

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

Rapport final

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

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

Département des sciences de la Terre et de l'atmosphère

26 janvier 2024

Équipe de réalisation

Auteurs du rapport

Marie Larocque	Responsable du projet, professeure, UQAM
Julien Chéné	Étudiant à la maîtrise, UQAM
Jonathan Chabot-Grégoire	Agent de recherche, UQAM

Référence à citer

Larocque, M., Chéné, J., Chabot-Grégoire, J. 2024. Évaluation des scénarios de gestion intégrée et soutenable de l'eau dans le complexe tourbeux de Lanoraie (SCELANEAU) – Eau souterraine. Rapport final. Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec. 37 p.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	iii
LISTE DES TABLEAUX	v
1 INTRODUCTION	1
2 MÉTHODOLOGIE	2
2.1 Secteur étudié	2
2.2 Instrumentation	4
2.3 Conductivité hydraulique du sable	6
2.4 Modèle géologique conceptuel	6
2.5 Estimation de la recharge	7
2.6 Modèle d'écoulement souterrain	8
2.7 Analyse par scénarios	10
3 RÉSULTATS ET DISCUSSION	12
3.1 Contexte hydrogéologique	12
3.2 Directions d'écoulement	14
3.3 Recharge de la nappe	17
3.4 Variations de niveaux	18
3.5 Facteurs qui influencent l'effet des pompages sur la nappe	21
4 SYNTHÈSE ET CONCLUSION	27
5 RÉFÉRENCES	29
6 ANNEXE 1 – Chroniques de niveaux de juin 2021 à octobre 2023	31

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Complexe tourbeux de Lanoraie avec le secteur du coteau Saint-Henri (encadré jaune)	3
Figure 2. Précipitation, évapotranspiration potentielle et température (2021, 2022, 2023 et moyennes) dans la zone d'étude.....	4
Figure 3. Secteur instrumenté	5
Figure 4. Dispositif pour mesurer le niveau de l'eau dans les étangs (Chéné, 2024).....	6
Figure 5. Méthode de fluctuation des niveaux de nappe (Chéné, 2024).....	7
Figure 6. Zone modélisée (Chéné, 2024).....	9
Figure 7. Schématisation des flux d'eau souterraine à proximité des étangs (modifié de Chéné, 2024)	11
Figure 8. Localisation des coupes géologiques pour les transects 1 à 4 à l'échelle du complexe tourbeux (Chéné, 2024).....	12
Figure 9. Coupes géologiques à l'échelle du complexe tourbeux a) transect 1, b) transect 2, c) transect 3, d) transect 4 (Chéné, 2024)	13
Figure 10. Conductivités hydrauliques a) essais de perméabilité <i>in situ</i> et b) valeurs dérivées des analyses granulométriques (Chéné, 2024).....	14
Figure 11. Localisation des coupes hydrostratigraphiques pour les transects 5 à 8 à l'échelle du coteau Saint-Henri (Chéné, 2024).....	15
Figure 12. Coupes hydrostratigraphiques à l'échelle du coteau Saint-Henri a) transect 5, b) transect 6, c) transect 7, d) transect 8 (Chéné, 2024).....	16
Figure 14. Rabattements observés en réaction aux pompages dans les étangs a) en 2021 b) en 2022 et c) en 2023 (Chéné, 2024).....	20
Figure 15. Différences de niveaux aux stations dans le sable, la tourbe et les étangs en fonction des saisons de 2021 à 2023 (Chéné, 2024)	21
Figure 16. Scattergramme des charges simulées en régime permanent en fonction des charges mesurées (Chéné, 2024).....	22
Figure 17. Effet sur les charges de changements a) de la recharge et b) de la conductivité hydraulique (SC et A1 à A8) (Chéné, 2024).....	23

Figure 18. Effet des pompages sur les charges simulées pour les scénarios faisant varier le débit pompé dans les étangs (SC, 2P, 2P2x, 2P3x) a) sur le transect 5 et b) sur le transect 7 (Chéné, 2024).....25

Figure 19. Effet des pompages sur les charges simulées pour les scénarios faisant varier le nombre et la position des pompages (SC, 2P, 5P, 10P, 20P) a) sur le transect 5 et b) sur le transect 7 (Chéné, 2024)25

Figure 20 : Niveaux dans les piézomètres situés dans le sable, de juin 2021 à octobre 202331

Figure 21 : Niveaux dans les piézomètres situés dans la tourbe, de juin 2021 à octobre 202331

Figure 22 : Niveaux dans les piézomètres situés dans les étangs, de juin 2021 à octobre 202331

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Description des scénarios d'analyse de sensibilité et de pompages.....	11
Tableau 2. Recharge calculée avec la méthode de fluctuations des niveaux de nappe.....	17
Tableau 3. Changements dans les flux du sable vers l'étang (ΔV_{se}) et du flux de l'étang vers le sable (ΔV_{es}) des étangs, entre les scénarios de pompage (2P, 2P2x, 2P3x, 5P, 10P et 20P) et le scénario calibré (SC) (Chéné, 2024)	26

1 INTRODUCTION

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

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

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

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

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

2 MÉTHODOLOGIE

2.1 Secteur étudié

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

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

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

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

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

Une agriculture maraîchère intensive est pratiquée sur les coteaux sableux, incluant pommes de terre, asperges, canneberges, courges et petits fruits, mais d'autres types de cultures sont également présentes (maïs, vignes, pépinières, pelouse). Plusieurs cultures maraîchères nécessitent de l'irrigation pour laquelle l'eau est prélevée dans des étangs agricoles dont la majorité est située près du contact aquifère – tourbière. Des prélèvements pour l'irrigation sont aussi faits dans les cours d'eau.

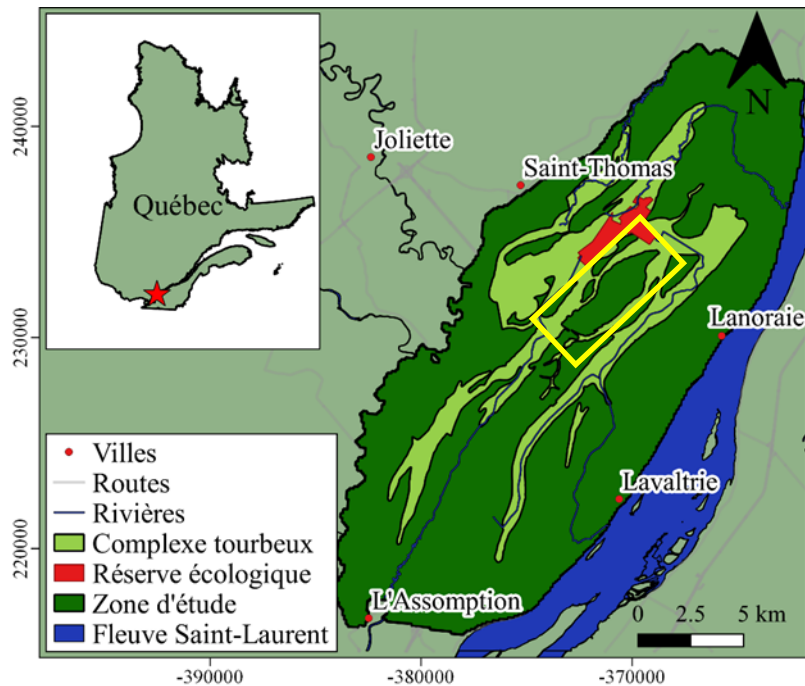


Figure 1. Complexe tourbeux de Lanoraie avec le secteur du coteau Saint-Henri (encadré jaune)

