	5,0	1,9	3,1	164%	0,29	0,25	0,04	16%
<b>Total pour la période</b>	<b>Fermé</b>	187	262	-76	-29%	7,2	7,0	0,2	2%	0,43	0,96	-0,53	-55%
<b>Total pour la période</b>	<b>Ouvert</b>	128	413	-285	-69%	4,8	12,9	-8,1	-63%	0,26	1,27	-1,02	-80%
<b>Total</b>	<b>667 jrs</b>	315	676	-361	-53%	12,0	19,9	-7,9	-40%	0,69	2,24	-1,55	-69%
<b>Total annuel spécifique (kg/ha-an)</b>	<b>365 jrs</b>	172	370			6,6	10,9			0,38	1,22		

\* DC - DL

#### 4.2.2 Site B

La Figure 4-4 superpose les séries chronologiques de profondeurs moyennes des nappes des champs Contrôlé et Témoin du site B avec les hauteurs journalières de précipitations (station Marieville). Cette figure met en relief l'influence des précipitations sur les remontées des nappes, avec ou sans effet de l'activation du contrôle de nappe. La Figure 4-5 substitue pour sa part les observations de débits journaliers des collecteurs de drainage aux données de précipitations. Cette figure traduit alors l'influence de la hauteur de la nappe sur les débits au drain des champs, selon que le contrôle de drainage soit actif au champ Contrôlé ou que les deux champs soient sous drainage libre. Les données brutes de qualité d'eau sont présentées à l'Annexe 2.

Le Tableau 4-4 présente les totaux de débits spécifiques et d'exportations spécifiques de nitrates et de phosphore dans les collecteurs de drainage des champs Contrôlé (DC) et Témoin (DL) pour le site de Sainte-Angèle-de-Monnoir (B). Les totaux de débits et de flux de nutriments sont rapportés par période d'activation du contrôle au champ Contrôlé, ou en période de drainage libre hivernal, de façon à mettre en relief l'influence du drainage.

#### Période estivale 2019, période de drainage contrôlé (7 juillet 2019 au 17 octobre 2019)

En juillet 2019, au moment de l'installation des dispositifs du projet, les nappes des deux champs étaient déjà sous le niveau des drains souterrains. En réponse aux précipitations, les mouvements de la nappe sont synchronisés pour les deux champs. Durant cette première période estivale, un seul évènement de précipitation, le 1<sup>er</sup> octobre 2019 (54 mm) se traduit en remontée des nappes, provoquant un faible écoulement aux collecteurs des drains dans les deux champs. Les 16 et 17 octobre 2020 se succèdent 31,0 et 17,5 mm de précipitations, provoquant une remontée importante des niveaux de nappe dans les champs Témoin (passe de 120 cm à 10 cm sous la surface) et Contrôlé (passe de 121 cm à 41 cm sous la surface). Cet épisode provoque un écoulement d'une hauteur de 19,8 mm au champ Témoin, contre 5,1 mm au champ Contrôlé.

Au global, peu d'écoulement est mesuré dans les collecteurs en raison de conditions relativement sèches à l'été 2019. Pour l'ensemble de la période, le champ Contrôlé exporte une hauteur d'eau de 16 mm, contre 34 mm sous drainage libre, pour une différence de 18 mm qui pourrait être attribuée à l'effet du contrôle de drainage. Les pertes de N et P demeurent par ailleurs marginales.

### Période hivernale 2019-2020, période de drainage libre (18 octobre 2019 au 30 avril 2020)

En période hivernale 2019-2020, alors que les deux champs sont sous drainage libre, le mouvement des nappes demeure synchronisé.

Le 27 octobre 2019, une nouvelle précipitation (32 mm) provoque à nouveau la remontée du niveau de l'eau jusqu'à inonder le champ Témoin. La nappe demeure sous les 40 cm de profondeur au champ Contrôlé. Les hauteurs d'écoulement sensiblement semblables atteignent 12,1 et 11,2 mm aux champs Contrôlé et Témoin, respectivement.

L'importante précipitation du 31 octobre (66 mm) provoque une remontée marquée des nappes monitorées, avec une inondation qui atteint 18 cm d'hauteur moyenne dans le champ Témoin. Près de 48 heures plus tard, 26,4 et 18,8 mm d'hauteur d'eau auront respectivement été évacués des champs Témoin et Contrôlé.

En 48 heures, suite à la précipitation hivernale du 11 janvier (47 mm), les débits dans les chambres de contrôle (22,2 mm au Contrôlé et 33,3 mm au Témoin) et le niveau des nappes augmentent. Dans le Témoin, les puits d'observation indiquent que la nappe plafonne autour de 40 cm sous la surface. Dans le Contrôlé, l'eau s'accumule dans le champ, pour une hauteur d'inondation de 13 cm.

Les nappes atteignent en février leur plus bas niveau, sous les drains, jusqu'au dégel. L'important transfert d'eau de surface conduit à la montée significative des nappes des champs à l'étude dès la fin du mois de février. Au cours de la période de dégel (début mars à mi-avril), les nappes restent élevées dans le profil, jusqu'à inonder le champ Témoin à quelques reprises. À un seul moment (autour du 30 mars), les nappes dans le champ Contrôlé satureront complètement le sol.

Au final, pour la période hivernale sous drainage libre, la hauteur d'eau totale exportée depuis la chambre du champ Témoin (DL) totalise 360 mm (volume exprimé par rapport à la superficie du champ) alors que 307 mm d'hauteur d'eau est mesuré à la chambre du champ Contrôlé (DC) (Tableau 4-4). Les abondants écoulements se traduisent en flux significatifs de phosphore (1,99 kg P/ha au Contrôlé pour 3,22 kg P/ha au Témoin), en large partie attribué à l'infiltration de l'eau de surface des champs inondés. L'exportation de nitrates demeure semblable d'un champ à l'autre, quoique particulièrement importante, soit de l'ordre de 182 et 121 kg N/ha aux champs Témoin et Contrôlé respectivement. Le détail des échantillons prélevés lors de cette période est présenté à l'Annexe 1.

