

Dynamique hydrique des habitats de reproduction de la rainette faux-grillon 2021-2025

RAPPORT final

**Marie Larocque
Laurence Brunelle
Marjolaine Roux
Jonathan Chabot-Grégoire
Gabriel Bastien-Beaudet
Camil Vachon-Laberge**

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

Département des sciences de la Terre et de l'atmosphère

9 février 2026

Équipe de réalisation

Marie Larocque	Responsable du projet, spécialiste des eaux souterraines, professeure, UQAM
Laurence Brunelle	Agente de support à la recherche, UQAM
Marjolaine Roux	Agente de recherche, UQAM
Jonathan Chabot-Grégoire	Agent de recherche, UQAM
Gabriel Bastien-Beaudet	Agent de recherche, UQO
Camil Vachon-Laberge	Stagiaire BSc, UQAM

Larocque, M., Brunelle, L., Roux, M., Chabot-Grégoire, J., Bastien-Beaudet, G. et Vachon-Laberge, C. 2026. Dynamique hydrique des habitats de reproduction de la rainette faux-grillon – Rapport final déposé au ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs. Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec. 108 p.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	8
2	ZONE D'ÉTUDE.....	9
2.1	Localisation générale.....	9
2.2	Géologie	9
2.3	Conditions météorologiques	10
3	MÉTHODOLOGIE	11
3.1	Étangs instrumentés	11
3.2	Mesure des niveaux dans les étangs et dans la nappe	12
3.3	Morphologie des étangs	13
3.4	Conditions géologiques.....	13
3.5	Aires de drainage	13
3.6	Ouverture de la canopée.....	13
3.7	Hydropériode (HP) et indice d'hydropériode (HPi).....	14
3.8	Taux d'abaissement relatif	14
3.9	Analyses et modèles statistiques	15
3.10	Changements climatiques	16
4	RÉSULTATS ET DISCUSSION	17
4.1	Conditions météorologiques 2021-2025.....	17
4.2	Données géomorphologiques.....	18
4.2.1	Géologie des sites	18
4.2.2	Paramètres physiques décrivant les sites	20
4.3	Ouverture de la canopée.....	21
4.4	Données hydrologiques.....	23
4.4.1	Hydropériode et indice d'hydropériode.....	23
4.4.2	Niveaux d'eau dans les étangs et dans la nappe	26
4.4.3	Taux d'abaissement	27
4.5	Facteurs influençant HP, HPi et TAR.....	29
4.6	Modèles statistiques explicatifs des variables hydrologiques	31
4.7	Conditions futures.....	34
5	BILAN DES RÉSULTATS.....	38
5.1	Principales observations	38
5.2	Recommandations	39
6	RÉFÉRENCES	42
7	ANNEXE A – Synthèse des résultats.....	44

8	ANNEXE B – Niveaux d’eau dans les étangs et dans la nappe.....	48
9	ANNEXE C – Logs des piézomètres	58
10	ANNEXE D – Coupes stratigraphiques des étangs.....	78
11	ANNEXE E – Protocole d’instrumentation, de caractérisation et de suivi des étangs temporaires.....	88

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude a) étangs temporaires étudiés et b) occupation du territoire (MRNF, 2025a)	9
Figure 2 : Dépôts de surface sur la zone d'étude (MRNF, 2025b).....	10
Figure 3 : a) Températures mensuelles moyennes à long terme (1991-2020) et des années 2021, 2022, 2023, 2024 et 2025, b) précipitations et évapotranspirations mensuelles moyennes à long terme (1991-2020) et des années 2021, 2022, 2023, 2024 et 2025.....	11
Figure 4 : Épaisseur de la neige aux sites équipés de règles à neige et de caméras pour les hivers 2022, 2023, 2024 et 2025 ainsi que densité de neige au site BTRF	18
Figure 5 : Histogrammes de fréquence pour a) la pente moyenne des bassins versants, b) aire des bassins versants, c) aire des étangs, d) le volume maximum emmagasiné, e) la hauteur d'eau maximale dans l'étang.	20
Figure 6 : Niveaux d'eau maximums de 2021 à 2025. Deux années ayant la même lettre n'ont pas des niveaux statistiquement différents et les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre d'étangs pour lesquels des données sont disponibles chaque année.	21
Figure 7 : Pourcentage d'ouverture de la canopée en 2021 et 2023	22
Figure 8 : Exemples types de végétation a) à la limite du site IP004 et b) au site LP16-08	22
Figure 9 : Début de l'hydropériode calculée et découlant des chants de rainettes enregistrés au printemps entre 2021 et 2025	23
Figure 10 : Durée de l'hydropériode (HP) de 2021 à 2025. Deux années ayant la même lettre n'ont pas des HP statistiquement différentes et les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre d'étangs pour lesquels des données sont disponibles chaque année.	25
Figure 11 : Indice d'hydropériode (HPI) de 2021 à 2025. Deux années ayant la même lettre n'ont pas des HPI statistiquement différentes et les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre d'étangs pour lesquels des données sont disponibles chaque année.	26
Figure 12 : Taux d'abaissement relatif (TAR) pour l'eau de surface et pour l'eau souterraine depuis le début des suivis.....	29
Figure 13 : Coefficients de corrélation croisée de Spearman (r_s) statistiquement significatifs ($p < 0.05$) entre les trois variables étudiées (HP, HPI et TAR de l'étang) et les températures, les précipitations, les évapotranspirations, les précipitations nettes et les	