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

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

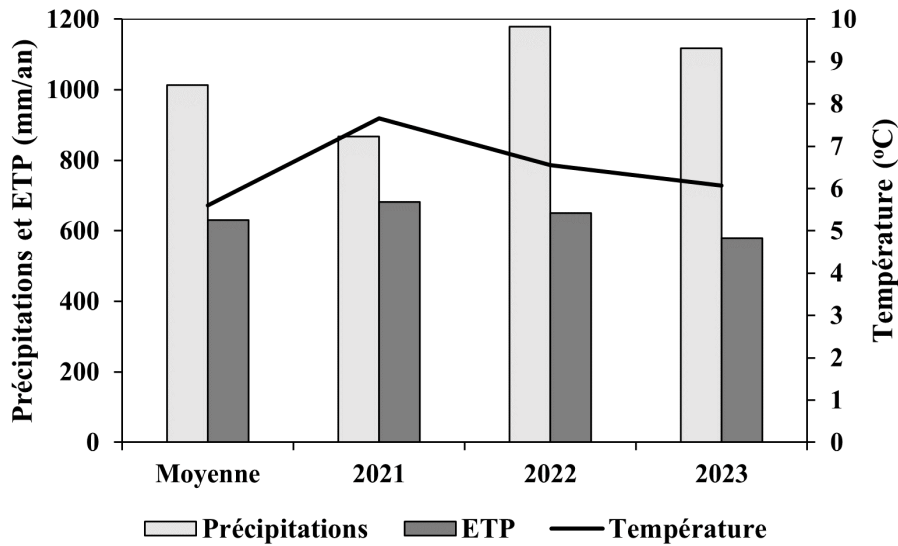


Figure 2. Précipitation, évapotranspiration potentielle et température (2021, 2022, 2023 et moyennes) dans la zone d'étude

2.2 Instrumentation

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

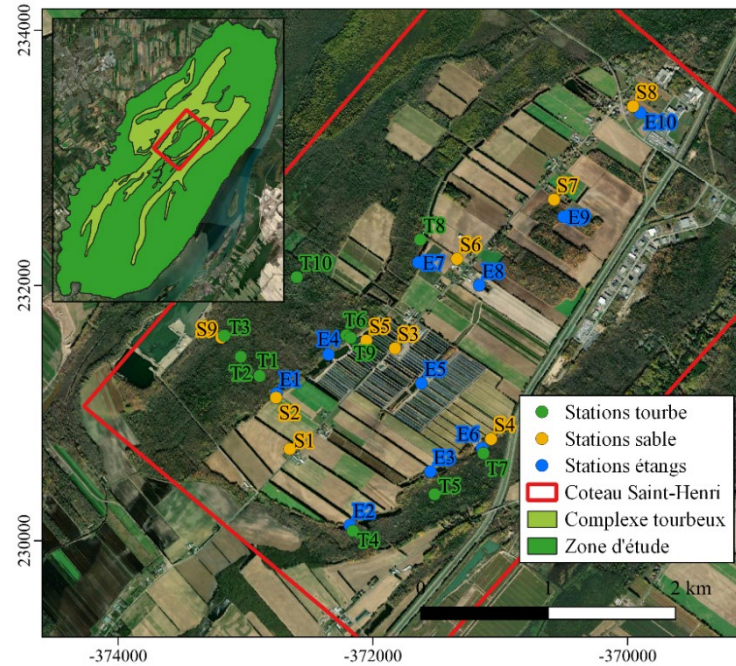


Figure 3. Secteur instrumenté

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

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

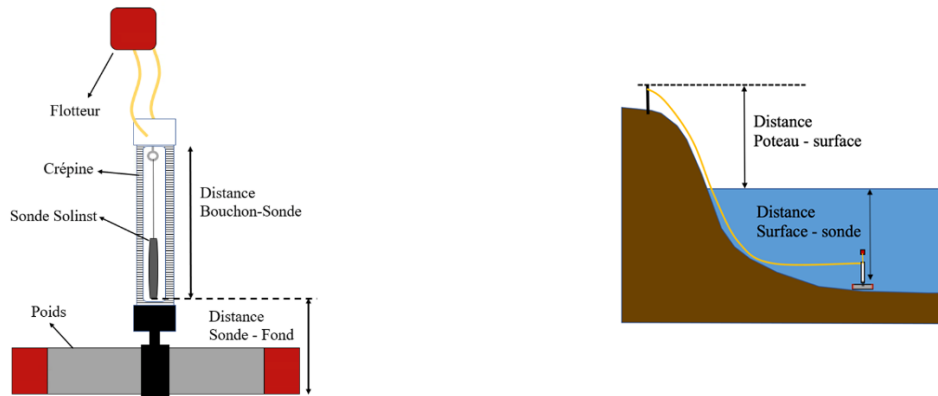


Figure 4. Dispositif pour mesurer le niveau de l'eau dans les étangs (Chéné, 2024)

2.3 Conductivité hydraulique du sable

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

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

2.4 Modèle géologique conceptuel

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

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

2.5 Estimation de la recharge

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

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

R = recharge (mm/jour)

S_y = coefficient d'emménagement (-)

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

Δt = durée de la hausse (jour)

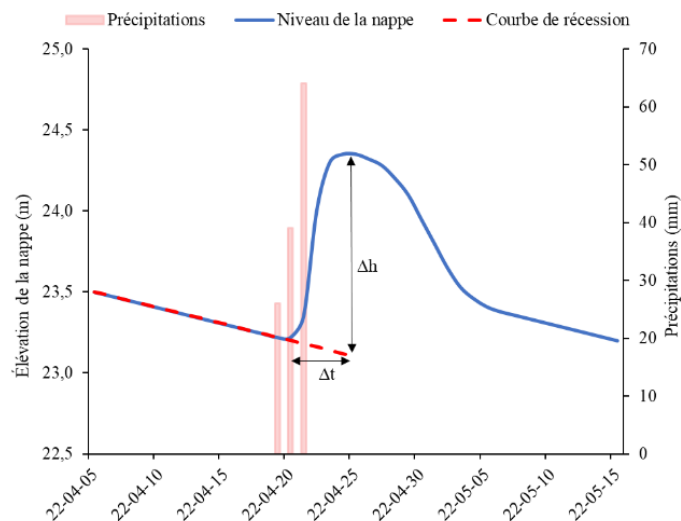


Figure 5. Méthode de fluctuation des niveaux de nappe (Chéné, 2024)

2.6 Modèle d'écoulement souterrain

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

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

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

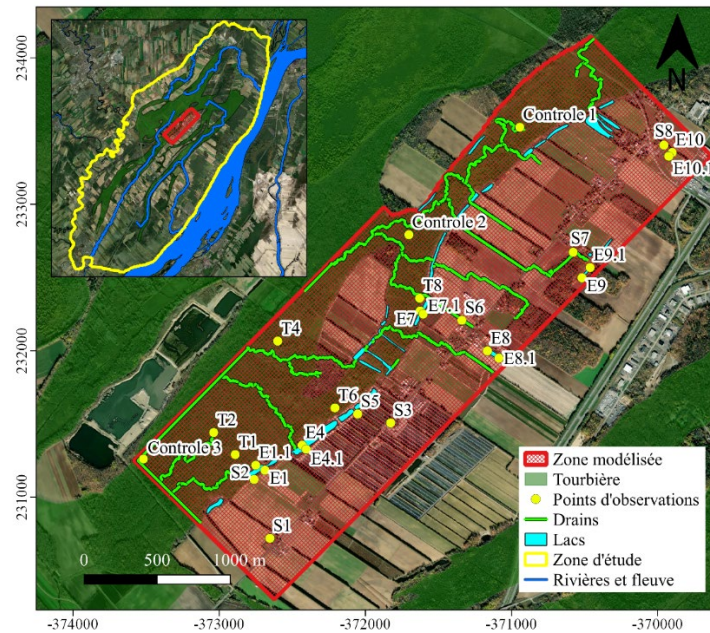


Figure 6. Zone modélisée (Chéné, 2024)

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

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

2.7 Analyse par scénarios

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

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

Plusieurs scénarios ont été utilisés pour approfondir la compréhension du modèle (Tableau 1). Ces scénarios incluent le modèle calibré (SC), deux scénarios de variation de la recharge seule qui représentent des conditions météorologiques plus sèches (A1) et plus humides (A2), deux scénarios de variation de la conductivité hydraulique du sable qui représentent des conditions moins perméables (A4) et plus perméables (A7), ainsi que des scénarios combinant des variations à la fois de la recharge et de la conductivité hydraulique (A3, A5, A6 et A8). Trois scénarios avec pompage aux étangs E1 et E7 seulement ont été testés avec le pompage de référence qui produit les rabattements observés dans ces étangs (2P), avec un débit deux fois plus grand (2P2x) et avec un débit trois fois plus grand (2P3x). Trois autres scénarios avec le pompage de référence ont été testés à cinq étangs situés sur la crête du coteau sans pompage à E1 et E7 (5P), dix étangs dont cinq sur la crête (E8, E9 et E10, incluant deux autres étangs non instrumentés près du E9) et cinq étangs près de la tourbière incluant E1 et E7 (10P), et vingt étangs dont cinq sur la crête et quinze près de la tourbière incluant E1 et E7 (20P).