## Période printanière et estivale 2020, période de drainage contrôlé (1<sup>er</sup> mai au 29 octobre 2020)

Les palplanches ont été remises en place au 1<sup>er</sup> mai, alors que le niveau de la nappe était déjà sous le niveau contrôlé (50 cm de la surface).

Au 15 mai, une précipitation de 22 mm occasionne une légère remontée des niveaux d'eau dans les puits, sans provoquer d'écoulement significatif dans les systèmes de drainage. La baisse de la nappe est ralentie dans le champ Contrôlé, attribuable à l'effet du contrôle de nappe.

La période pluvieuse du 26 juillet au 5 août (158,5 mm au total) déclenche une remontée des nappes et culmine avec une pluie de 73 mm le 4 août. Durant cette période, les nappes remontent jusqu'à la surface dans les deux champs. Une hauteur d'eau équivalente à 11,1 mm est évacuée du champ Témoin, pour un peu plus de la moitié (6,7 mm) au champ Contrôlé.

Le cumul des précipitations de 10, 9,5, 9,0 et 20 mm, les 23, 24, 28 et 29 août 2020 ne provoquent aucun écoulement dans les champs du site B. Les niveaux dans les puits demeurent bas. Les nappes des deux champs s'abaissent graduellement au cours d'un mois de septembre sec, nettement sous le niveau des drains.

Le 29 septembre, 57 mm de pluie s'abattent sur les champs. Dans la foulée de la remontée rapide des nappes, très peu d'eau est exporté des collecteurs des champs, alors que le niveau d'eau des puits remonte en moyenne à 39 cm de la surface dans la parcelle Témoin et à 51 cm dans le champ Contrôlé.

Les précipitations du 7 octobre (12,0 mm), du 13 octobre (13,5 mm), du 15 octobre (12 mm), du 19 octobre (23 mm), du 23 octobre (8,5 mm) et du 26 octobre (12 mm) soutiennent les remontées des nappes des deux champs. Le champ Témoin évacue les eaux plus lentement dans son système de drainage souterrain que le champ Contrôlé.

De façon naturelle, en système ouvert, la nappe au champ Témoin est plus élevée. Lors de la période du 1<sup>er</sup> mai au 29 octobre 2020, la fermeture de la chambre de contrôle au champ Contrôlé a permis de faire remonter la nappe au niveau de celle du champ Témoin et d'en ralentir la descente. Au global, les quantités d'eau exportées du système de drainage sont les mêmes, avec 22 mm au champ DL et 25 mm au champ DC. Les pertes en nitrates (14 et 13 kg N/ha) et en phosphore (0,15 et 0,07 kg P/ha) offre le même portrait que les débits (Tableau 4-4).

## Période automnale 2020 et hivernale 2021, période de drainage libre (29 octobre 2020 à 14 avril 2021)

Les palplanches sont retirées au champ Contrôlé et le drainage libre est ainsi rétabli aux deux champs pour la période hivernale. En novembre, les nappes des deux champs replongent dans le profil à des niveaux moyens de la surface de 115 cm (DC) et de 100 cm (DL).

Une abondante précipitation le 22 novembre (26,0 mm) initie un flux régulier d'eau au collecteur du champ Contrôlé (6,3 mm sur sept jours), alors que le niveau des puits monte à 75 cm de la surface. Au même moment, la

profondeur moyenne des eaux des puits du champ Témoin atteint 47 cm, sans provoquer d'écoulement substantiel (0,58 mm sur sept jours).

Les précipitations du 30 novembre (9 mm) et du 1<sup>er</sup> décembre (12 mm) vont générer un nouveau flux régulier (29,4 mm) de quelques jours (8) dans le champ Contrôlé. La nappe remonte jusqu'à 46 cm de la surface pendant cette période. Dans le champ Témoin, la nappe remonte davantage (14 cm de la surface) mais l'écoulement au drain demeure faible (5,6 mm) et de courte durée (2 jours).

Le redoux du 25 décembre 2020, observé dans le site A, ne provoque aucun écoulement dans le champ Témoin et un écoulement marginal dans le champ Contrôlé. Les nappes quant à elles remontent de quelques 20 cm dans le profil des deux champs avant d'amorcer une descente pour les deux mois qui suivent.

Fin février, les nappes remontent à nouveau dans le profil. Les 11, 12 et 13 mars, avec la fonte du couvert de neige, les deux champs sont inondés, provoquant un écoulement important de 32,2 mm dans le Témoin. Les débits au champ Contrôlé sont plus faibles (13,3 mm pour la même période) mais s'échelonnent sur plusieurs jours encore.

Suite à la pluie du 26 mars (17 mm), les nappes remontent à 35 cm et à 24 cm dans les champs Contrôlé et Témoin respectivement. L'écoulement au drain est plus important dans le Témoin (9,0 mm) comparativement au Contrôlé (1,9 mm).

Alors que les niveaux de l'eau dans les puits sont à plus de 1 m de profondeur dans les deux champs, de fortes précipitations le 15 avril (26 mm) et le 16 avril (18,5 mm) provoquent la remontée de l'eau jusqu'à 15 cm au champ Témoin. La remontée de l'eau au champ Contrôlé, quoiqu'en phase avec celle du champ DL, plafonne plutôt à 34 cm de la surface. Il en résulte une hauteur d'eau exportée du collecteur du champ Témoin de 18,5 mm, entre le 16 et le 18 avril, pour 0 mm au champ Contrôlé.

La situation se répète dix jours plus tard : le cumul des précipitations des 28 (7,5 mm), 29 (16 mm) et 30 avril (16,5 mm) fait remonter les nappes à 11 cm (Témoin) et à 34 cm (Contrôlé) de la surface du sol. Aucune n'écoulement n'est mesuré au drain du champ Contrôlé alors que 12,9 mm sort du collecteur au champ Témoin.