paramètres physiques. Les cases vides représentent des corrélations non significatives. Les traits horizontaux représentent des analyses qui ne s'appliquent pas pour une variable spécifique..... 31

Figure 14 : Comparaison entre les variables hydrologiques observées et modélisées a) HP, b) HPi et c) TAR 34

Figure 15 : Comparaison entre la période de référence (1991-2020) et la période future (2041-2070) des fonctions de densité a) de la précipitation journalière, b) de l'évapotranspiration journalière (ETP) et c) de la température journalière..... 36

Figure 16 : Début de l'hydropériode calculée pour la période 2016-2025, pour la période de référence climatique (1991-2020) et pour l'horizon climatique futur (2041-2070) 37

Figure 17 : Niveaux d'eau dans les étangs et dans la nappe entre avril 2021 et septembre 2025 pour les sites AT16-37 et AT18-10 48

Figure 18 : Niveaux d'eau dans les étangs et dans la nappe entre avril 2021 et septembre 2025 pour les sites BA1 et BCV2 49

Figure 19 : Niveaux d'eau dans les étangs et dans la nappe entre avril 2021 et septembre 2025 pour les sites BL024 et BTRF..... 50

Figure 20 : Niveaux d'eau dans les étangs et dans la nappe entre avril 2021 et septembre 2025 pour les sites FUT3 et IP004..... 51

Figure 21 : Niveaux d'eau dans les étangs et dans la nappe entre avril 2021 et septembre 2025 pour les sites IP18-02 et IP180 52

Figure 22 : Niveaux d'eau dans les étangs et dans la nappe entre avril 2021 et septembre 2025 pour les sites IP140 et IP142 53

Figure 23 : Niveaux d'eau dans les étangs et dans la nappe entre avril 2021 et septembre 2025 pour les sites JM060 et JM109 54

Figure 24 : Niveaux d'eau dans les étangs et dans la nappe entre avril 2021 et septembre 2025 pour les sites LP16-08 et P5..... 55

Figure 25 : Niveaux d'eau dans les étangs et dans la nappe entre avril 2021 et septembre 2025 pour les sites SH16 et TM146..... 56

Figure 26 : Niveaux d'eau dans les étangs et dans la nappe entre avril 2021 et septembre 2025 pour les sites TM15-01 et TMA05 57

Figure 27 : Log du piézomètre AT16-37	58
Figure 28 : Log du piézomètre AT18-10	59
Figure 29 : Log du piézomètre BA1	60
Figure 30 : Log du piézomètre BCV2.....	61
Figure 31 : Log du piézomètre BL024	62
Figure 32 : Log du piézomètre BTRF.....	63
Figure 33 : Log du piézomètre FUT3	64
Figure 34 : Log du piézomètre IP004.....	65
Figure 35 : Log du piézomètre IP18-02.....	66
Figure 36 : Log du piézomètre IP140.....	67
Figure 37 : Log du piézomètre IP142.....	68
Figure 38 : Log du piézomètre IP180	69
Figure 39 : Log du piézomètre JM060	70
Figure 40 : Log du piézomètre JM109	71
Figure 41 : Log du piézomètre LP16-08	72
Figure 42 : Log du piézomètre P5.....	73
Figure 43 : Log du piézomètre SH16	74
Figure 44 : Log du piézomètre TM15-01	75
Figure 45 : Log du piézomètre TM146	76
Figure 46 : Log du piézomètre TMA05.....	77
Figure 47 : Coupe stratigraphique du site AT16-37	78
Figure 48 : Coupe stratigraphique du site AT18-10	78
Figure 49 : Coupe stratigraphique du site BA1	79
Figure 50 : Coupe stratigraphique du site BCV2.....	79
Figure 51 : Coupe stratigraphique du site BL024	80
Figure 52 : Coupe stratigraphique du site BTRF.....	80