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

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

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

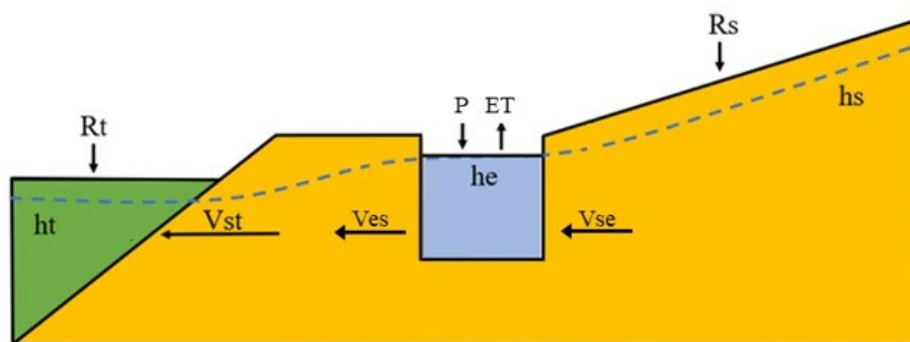


Figure 7. Schématisation des flux d'eau souterraine à proximité des étangs (modifié de Chéné, 2024)

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Contexte hydrogéologique

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

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

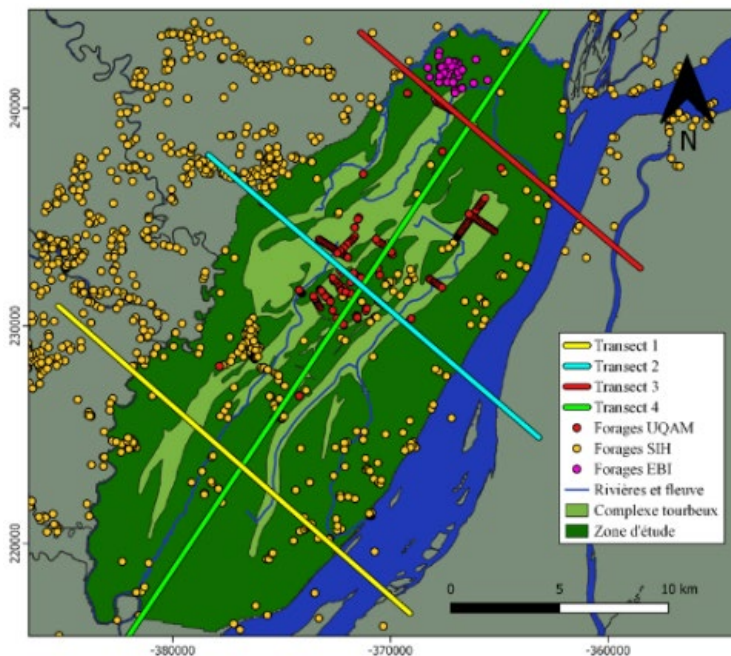


Figure 8. Localisation des coupes géologiques pour les transects 1 à 4 à l'échelle du complexe tourbeux (Chéné, 2024)

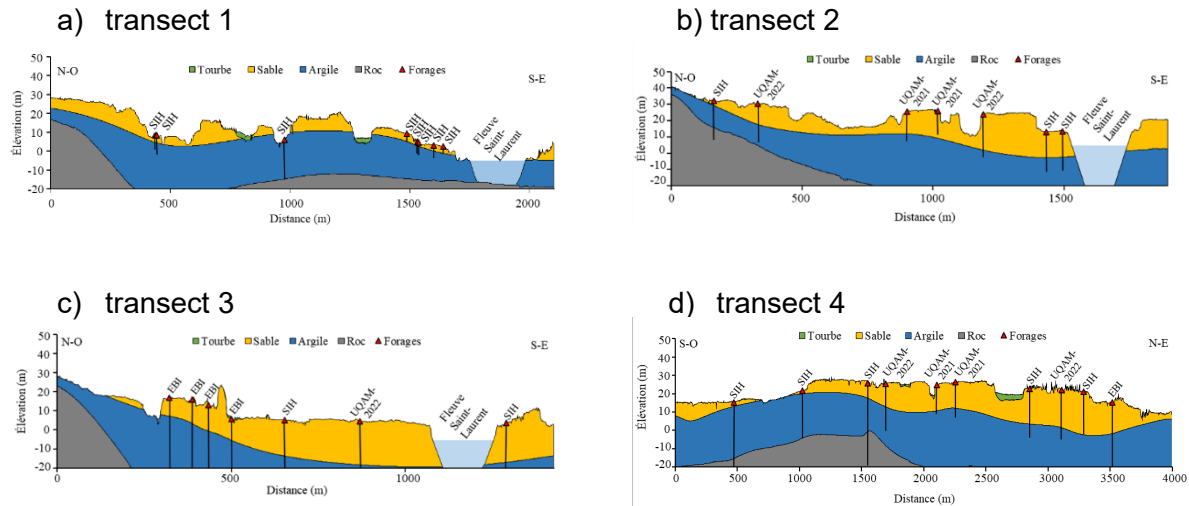


Figure 9. Coupes géologiques à l'échelle du complexe tourbeux a) transect 1, b) transect 2, c) transect 3, d) transect 4 (Chéné, 2024)

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

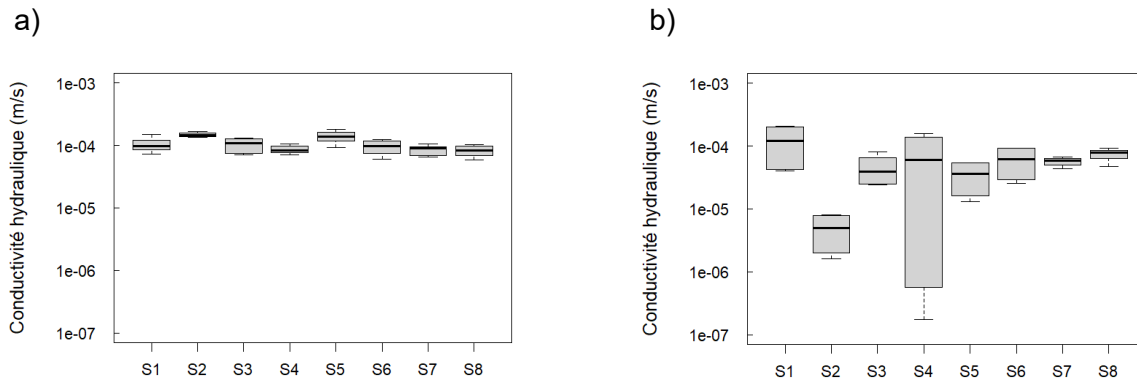


Figure 10. Conductivités hydrauliques a) essais de perméabilité *in situ* et b) valeurs dérivées des analyses granulométriques (Chéné, 2024)