Au global, pour la période 29 octobre 2020 au 14 avril 2021, le collecteur du drain du champ Contrôlé a exporté 98 mm d'hauteur d'eau, contre 59 mm au champ Témoin. Ce taux d'exportation presque doublé au champ Contrôlé a généré une perte de nitrates de 39 kg N/ha, contre 16 kg/ha au champ Témoin. Les taux de perte de phosphore (0,63 (DC) et 0,48 (DL) kg P/ha) pourraient témoigner d'une richesse en P du champ Contrôlé beaucoup plus élevée qu'au champ Témoin (Tableau 4-1), du débit plus élevé mesuré au Contrôlé ou d'une combinaison de ces deux facteurs.

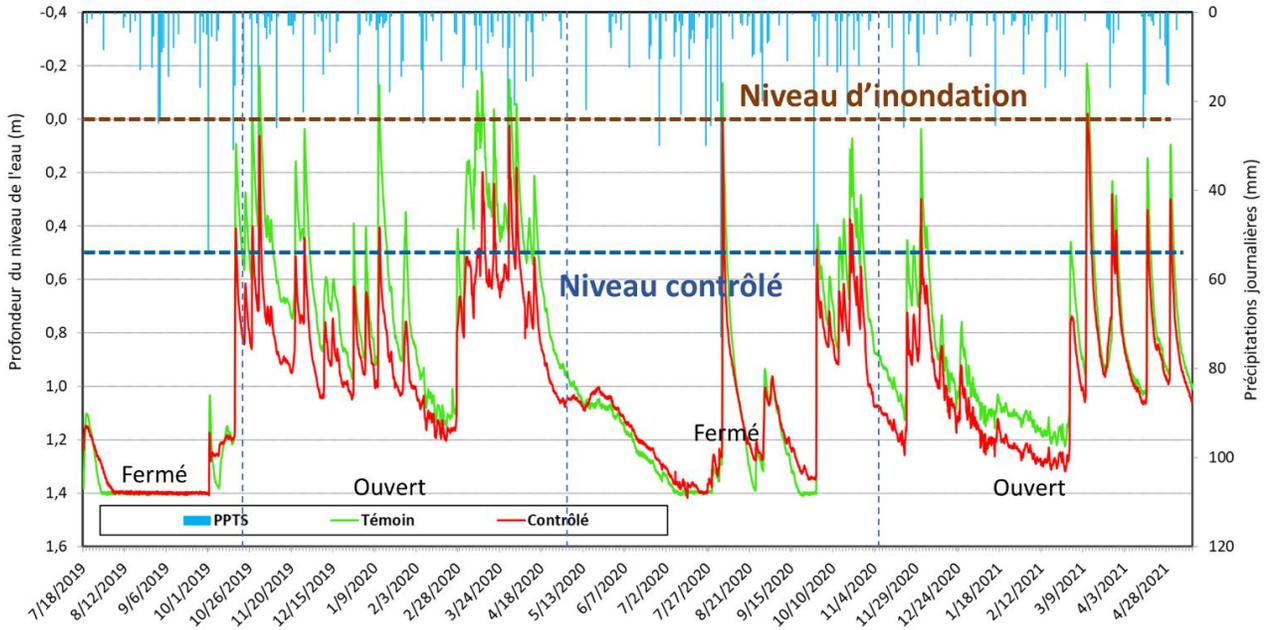


Figure 4-4 Précipitations et profondeurs moyennes des nappes du site B-Contrôlé (Rouge) et B-Témoïn (Vert) pour la période d'étude.

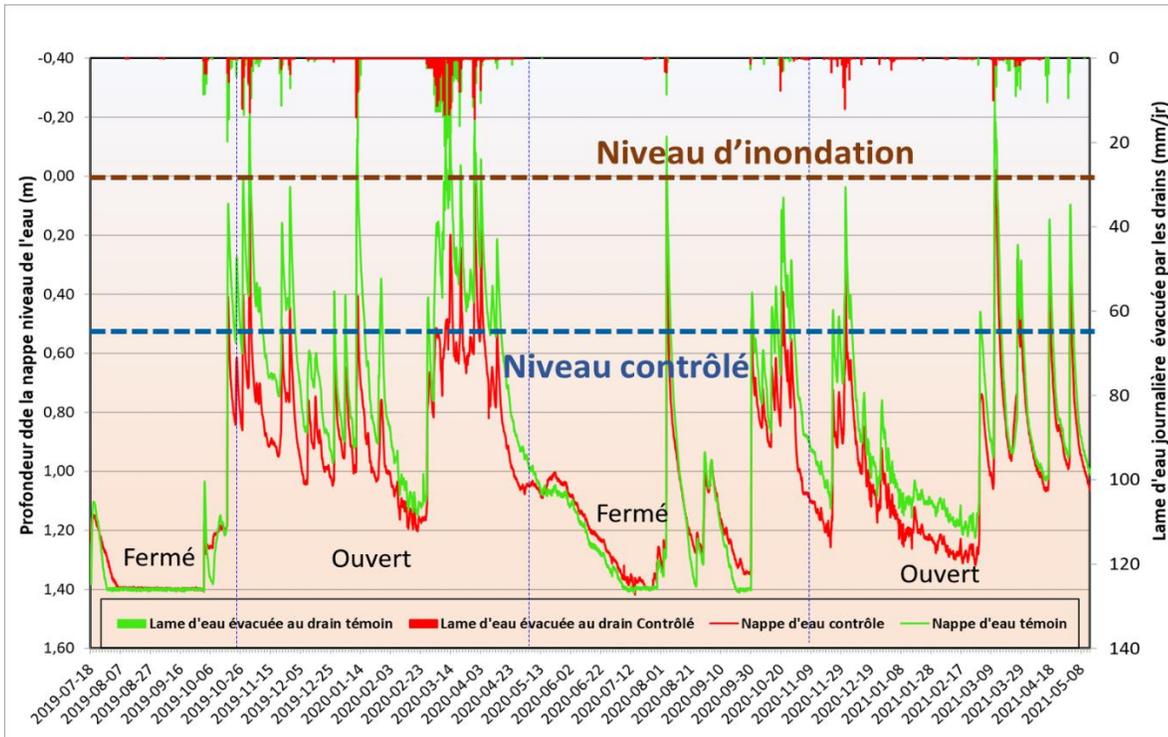


Figure 4-5 Débits aux chambres de contrôle et profondeurs moyennes des nappes du site B-Contrôlé (Rouge) et B-Témoïn (Vert) pour la période d'étude.