3.2 Directions d'écoulement

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

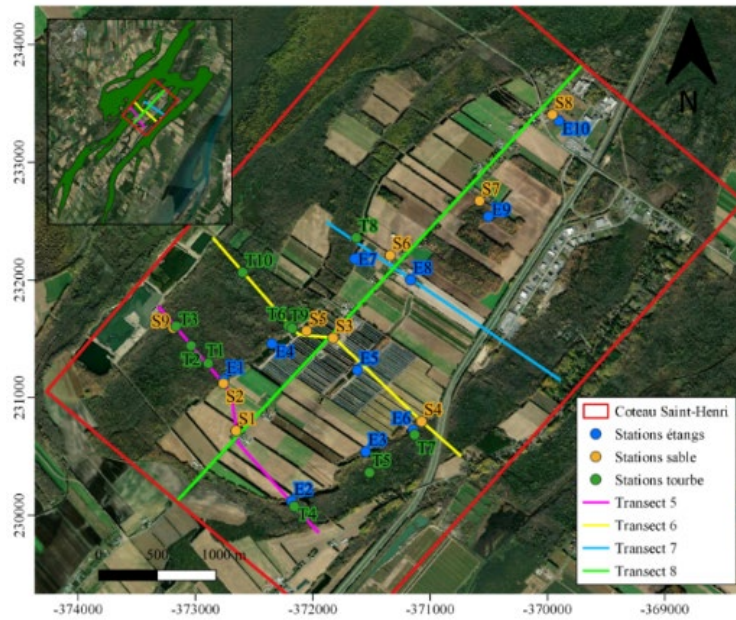


Figure 11. Localisation des coupes hydrostratigraphiques pour les transects 5 à 8 à l'échelle du coteau Saint-Henri (Chéné, 2024)

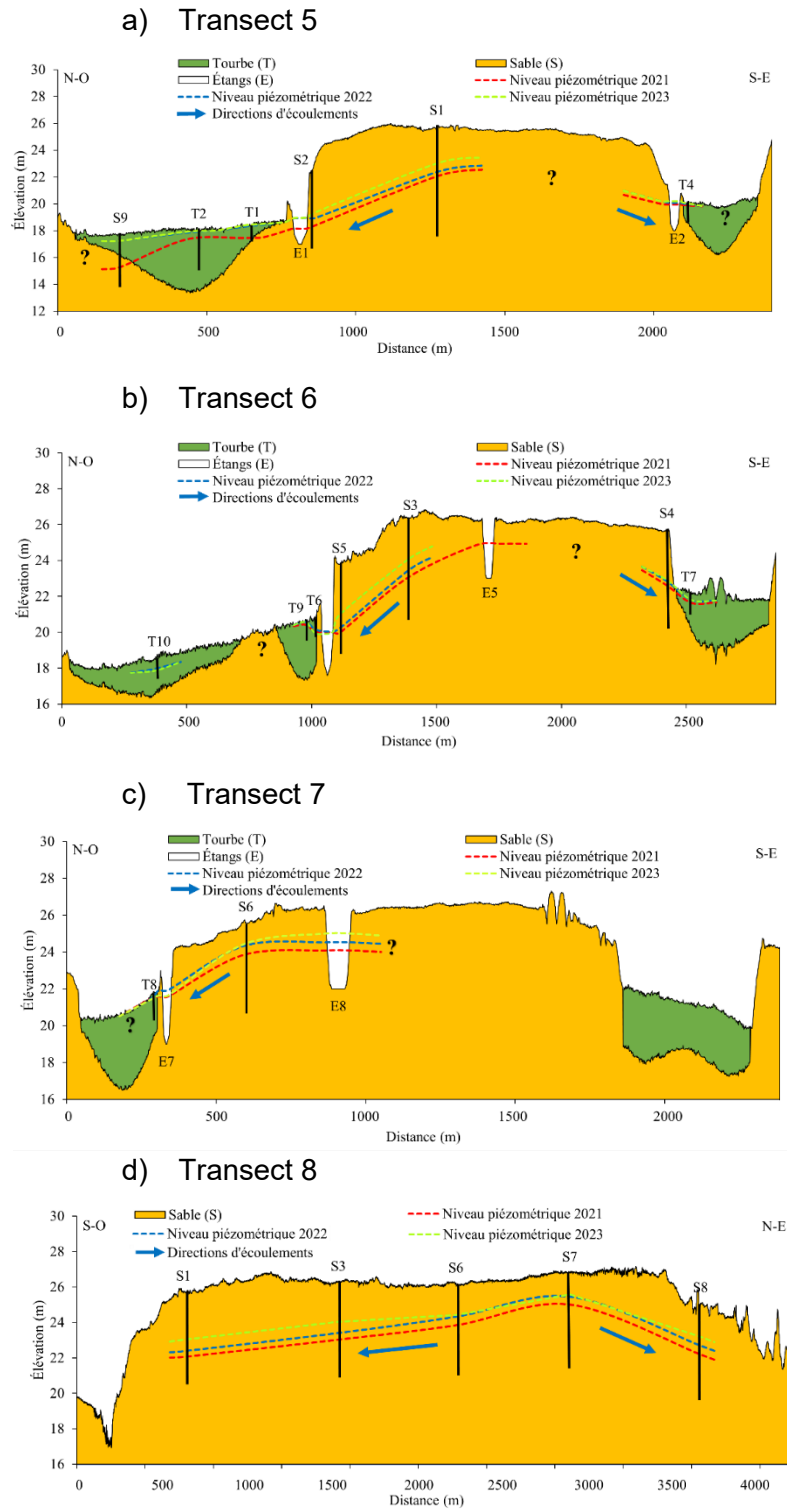


Figure 12. Coupes hydrostratigraphiques à l'échelle du coteau Saint-Henri a) transect 5, b) transect 6, c) transect 7, d) transect 8 (Chéné, 2024)

3.3 Recharge de la nappe

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

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

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

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

3.4 Variations de niveaux

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

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

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

Il est intéressant d'examiner de plus près les rabattements induits dans les étangs par les pompages au cours des étés 2021 (étangs E1, E3, E5 et E7), 2022 (E2, E3, E8 et E9) et 2023 (E1, E3 et E7) (Figure 14). Il y a eu plus d'événements de pompages en 2021 qu'en 2022 et plus de pompages en 2022 qu'en 2023. La période pendant laquelle des pompages ont été réalisés a été plus longue en 2021 (de juin à octobre), en raison des conditions sèches et chaudes de l'été. Les pompages de 2022 ont eu lieu entre la fin juin et la mi-août seulement. En 2023, les étangs instrumentés ont été pompés entre mai et la mi-juillet, ce qui reflète les conditions très humides de la deuxième moitié de l'été. La durée des pompages varie de 3 à 22 h en 2021, de 5 à 31 h en 2022 et de 4 à 18 h en 2023. Le rabattement mesuré lors des pompages de 2021 varie de 0.06 m (E3, E5, E7) à 0.55 m (E5). Pour l'année 2022, les rabattements dans les étangs ont varié entre 0.16 (E2) et 0.84 m (E9) et en 2023, ils ont varié de 0.04 m (E7) à 0.24 m (E1). Les baisses de niveau à l'étang E9 ont été plus grandes que celles observées dans tous les étangs en 2021 et en 2022, à l'exception de l'étang E8 pompé en 2022. Les baisses de niveau dans les étangs E1 et E7 sont sensiblement les mêmes en 2021 et en 2023, mais la saison de 2023 a été beaucoup plus courte. Celles de l'étang E3 (seul étang pompé les trois années) sont similaires en 2022 et 2023, mais plus élevées en 2021.

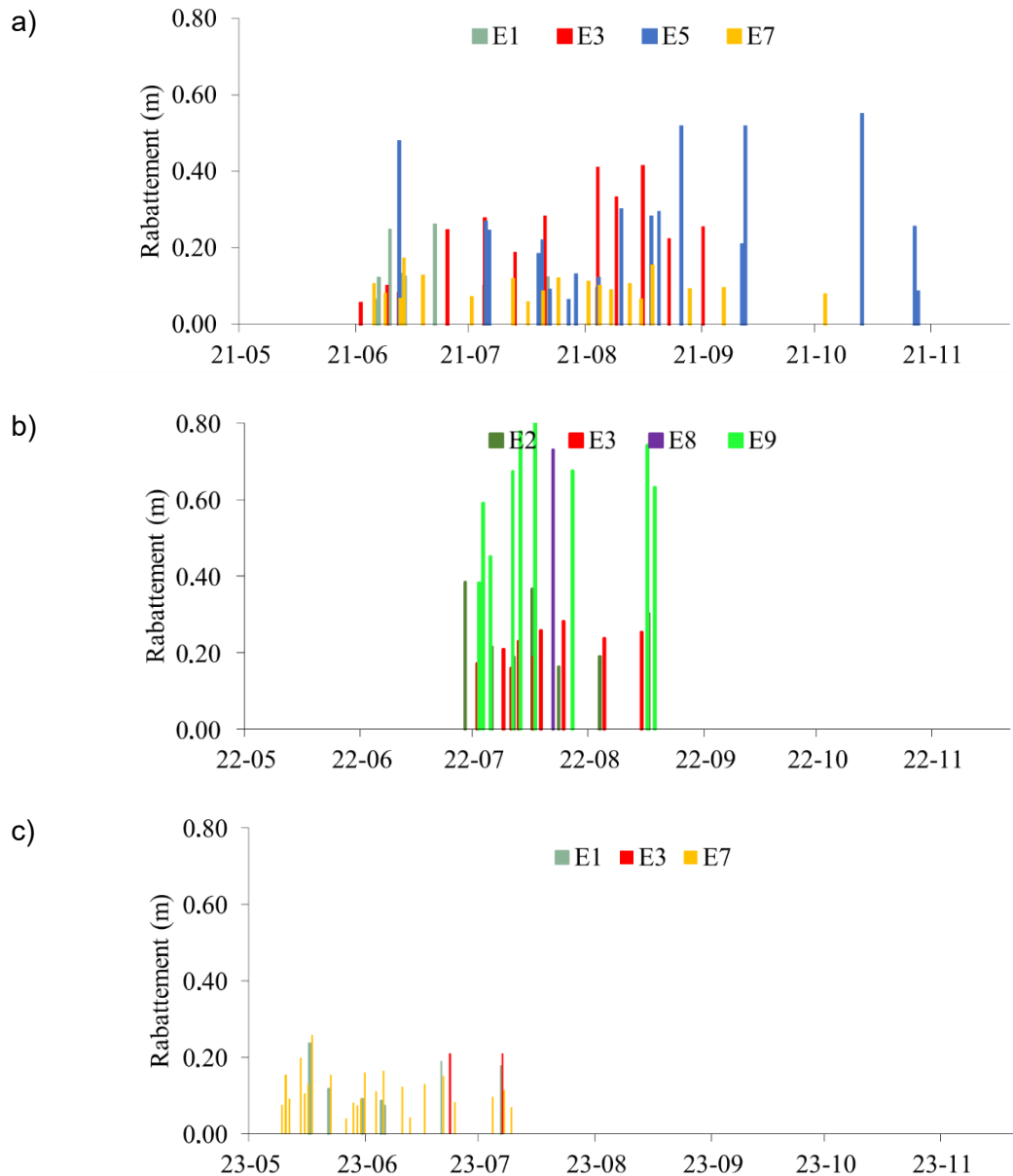


Figure 13. Rabattements observés en réaction aux pompages dans les étangs a) en 2021 b) en 2022 et c) en 2023 (Chéné, 2024)

Les différences de niveaux entre le début et la fin des saisons permettent de visualiser les variations temporelles de niveaux sur de plus longues périodes (Figure 15 ; été = juin à août, automne = septembre à novembre, hiver = décembre à février, printemps = mars à mai). Les différences entre le niveau du début et de la fin des saisons confirment qu'à l'exception de l'été 2021, les variations de niveaux dans le sable sont plus importantes que celles dans la tourbe. Les variations dans les étangs sont généralement supérieures (automne 2021, printemps 2022, été 2022, automne 2022 et hiver 2023), mais aussi parfois à peu près égales (été 2021, hiver 2022)

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

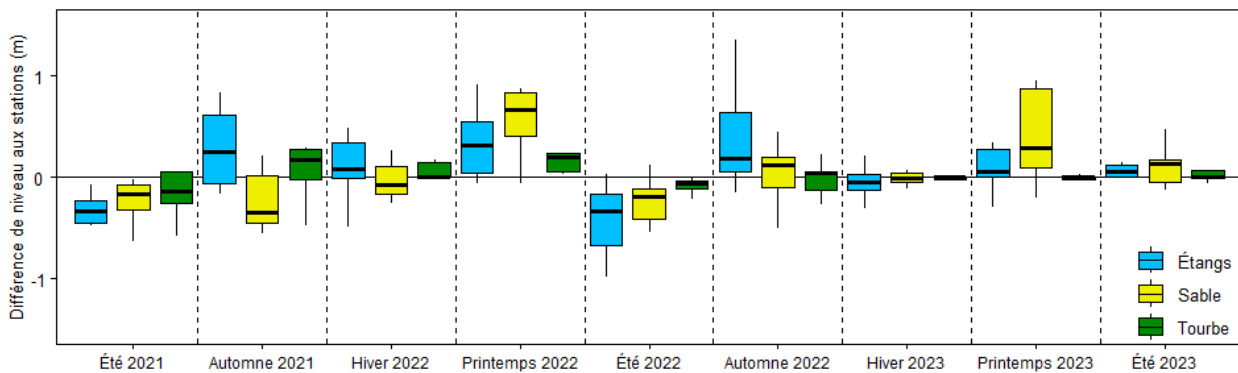


Figure 14. Différences de niveaux aux stations dans le sable, la tourbe et les étangs en fonction des saisons de 2021 à 2023 (Chéné, 2024)

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

Le modèle calibré en régime permanent a permis de reproduire les charges moyennes mesurées de manière satisfaisante : $R^2 = 0.97$, $EM = 0.04$ m (erreur moyenne), $EMA = 0.26$ m (erreur moyenne absolue), $RMSE = 0.15$ m (erreur quadratique moyenne) (Figure 16). Le modèle parvient donc à représenter de manière générale et sans biais les charges moyennes mesurées dans le sable, dans la tourbe et dans les étangs. Ce modèle a servi de base à des analyses permettant de mieux comprendre l'effet des pompages sur la nappe.

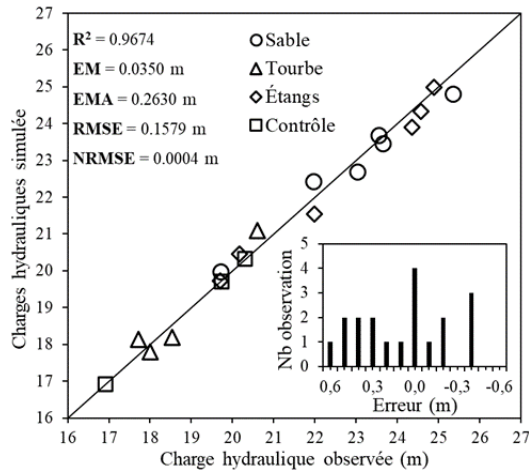


Figure 15. Scattergramme des charges simulées en régime permanent en fonction des charges mesurées (Chéné, 2024)

Sans surprise, une augmentation de la recharge (p.ex. pendant une année humide) fait augmenter les charges et vice-versa, et les résultats sont très similaires sur les deux transects (Figure 17). Ceci indique qu'avec une recharge plus élevée, les apports d'eau souterraine aux étangs et les flux alimentant la tourbière sont plus importants, entraînant un potentiel plus élevé de pompage dans les étangs. À l'inverse, une recharge plus faible réduit les niveaux et peut entraîner une réduction des débits qui peuvent être pompés. Les résultats montrent qu'une variation de la recharge a un effet beaucoup plus important sur les charges dans la tourbe que sur celles dans le sable, ce qui concorde avec les observations *in situ* dans les piézomètres. Si les conductivités hydrauliques sont plus faibles (p.ex. si elles ont été surestimées par les analyses réalisées dans le projet), les charges sont plus élevées et vice-versa.