**Tableau 4-4 Débits spécifiques et exportations spécifiques de nitrates et de phosphore dans les collecteurs de drainage des champs Contrôlé (DC) et au drainage libre (DL) au site de Saint-Angèle-de-Monnoir (B).**

Période	Statut de la chambre	Débits spécifiques				Perte de nitrates				Perte de phosphore			
		DC (mm)	DL (mm)	Différence * (mm) (%)		DC (kg N/ha)	DL (kg N/ha)	Différence (kg N/ha) (%)		DC (kg P/ha)	DL (kg P/ha)	Différence (kg P/ha) (%)	
2019-07-17 au 2019-10-17	Fermé	16	34	-18	-52%	4	13	-9,0	-67%	0,09	0,33	-0,24	-73%
2019-10-18 au 2020-04-30	Ouvert	307	360	-53	-15%	121	182	-61,6	-34%	1,99	3,22	-1,23	-38%
2020-05-01 au 2020-10-29	Fermé	25	22	3	15%	13	14	-1,7	-12%	0,07	0,15	-0,09	-57%
2020-10-29 au 2021-04-14	Ouvert	98	59	39	65%	39	16	22,4	139%	0,63	0,48	0,15	31%
<b>Total pour la période</b>	<b>Fermé</b>	<b>41</b>	<b>56</b>	<b>-14</b>	<b>-26%</b>	<b>17</b>	<b>28</b>	<b>-10,7</b>	<b>-38%</b>	<b>0,16</b>	<b>0,48</b>	<b>-0,33</b>	<b>-68%</b>
<b>Total pour la période</b>	<b>Ouvert</b>	<b>405</b>	<b>420</b>	<b>-15</b>	<b>-3%</b>	<b>159</b>	<b>198</b>	<b>-39,2</b>	<b>-20%</b>	<b>2,62</b>	<b>3,70</b>	<b>-1,08</b>	<b>-29%</b>
<b>Total</b>	<b>667 jrs</b>	<b>446</b>	<b>475</b>	<b>-29</b>	<b>-6%</b>	<b>176</b>	<b>226</b>	<b>-49,8</b>	<b>-22%</b>	<b>2,78</b>	<b>4,18</b>	<b>-1,41</b>	<b>-34%</b>
<b>Total annuel spécifique (kg/ha-an)</b>	<b>365 jrs</b>	<b>244</b>	<b>260</b>			<b>29,7</b>	<b>29,5</b>			<b>1,5</b>	<b>2,3</b>		

\* DC - DL

### 4.3 RENDEMENTS DES CULTURES

La récolte manuelle du maïs-grain des sites A et B s'est déroulée le 30 octobre 2019. Celle de 2020 s'est faite le 9 octobre dans le soya du site A et le 29 octobre dans le maïs-grain du site B. Les rendements historiques observés par les producteurs entre chaque couple Témoin-Contrôlé étaient semblables. Globalement, les rendements sont supérieurs dans les parcelles avec contrôle de drainage, avec des gradients de 6 % pour le maïs de 2019 et de 8 % pour le soya de 2020 au site A (Tableau 4-5) et avec des gradients entre 2 et 5 % pour le maïs des saisons 2019-2020 au site B (Tableau 4-6).

Avec deux années de récolte, il est difficile d'attribuer la différence de rendements au contrôle du drainage seul. Au site A, il n'y a pas de tendance claire d'une meilleure retenue d'eau dans le suivi des nappes puisque le déphasage entre les champs Témoin et Contrôlé s'observe en période de contrôle de nappe ouvert comme fermé. La différence d'élévation entre les champs explique probablement davantage le décalage sans qu'il y ait une meilleure rétention de la nappe en période de croissance avec le contrôle de nappe. Au site B, le niveau très bas des nappes à l'été 2019 ne permettent d'observer aucune différence entre les deux champs. À l'été 2020, le contrôle de nappe en fonction semble ralentir la baisse du niveau de la nappe, contribuant peut-être aux meilleurs rendements observés.

**Tableau 4-5 Rendements (rapportés à 15 % d'humidité) pour les saisons 2019 et 2020 déterminés par récolte manuelle au site A.**

Traitement	Localisation dans la parcelle	2019 - Maïs tm/ha	2020 - Soya tm/ha
<b>Contôlé</b>	nord-ouest	13,40	4,35
	centre	13,17	4,31
	sud-est	11,37	4,60
	<b>moyenne DC</b>	<b>12,65</b>	<b>4,42</b>
<b>Témoin</b>	nord-ouest	11,51	4,37
	centre	11,48	4,20
	sud-est	12,71	3,70
	<b>moyenne DL</b>	<b>11,90</b>	<b>4,09</b>
	Gradient*	0,06	0,08

\* (DC - DL)/DL

**Tableau 4-6 Rendements (rapportés à 15 % d'humidité) pour les saisons 2019 et 2020 déterminés par récolte manuelle au site B.**

Traitement	Localisation dans la parcelle	2019 - Maïs tm/ha	2020 - Maïs tm/ha
<b>Contôlé</b>	nord-ouest	14,57	12,75
	centre	16,45	13,36
	sud-est	13,89	12,06
	<b>moyenne DC</b>	<b>14,97</b>	<b>12,72</b>
<b>Témoin</b>	nord-ouest	14,54	11,91
	centre	14,46	12,51
	sud-est	13,70	13,16
	<b>moyenne DL</b>	<b>14,23</b>	<b>12,52</b>
	Gradient*	0,05	0,02

\* (DC - DL)/DL

## 5 CONCLUSION

L'étude a permis de caractériser les réponses hydrologiques et les flux de nutriments dans les systèmes de drainage souterrain dans quatre champs de la Montérégie. Les suivis de la mobilité des nappes souterraines, des flux d'eau et de nutriments aux collecteurs de drainage, monitorés de façon continue de l'été 2019 au printemps 2021, ont permis d'observer quelques effets et interactions entre les conditions agroclimatiques, les propriétés des sols et les régies de drainage.