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

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

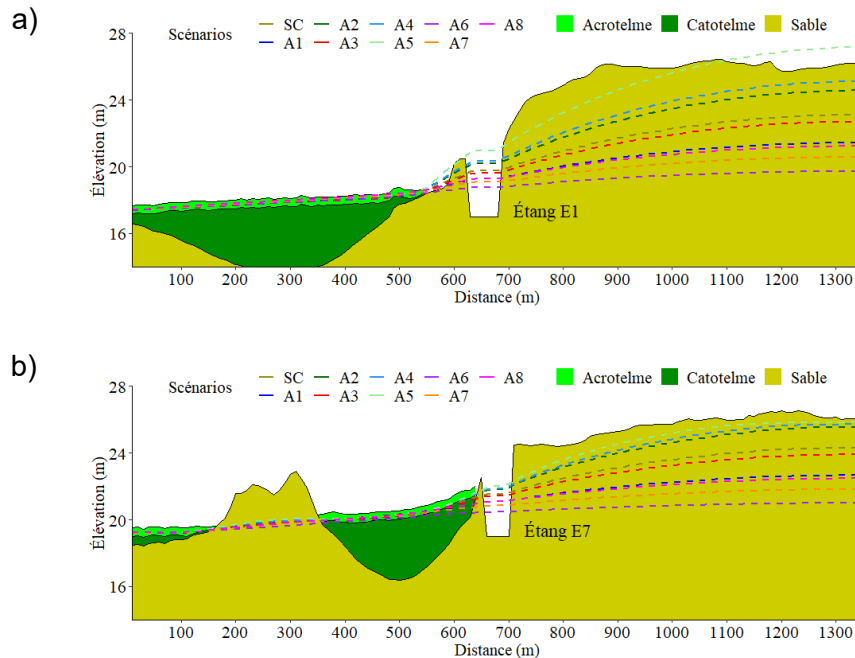


Figure 16. Effet sur les charges de changements a) de la recharge et b) de la conductivité hydraulique (SC et A1 à A8) (Chéné, 2024)

L'imposition d'un débit de référence (2P) et l'augmentation du débit pompé (2P2x et 2P3x) entraînent une diminution des niveaux dans le sable en amont et en aval des étangs (Figure 18a). En comparaison avec le scénario calibré (SC), les flux entrants du sable aux étangs augmentent lorsque le pompage est plus important, car le gradient hydraulique entre le sable et l'étang augmente, et les flux sortants de l'étang vers le sable diminuent de manière importante, car le gradient hydraulique entre l'étang et le sable en aval diminue. Pour les étangs E1 et E7 qui sont situés très près de la tourbière, ces flux sortants représentent aussi les flux entrants dans la tourbe (Tableau 3). Le débit extrait de l'étang provient donc en partie du sable sur le coteau Saint-Henri et d'une diminution de l'apport d'eau souterraine à la tourbière. Dans le scénario 2P3x, le ΔV_{es} atteint 100%, ce qui signifie que l'étang a atteint la même charge hydraulique que la tourbière et qu'il n'y a donc plus d'eau qui s'écoule de cet étang vers la tourbe. Lorsque le pompage est important (p.ex. 2P3x sur le transect 7), le niveau dans l'étang peut être inférieur à celui dans la tourbière et le flux se fait de la tourbière vers l'étang (Figure 18b), mais ceci n'est visible que

lorsque le débit est important. Ces résultats montrent que le pompage dans un étang à proximité de la tourbière réduit l'apport d'eau souterraine à la tourbière. Ceci s'applique aux scénarios testés, mais est sans doute généralisable à tout pompage dans les étangs situés à proximité de la tourbière.

Les transects montrent que les pompages sur la crête ont un impact moindre sur les flux entrants et sortants de la tourbière que ceux en bordure de la tourbière (2P contre 5P) (Figure 19a et b). L'étang E1 est moins affecté par les cinq pompages sur la crête que le E7, car les pompages sont plus loin de E1 que de E7. Il convient toutefois de rappeler que les étangs situés sur la crête sont positionnés très près de la limite du modèle et que, pour cette raison, les rabattements liés aux pompages qui y sont imposés pourraient ne pas être représentatifs de la réalité. Pour un même débit pompé (2P comparativement à 10P et 20P), une augmentation du nombre de pompages à proximité de l'étang a un effet accru sur les charges dans le système.

Il est intéressant de noter (Figure 18 et Figure 19) que l'effet du pompage dans l'étang s'atténue rapidement dans la tourbe, du fait de la capacité d'emmagasinement importante des dépôts organiques. En pratique, les pompages ne sont pas nécessairement en opération simultanément et de manière continue dans tous les étangs, ce qui pourrait en réduire l'impact sur les charges dans la tourbe. Les effets de la mise en opération intermittente des pompages sur les charges ne peuvent être inférés par le modèle en régime permanent. Également, les effets des baisses de flux entrants à la tourbière sur la végétation proche de l'interface tourbe-sable ne peuvent pas être quantifiés à partir des résultats du modèle. D'autres études ont toutefois montré que le complexe tourbeux de Lanoraie a vu une augmentation très marquée de la végétation ligneuse depuis les années 1950 (Pellerin et al., 2016). Il a été suggéré que la baisse des niveaux de nappe dans le sable au fil des décennies pourrait être une cause possible de ces changements. Des études complémentaires devront être menées pour identifier les seuils de rabattement à ne pas dépasser dans le sable, dans les étangs et dans la nappe, pour minimiser les impacts sur la végétation dans la tourbière.

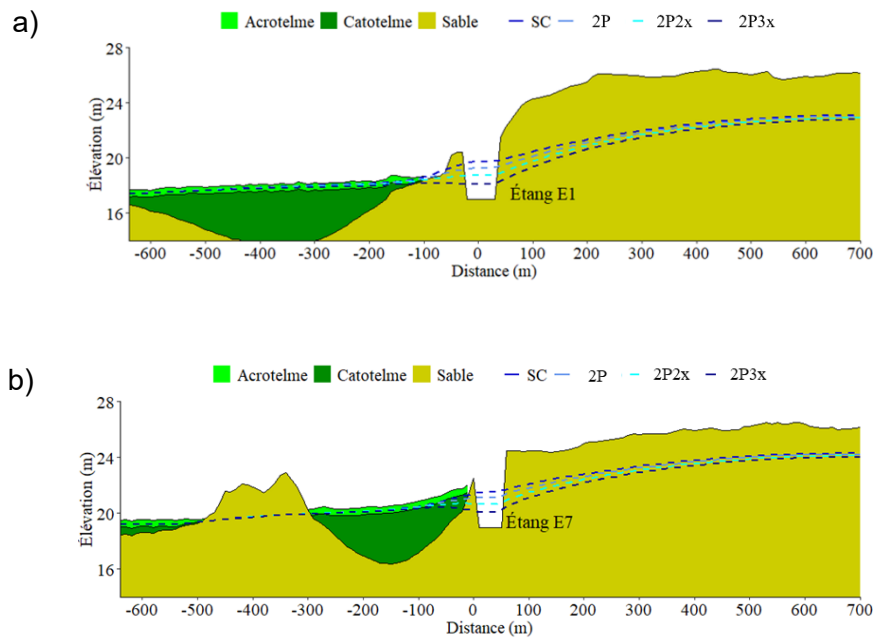


Figure 17. Effet des pompages sur les charges simulées pour les scénarios faisant varier le débit pompé dans les étangs (SC, 2P, 2P2x, 2P3x) a) sur le transect 5 et b) sur le transect 7 (Chéné, 2024)

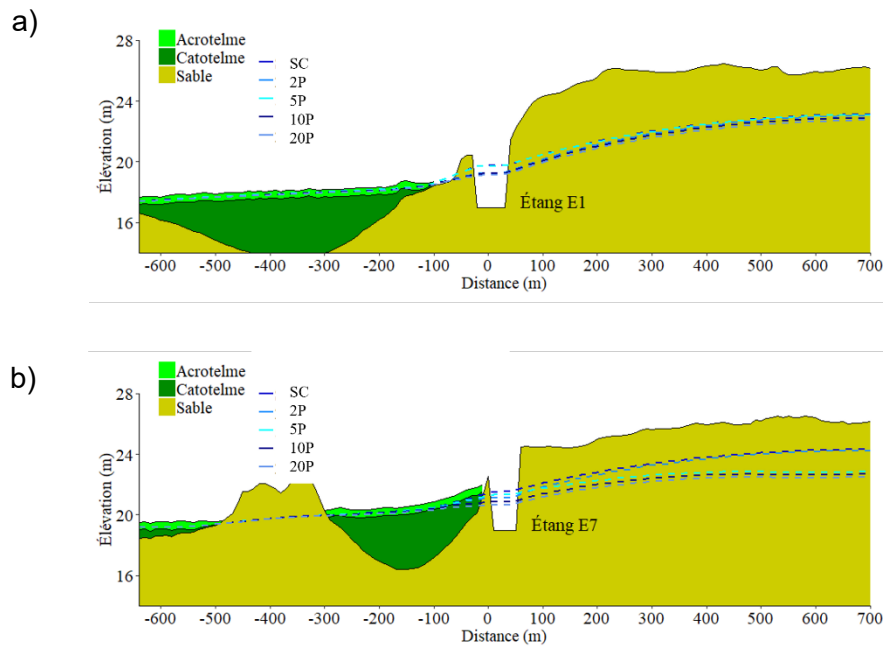


Figure 18. Effet des pompages sur les charges simulées pour les scénarios faisant varier le nombre et la position des pompes (SC, 2P, 5P, 10P, 20P) a) sur le transect 5 et b) sur le transect 7 (Chéné, 2024)

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

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

4 SYNTHÈSE ET CONCLUSION

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

- Contexte hydrogéologique

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

- Directions d'écoulement

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

- Recharge de la nappe

La recharge de la nappe estimée à tous les piézomètres montre un intervalle de valeurs relativement grand qui reflète les incertitudes associées au calcul. Les conditions humides et plus fraîches de 2023 ont entraîné une recharge supérieure à celle de 2022. Il ne semble pas y avoir de retour d'irrigation sur le coteau Saint-Henri.

- Niveaux d'eau

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

- Facteurs qui influencent l'effet des pompages

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

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

5 RÉFÉRENCES

- Bourgault, M.-A., Larocque, M., Roy, M. (2014) Simulation of aquifer-peatland-river interactions under climate change. *Hydrology Research*, 45(3), 425-440.
- Chapuis, R.P. (1989) Shape Factors for Permeability Tests in Boreholes and Piezometers. *Ground Water*, 27(5), 647-654. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1989.tb00478.x>.
- Charron, I., Beauchemin, A., Blais-Gagnon, A., Delmotte, S., Ducruc, S., Dugré, D., Landry, F., Jégo, G., Michaud, A., Morissette, R., St-Arnaud, R.-M. (2019) Recherche participative d'alternatives durables pour la gestion de l'eau en milieu agricole dans un contexte de changement climatique (RADEAU 1). Rapport rédigé le ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), Québec, Canada. 271 p.
- Chéné, J. 2024. Connexions aquifère-tourbière dans la région de Lanoraie. Mémoire de maîtrise en sciences de la Terre (en évaluation). Département des sciences de la Terre et de l'atmosphère, UQAM, Montréal, Canada. 108 p.
- Devlin, J.F. 2015. HydroGeoSieveXL: An Excel-based tool to estimate hydraulic conductivity from grain size analysis. *Hydrogeology Journal*, DOI 10.1007/s10040-015-1255-0.
- Domenico, P.A., Schwartz, W. (1997) Physical and chemical hydrogeology. John Wiley & Sons.
- Données Québec (2023) Cartes 31H14NO, 31H14NE, 31H14SO, 31I03SE, 31I03SO. LiDAR - Modèles numériques (terrain, canopée, pente), Gouvernement du Québec. Récupéré de <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/produits-derives-de-base-du-lidar>
- ECCC (Environnement et Changement climatique Canada) (2023) Données climatiques historiques. Récupéré de https://climate.meteo.gc.ca/index_f.html.
- Gosselin, J.-S., Rivard, C. et Martel, R. (2016). User manual for WHAT (Well Hydrograph Analysis Toolbox). *Université du Québec, INRS-ETE, Québec (Canada)*, 199-216.
- Hardy, F. (2007) Contexte stratigraphique quaternaire de la MRC d'Autray (Lanaudière) et modèle stratigraphique 3D. Rapport final présenté à TechnoRem inc par Poly-Géo inc. : 17 p. et 2 annexes.
- Harbaugh, A.W. (2005) MODFLOW-2005, the USGS Modular Ground-Water Model: The Ground-Water Flow Process. US Department of the Interior, USGS, Denver, Colorado. 253 p.
- Healy, R., Cook, P. (2002) Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, 91-109. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0178-0>.
- Hvorslev, M.J. (1951) Time lag and soil permeability in ground-water observations (Bulletin no. 36). U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station U.S. Army, Vicksburg, Mississippi, pp. 1-50.
- Johnson, A. I. (1967). *Specific yield: compilation of specific yields for various materials*. Washington, États-Unis : US Government Printing Office. 74p.
- Lambert, C., Larocque, M., Gagné, S., Garneau, M. (2022) Aquifer-peatland hydrological connectivity and controlling factors in boreal peatlands. *Frontiers in Earth Science*, <https://doi.org/10.3389/feart.2022.835817>.
- Larocque, M., Roux, M., Chéné, J. (2022) Géométrie de l'aquifère du complexe tourbeux de Lanoraie – Rapport d'avancement. Rapport déposé au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec. 28 p.

- LaSalle, P. (1973) *Géologie des sédiments meubles de la région de Joliette-Sorel : Rapport préliminaire*. Ministère des richesses naturelles, Gouvernement du Québec, Québec, Canada. 10 p.
- Levison J., Larocque, M., Fournier, V., Gagné, S., Pellerin, S., Ouellet, M.-A. (2014) Dynamics of a headwater system and peatland under current conditions and with climate change. *Hydrological Processes*, 28:4808-4822. <https://doi.org/10.1002/hyp.9978>.
- Meizhao, L., Zhongfeng, X., Yang, Z., Hui, L., Meixia, L. (2021) A comprehensive review of specific yield in land surface and groundwater studies. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13(2), e2020MS002270. <https://doi.org/10.1029/2020MS002270>.
- MELCCFP (ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs) (2023) Système d'information hydrogéologique (SIH). Gouvernement du Québec. Récupéré de: <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/sih/index.htm>.
- MRNF (ministère des Ressources naturelles et des Forêts) (2021) Carte géologique interactive. Gouvernement du Québec. Récupéré de https://sigeom.mines.gouv.qc.ca/signet/classes/l1108_afchCarteIntr.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model? Part 2— Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modeling. *Journal of Hydrology*, 303(1-4), 290-306. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>.
- Pellerin, S., Lavoie, M., Bouchery, A., Larocque, M. Garneau, M. (2016) Recent vegetation dynamics and hydrological changes in bogs located in an agricultural landscape. *Wetlands*, 36(159), doi:10.1007/s13157-015-0726-3.
- Rivera, A. (2014). Chapter 2 of Groundwater Basics. In A. Rivera (Ed.), *Canada's Groundwater Resources* (pp. 24-61). Fitzhenny and Whiteside.
- Rosa, E., Larocque, M. (2008) Investigating peat hydrological properties using field and laboratory methods: application to the Lanoraie peatland complex (southern Quebec, Canada). *Hydrological Processes*, 22(12), 1866-1875. <https://doi.org/10.1002/hyp.6771>.
- Rosa, E., M. Larocque, S. Pellerin, S. Gagné, V. Fournier (2009) Determining the number of manual measurements required to improve peat thickness estimations by ground penetrating radar. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 377-383.
- SNC Lavalin (2005) Évaluation de la qualité des eaux souterraines et de surface au lieu d'enfouissement sanitaire de Dépôt Rive-Nord inc., à Saint-Thomas. Rapport final no. 016932, Québec, Canada, 311 p.
- Technorem (2008) Acquisition de connaissances sur l'hydrologie, l'approvisionnement en eau et les écosystèmes de la rivière Saint-Jean – Lanaudière.
- Tecsult inc. (2005). Aménagement d'une cellule d'enfouissement technique à Saint-Thomas : Évaluation du potentiel aquifère, note technique 05-12951-0500.
- White, J.T., Hunt, R.J., Fienen, M.N., Doherty, J.E. (2020) Approaches to Highly Parameterized Inversion: PEST++ Version 5, a Software Suite for Parameter Estimation, Uncertainty Analysis, Management Optimization and Sensitivity Analysis. U.S.G.S. Techniques and Methods 7C26. <https://doi.org/10.3133/tm7C26>.