En période hivernale (octobre/décembre à mars/avril), les contrôles de nappe sont ouverts. Une dissociation des processus hydrologiques de surface et souterrain a été observée, alors qu'il y avait exportation d'eaux de fonte et d'inondation et aucune remontée de nappe vers la surface. Au site A, pour les deux périodes où les champs étaient en drainage libre, des différences significatives quant aux hauteurs d'eau exportées et aux flux de nutriments ont été observées, montrant des valeurs plus faibles dans le champ Contrôlé. Toutefois, compte tenu de l'effet de l'inondation de la rivière des Hurons, il demeure difficile d'isoler l'effet du contrôle de nappe. Au site B, la saison 2019 a vu plus d'eau exportée (avec des flux de nutriments conséquents) dans le champ Contrôlé et l'inverse en 2020. C'est globalement lors de cette période que les résultats ont montré les flux les plus importants.

En saison de production (mars/avril à septembre/octobre), alors que les chambres de contrôle sont fermées, les observations ont montré une hauteur d'eau exportée moindre en système contrôlé. En 2019, une différence de 18 mm a été observée pour les sites A et B. En 2020, le site A Contrôlé a exporté 54 mm de moins que le Témoin, alors qu'au site B, les débits spécifiques étaient, à toutes fins pratiques, les mêmes. Malgré tout, les rendements mesurés manuellement pour 2019 et 2020 ont montrés de meilleurs résultats dans les deux champs avec contrôle de drainage. Les pertes d'azote et de phosphore demeurent marginales mais sont globalement moindres pour les champs DC. Comme cette période n'est pas propice aux pertes de nutriments par les drains, compte-tenu des faibles hauteurs d'eau exportées, le contrôle de la nappe n'a qu'un effet marginal sur ces charges en été.

Au site A, deux périodes sensibles ont pu être isolées par la fermeture du contrôle de nappe : les périodes globalement de post-récolte 2020 (30 septembre au 6 décembre) et de fonte des neiges 2021 (30 mars au 11 mai). La période automnale de 2020 a montré des réductions importantes des flux d'eau (-77 mm) et de nutriments (-3,7 kg N/ha et -0,41 kg P/ha) du champ Contrôlé par rapport au champ Témoin. Le contrôlé du drainage aura eu un effet manifeste sur la position de la nappe et l'exportation d'eau des systèmes de drainage, sans toutefois contribuer à l'exacerbation du ruissellement de surface par un rehaussement du niveau de la nappe. Le bilan environnemental du recours au drainage contrôlé demeure donc très positif pour cette période automnale. La période printanière hâtive de 2021 a montré que le drainage contrôlé aura contribué à augmenter la hauteur d'eau exportée dans le système de drainage, en favorisant l'accumulation d'eau dans le profil de sol, plutôt que son évacuation vers l'aquifère plus profond.

La faisabilité du drainage contrôlé demeure complexe, témoignant notamment de l'influence des conditions agroclimatiques, des pratiques culturales, des types de sol et de la richesse du parcellaire agricole. L'étude a toutefois montré que l'effet du contrôle drainage est marginal en saison estivale. De plus, en réponse au drainage

contrôlé, un intérêt existe en période automnale afin de diminuer les nitrates en circulation. Finalement, une attention particulière doit être accordée lors du printemps hâtif, en période de recharge hydrologique, pour ne pas trop rehausser le niveau de la nappe et causer la détérioration de la qualité de l'eau exportée au cours d'eau.

## RÉFÉRENCES

---

- AAC. 2013.** Le drainage souterrain contrôlé : Augmenter le rendement et protéger l'environnement. Programme EPBH), AAC. Publication en ligne.
- Agricultural Drainage Management Coalition. 2010.** Drainage Water Management for Midwestern Row Crop Agriculture. Conservation Innovation Grant 68-3A75-6-116. 270 pages.
- Eastman, M., A. Gollamudi, N. Stämpfli, C.A. Madramootoo, and A. Sarangi. 2010.** Comparative evaluation of phosphorus losses from subsurface and naturally drained agricultural fields (...). *Agricultural Water Management* 97:596-604.
- Eaton, A.D., Lenore S. Clesceri, Eugene W. Rice, Arnold E. Greenberg. 2005a.** Total Suspended Solids Dried at 103-105o C). *Standard methods for examination of water and wastewater*, 21th edition, p. 2-58. ISBN 0-87553-047-8.
- Eaton, A.D., Lenore S. Clesceri, Eugene W. Rice, Arnold E. Greenberg. 2005b.** Persulfate Digestion Method, *Standard methods for examination of water and wastewater*, 21th edition, n p. 4-150-151. ISBN 0-87553-047-8.
- Enright, P. and Madramootoo, C. 2004.** Phosphorus losses in surface runoff and subsurface drainage waters (...). *Proc. 8th Drainage Symposium, ASAE.*
- Evans, R., Wayne Skaggs, R., and Wendell Gilliam, J. 1995.** Controlled versus Conventional Drainage Effects on Water Quality." *J. Irrig. Drain Eng.*, 121(4), 271 -276.
- Fang, Q.X., Malone, R.W., Ma, L., Jaynes, D.B., Thorp, K.R., Green, T.R., Ahuja, L.R. 2012.** Modeling the effects of controlled drainage, N rate and weather on nitrate loss to subsurface drainage. *Agricultural Water Management*. 103:150-161.
- Greenberg, A.E., Lenore S. Clesceri and Andrew D. Eaton. 2005.** Automated phenate method; Automated cadmium reduction method. *Standard methods for examination of water and wastewater*, 21th edition, p. 4-116, 4-125. ISBN 0-87553-207-1.
- Lalonde , V., C.A. Madramootoo, L. Trenholm et R.S. Broughton. 1996.** Effects of controlled drainage on nitrate concentrations in subsurface drain discharge. *Agricultural Water Management* 29:2. Pp. 187 -199.
- Ma, L., Malone, R., Heilman, P., Jaynes, D., Ahuja, L., Saseendran, S., Kanwar, R., et Ascough, J. 2007.** RZWQM simulated effects of crop rotation, tillage, and controlled drainage (...). *Geoderma*, 140(3), 260-271.