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

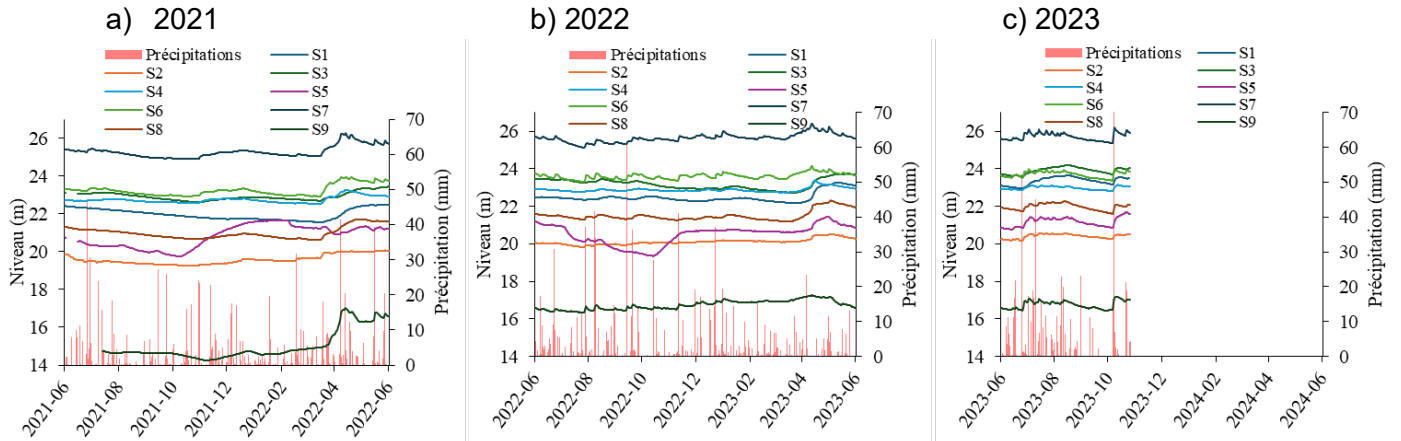


Figure 19 : Niveaux dans les piézomètres situés dans le sable, de juin 2021 à octobre 2023

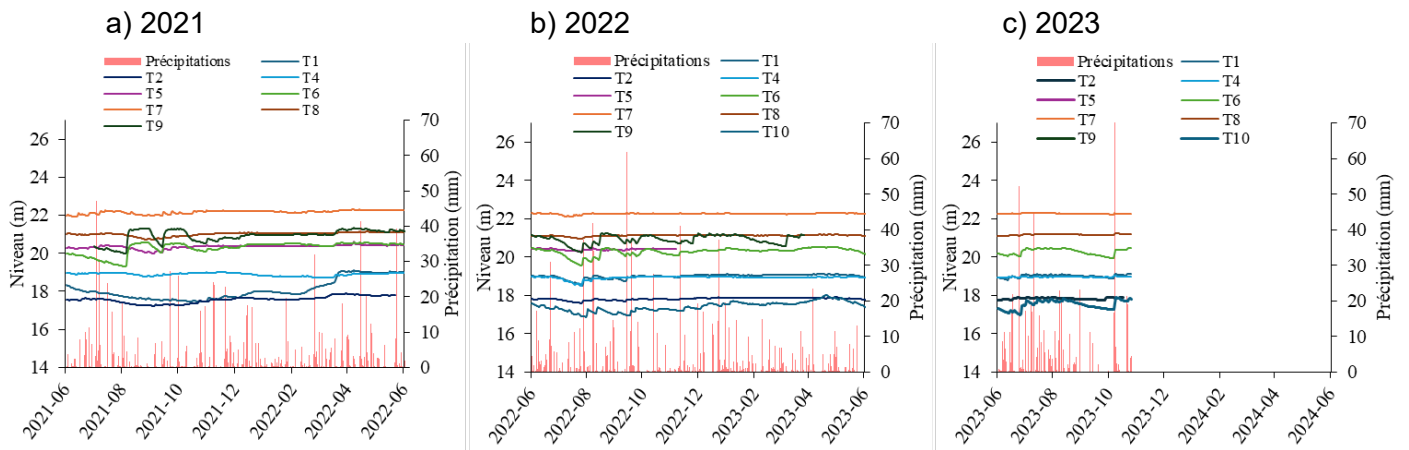


Figure 20 : Niveaux dans les piézomètres situés dans la tourbe, de juin 2021 à octobre 2023

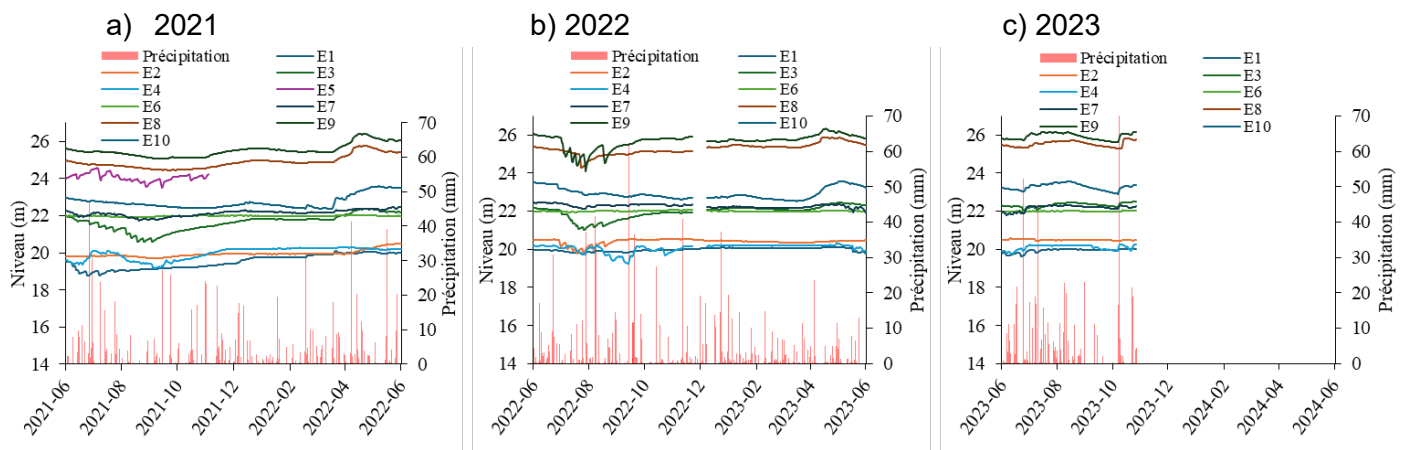


Figure 21 : Niveaux dans les piézomètres situés dans les étangs, de juin 2021 à octobre 2023