- Mejia, M.N., C.A. Madramootoo, R.S. Broughton. 2000.** Influence of water table management on corn and soybean yields. *Agricultural Water Management* 46(1):73-89.
- Michaud, A.R., Lauzier, R., et M.R. Laverdière. 2004.** Temporal and spatial variability in non-point source phosphorous (...). In: *Lake Champlain: partnerships and research in the new millennium*. Kluwer academic/plenum pub. New York NY. Pp. 97-121.
- Michaud, A.R, J. Desjardins, M. Grenier et R. Lauzier. 2009a.** Suivi de la qualité de l'eau des bassins versants expérimentaux Ewing et Aux Castors (...). Rapport final de projet. IRDA. AAC (PASCAA) et MAPAQ. 27 p.
- Michaud, A.R. , J. Deslandes, J. Desjardins et M. Grenier. 2009b.** Réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles. Rapport final de projet. IRDA, MAPAQ, Club du bassin LaGuerre, Dura-Club, Club de fertilisation de la Beauce, FAQDD, CDAQ et PCVC, AAC. 155 p.
- Michaud, A.R, S.-C. Poirier, J. Desjardins, Grenier, M., et I. Saint-Laurent. 2009c.** Évaluation des exportations de surface et souterraines de phosphore en sol drainé. Rapport final de projet. IRDA et MAPAQ, Québec, Québec, 39 p.
- Michaud, A.R., J. Desjardins, N. Coté, I. Beaudin, A. Drouin, S. Seydoux et I. Saint-Laurent. 2012.** Rapport de l'Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles, période de référence 2009-2011. IRDA et MAPAQ. 87 pages.
- Michaud, A.R., S-C Poirier et J.K Whalen. 2018a.** Tile Drainage as a Hydrologic Pathway for Phosphorus Export from an Agricultural Subwatershed. En revision, *Journal of Environmental Quality*.
- Michaud, A.R., M. Macrae, Hanck, K et M.A. Niang. 2018b.** 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. 2018c.** 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.
- Murphy, J., et J.R. Riley. 1962.** A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica. Chim. Acta* 27:31-36.
- Natural Resources Conservation Service (NRCS). 2007.** *Water Management Guide*. NCRS, Part NJ650.14.
- Poirier, S.C., J.K. Whalen et A. R. Michaud. 2012.** Bioavailable Phosphorus in Fine-Sized Sediments Transported from Agricultural Fields. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76:258 -267.

**Sharpley, A.N., W.W. Troeger et S.J. Smith. 1991.** The measurement of bioavailable phosphorus in agricultural runoff. *J. Env. Qual.* 20:235-238.

**Tan, C.S. at T. Q. Zhang. 2011.** Surface runoff and sub-surface drainage phosphorus losses (...). *Revue canadienne de la science du sol*, 2011, 91(3): 349-359.

**Walker, W. 2019.** Simplified Procedures for Eutrophication Assessment and Prediction: User Manual. U.S. Army Corps of Engineers.

**Zhang T.Qq., C.S. Tan, Z.M. Zheng, T. Welacky et Y.T. Wang. 2017.** Drainage water management combined with cover crop (...). *The Science of the Total Environment* 586:362-371.

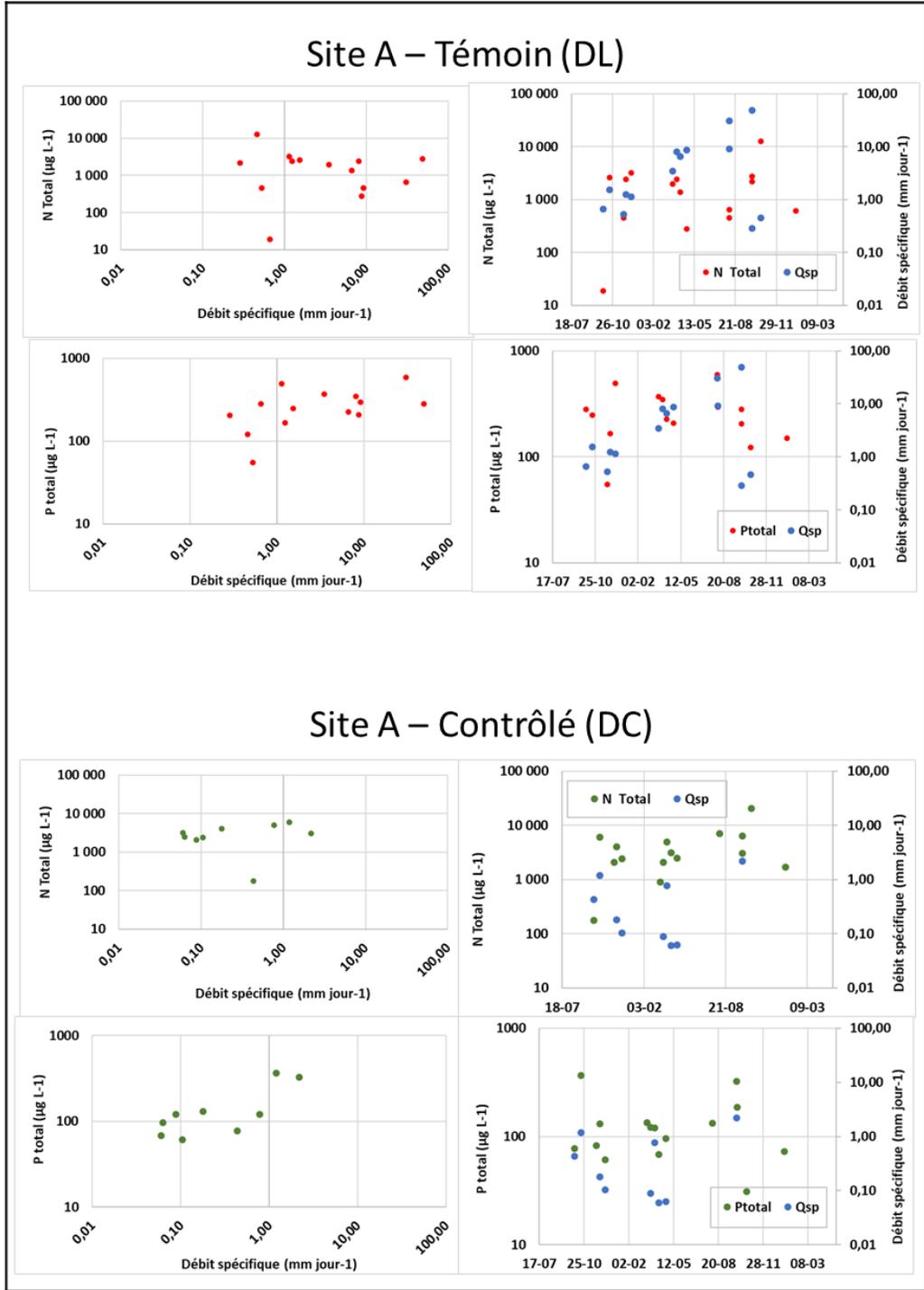
**Zhou, X., Madramootoo, C., MacKenzie, A., Kaluli, J., et Smith, D. (2000).** Corn yield and fertilizer N recovery in water-table-controlled corn -rye-grass systems. *European Journal of Agronomy*, 12(2), 83-92.

## 6 ANNEXES

### Annexe 1. Dates de prélèvements et résultats des dosages analytiques des échantillons.

Site	Élément:	MES	N-NH4	N-NO3+N-NO2	P réactif	P Per.	P	K	Ca	Mg	Na	Conductivité	P NaOH+EDTA
	Unité Date	mg/l	mg/l	mg/l	ug/l	ug/l	ug/l	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	uS/cm à 25	ug/l
Site A - Témoin	2019-10-03 13:00	11	0,019	0	120	282	165	5,46	10,6	3,35	6,30	126	164
	2019-10-18 12:00	161	0	2,62	55	248	59	0,75	36,6	15,1	44,7	501	167
	2019-11-21 12:00	16	0,029	0,43	28	55	24	2,03	79	41,2	184	1565	52
	2019-11-28 12:00	84	0	2,41	30	166	30,7	1,29	40,1	16,4	40	498	80
	2019-12-10 12:00	99	0,43	2,77	137	495	164	6,39	62,5	20,3	53,7	697	350
	2020-03-21 11:15	46	0,504	1,46	120	371	141	0,83	48,6	20,8	51,3	628	216
	2020-03-30 11:00	160	0	2,46	97	347	0,102	3,58	57,9	15,5	56,4	714	251
	2020-04-08 17:30	91	0	1,38	73	227	88,3	4,79	67,7	19,6	58,9	731	198
	2020-04-24 14:00	17	0	0,28	45	209	50	4,09	84,0	25,2	56,8	808	208
	2020-08-05 11:00	348	0,055	0,60	130	592	160	2,25	12,7	4,24	9,15	136	376
	2020-08-06 17:00	24	0,113	0,34	201	297	232	5,16	66,7	18,8	56,3	688	236
	2020-09-30 10:00	198	0,255	2,53	31	282	46,2	1,04	28,3	11,3	34,4	372	71
	2020-10-01 10:00	112	0,099	2,08	17	204	34,5	1,56	58,1	26,1	109	995	102
	2020-10-22 11:00	5	0	12,6	94	122	0,099	12,9	112	27,5	6,39	801	104
	2021-01-15 09:45	36	0,19	0,43	21	150	153	21	3,04	76,2	24,3	56,5	792
	2021-05-11 09:15	77	0,122	0,25	179	362	0,219	5,80	77,6	24,9	58,6	796	269
Site A - Contrôlé	2019-10-03 13:00	20	0,066	0,11	4	77	15,2	1,84	37,7	20,2	79,9	718	31
	2019-10-18 12:00	188	0	6,00	93	367	102	1,88	43,3	16,3	47,5	553	254
	2019-11-21 12:00	12	0	2,11	46	82	46	3,63	76	34,5	157	1361	67
	2019-11-28 12:00	44	0	4,07	46	131	50,1	3	52,1	20,9	69,6	720	87
	2019-12-10 12:00	0	0	2,43	34	61	34,5	3,98	88,9	39,2	163	1465	49
	2020-03-13 15:45	13	0	0,9	75	134	89	2,21	27,1	10,6	50,0	457	107
	2020-03-21 11:30	8	0,033	2,05	57	121	70,9	1,58	50,2	22,2	68,9	713	85
	2020-03-30 11:15	228	0,269	4,67	62	120	0,069	3,93	72,4	29,4	109	1151	77
	2020-04-08 17:45	0	0,037	3,10	46	68	50,0	4,66	95,2	40,0	162	1524	66
	2020-04-24 14:00	0	0,08	2,40	54	96	65	4,51	103	45,0	179	1666	69
	2020-08-06 17:00	0	0	7,04	98	133	105	9,21	105	32,3	127	1311	101
	2020-09-30 10:15	108	0,288	2,73	20	325	38,3	2,34	37,3	14,4	49,7	515	89
	2020-10-01 10:00	53	0,033	6,36	45	185	60,4	6,50	103	32,6	105	1226	115
	2020-10-22 11:15	6	0	20,4	17	31	0,017	3,34	116	25,5	7,96	806	27
	2021-01-15 08:45	0	0	1,69	40	73	84	22	4,18	82,4	44,9	180	1665
	2021-05-11 09:15	0	0,027	6,06	50	74	0,050	5,41	109	45,8	174	1661	50
Site B - Témoin	2019-10-03 14:00	51	0,091	5,6	127	286	146	4,6	49,9	11	2,49	349	207
	2019-10-18 12:00	0	0	13,7	102	142	115	18,1	103	22,0	6,26	710	127
	2019-11-21 12:00	0	0,029	14,7	36	49	35	20,9	137	33,7	8,88	952	48
	2019-11-28 12:00	0	0,167	19,6	64	104	64	12,5	121	29,5	6,51	833	86
	2019-12-10 12:00	0	0,001	18,2	36	50	36,6	18,1	144	37,6	9,38	992	48
	2020-03-13 16:30	152	0	8,54	142	417	168	4,88	57,6	11,6	2,42	381	301
	2020-03-21 12:15	0	0	10,3	59	113	67,2	5,63	96,6	23,7	4,58	635	92
	2020-04-08 12:45	0	0	11,2	27	43	34,7	6,98	110	27,7	5,54	739	37
	2020-04-24 14:00	0	0,17	11,7	50	61	59	8,29	123	31,9	7,11	824	57
	2020-08-05 11:30	114	0,078	11,7	167	314	199	10,7	83,8	16,1	4,02	549	226
	2020-08-06 18:00	0	0	15,0	68	92	72,9	22,6	131	29,6	7,79	891	86
	2020-09-30 09:45	0	0,062	20,1	25	73,0	34,1	3,10	104	20,4	7,26	690	46
	2020-10-01 09:00	12	0	16,2	19	58,0	19,6	3,85	123	25,9	8,99	801	41
	2020-10-09 11:00	0	0,024	13,4	49	59,0	55,0	20,9	141	34,8	10,8	982	50
	2020-10-19 13:00	2	0,023	15,4	43	53	62	42	18,6	134	34,3	8,36	919
	2020-10-20 11:00	2	0	16,1	44	56	0,038	18,6	129	33,4	8,41	938	45
2020-10-22 12:00	2	0,054	17,4	34	46	0,035	10,3	113	32,0	6,52	826	44	
2021-01-15 11:00	0	0	15,5	48	96	125	13	57,5	94,2	42,3	23,0	1252	
2021-03-30 12:00	78	0	1,93	56	188	0,062	1,07	37,8	15,7	44,8	527	98	
2021-05-11 10:00	0	0,018	18,7	31	39	0,029	10,1	125	33,3	8,04	870	33	
Site B Contrôlé	2019-10-03 13:00	17	0,238	3,56	144	215	173	3,27	26,0	4,75	1,70	187	178
	2019-10-18 12:00	21	0	14,4	18	57	13	3,63	107	20,0	7,20	683	41
	2019-11-21 12:00	0	0	15,1	12	19	7	3,70	120	26,0	9,60	779	19
	2019-11-28 12:00	21	2,35	18,8	26	243	94,7	8,58	117	25,6	8,72	808	43
	2019-12-10 12:00	0	0,027	16,0	13	38	7,82	3,62	126	29,6	9,09	820	21
	2020-03-13 17:00	66	0	5,86	192	354	227	3,60	37,6	7,49	2,52	263	272
	2020-03-21 12:00	0	0	14,3	40	71	48,2	2,95	107	23,0	6,69	685	62
	2020-04-08 12:30	0	0	13,9	31	48	43,3	3,43	114	24,6	7,71	735	47
	2020-08-05 11:45	0	0	23,0	30	70	37	3,37	113	20,8	6,49	720	47
	2020-08-06 18:00	0	0	19,2	18	37	16,8	3,75	127	25,8	7,82	814	26
	2020-09-30 09:00	13	0,136	11,5	268	381	308	17,9	87,6	18,1	5,75	619	345
	2020-10-01 09:00	0	0,043	16,2	102	126	116	25,5	123	27,5	8,48	871	114
	2020-10-09 10:45	0	0	15,9	12	27,0	10,2	4,48	135	30,1	10,7	883	13
	2020-10-19 12:30	1	0,029	19	12	26	30	0	3,93	129	27,8	9,48	836
	2020-10-20 10:45	1	0	18,4	17	40	0,001	3,39	98,8	30,0	9,56	875	30
	2020-10-22 12:15	722	0	15,9	23	918	0,016	3,78	105	29,9	9,22	833	173
2021-01-15 11:30	0	0	15,6	13	39	47	0	3,83	91,1	34,4	11,9	893	
2021-03-30 12:15	49	0	4,89	73	155	0,077	3,74	64,6	22,8	64,5	815	105	
2021-05-11 09:45	12	0,033	17,0	9	54	0,005	3,99	118	29,7	10,0	805	12	

Annexe 2. Concentrations observées en azote (total ammoniac et nitrates) et en phosphore total en fonction de la date et du débit spécifique des collecteurs de drains des champs contrôlé (DC) et sous drainage libre (DL) au site A.



Annexe 3. Concentrations observées en azote (total ammoniac et nitrates) et en phosphore total en fonction de la date et du débit spécifique des collecteurs de drains des champs contrôlé (DC) et sous drainage libre (DL) au site B.