Figure 53 : Coupe stratigraphique du site FUT3	81
Figure 54 : Coupe stratigraphique du site IP004.....	81
Figure 55 : Coupe stratigraphique du site IP140.....	82
Figure 56 : Coupe stratigraphique du site IP142.....	82
Figure 57 : Coupe stratigraphique du site IP180.....	83
Figure 58 : Coupe stratigraphique du site IP18-02.....	83
Figure 59 : Coupe stratigraphique du site JM060	84
Figure 60 : Coupe stratigraphique du site JM109	84
Figure 61 : Coupe stratigraphique du site LP16-08	85
Figure 62 : Coupe stratigraphique du site P5.....	85
Figure 63 : Coupe stratigraphique du site SH16	86
Figure 64 : Coupe stratigraphique du site TM15-01	86
Figure 65 : Coupe stratigraphique du site TM146	87
Figure 66 : Coupe stratigraphique du site TMA05	87

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Données stratigraphiques pour tous les étangs	19
Tableau 2. Statistiques liées aux modèles statistiques.....	32
Tableau 3. Précipitations (P), évapotranspirations potentielles (ETP) et températures observées entre 2016 et 2025 et provenant des scénarios climatiques pour la période de référence (1991-2020) et pour la période future (2041-2070).....	36
Tableau 4 : Localisation et dates d'instrumentation des sites	44
Tableau 5 : Paramètres physiques décrivant les sites	45
Tableau 6 : Hydropériodes (HP) et indices d'hydropériodes (HPI).....	46
Tableau 7 : Taux d'abaissement relatif (TAR) médians de surface et souterrains	47

1 INTRODUCTION

En octobre 2020, le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) a donné un mandat de cinq ans à l'Université du Québec à Montréal (UQAM) pour instrumenter, caractériser et établir un suivi hydrologique de 20 étangs temporaires servant d'habitat à la rainette faux-grillon (RFG) dans la région de la Montérégie.

Ce rapport final présente les résultats des données recueillies et calculées pour l'ensemble des années du projet, soit du printemps 2021 à l'automne 2025, incluant les données météorologiques, les hydropériodes, les chroniques de niveaux d'eau (étangs et nappes) et les taux d'abaissement des niveaux dans les étangs et dans la nappe à proximité. Les résultats incluent également les données stratigraphiques et les mesures morphologiques de chaque site ainsi que les données d'ouvertures de la canopée. Les facteurs qui influencent le plus les variables hydrologiques ont été étudiés au moyen d'analyses statistiques et de modèles statistiques développés à partir de l'ensemble des données disponibles. Les résultats sont interprétés et discutés d'un point de vue hydrologique. Les sondes ont été relevées pour une dernière fois en octobre 2025, puis retirées et remises au ministère. Celui-ci poursuivra le suivi hydrologique de 10 étangs temporaires parmi ceux étudiés dans ce projet.

Le projet a été réalisé par certains membres de l'équipe de recherche de la Chaire *Eau et conservation du territoire* de l'UQAM incluant Marie Larocque (spécialiste des eaux souterraines, professeure au département des sciences de la Terre et de l'atmosphère et titulaire de la Chaire) qui a supervisé les travaux, Laurence Brunelle (agente de support à la recherche) qui a réalisé le traitement de données, Jonathan Chabot-Grégoire (agent de recherche) qui a réalisé également les travaux de terrain ainsi que le traitement de données, Gabriel Bastien-Beaudet (agent de recherche, UQO) qui a développé les modèles statistiques ainsi que Camil Vachon-Laberge (maîtrise en sciences de la Terre et de l'atmosphère) qui a participé à certains travaux de terrain et aux analyses statistiques préliminaires.

2 ZONE D'ÉTUDE

2.1 Localisation générale

La zone d'étude couvre une superficie d'environ 300 km² en Montérégie, entre l'île de Montréal à l'ouest, Laprairie au sud, le mont Saint-Bruno à l'est et Boucherville au nord (**Figure 1a**). Le terrain est relativement plat, avec une altitude de quelques mètres au-dessus du niveau de la mer près du fleuve, jusqu'à plus de 200 mètres au sommet du mont Saint-Bruno. De grands secteurs sont occupés par l'agriculture, des superficies importantes sont couvertes de boisés, surtout dans la partie est, et des zones urbanisées sont présentes dans la région (**Figure 1b**).

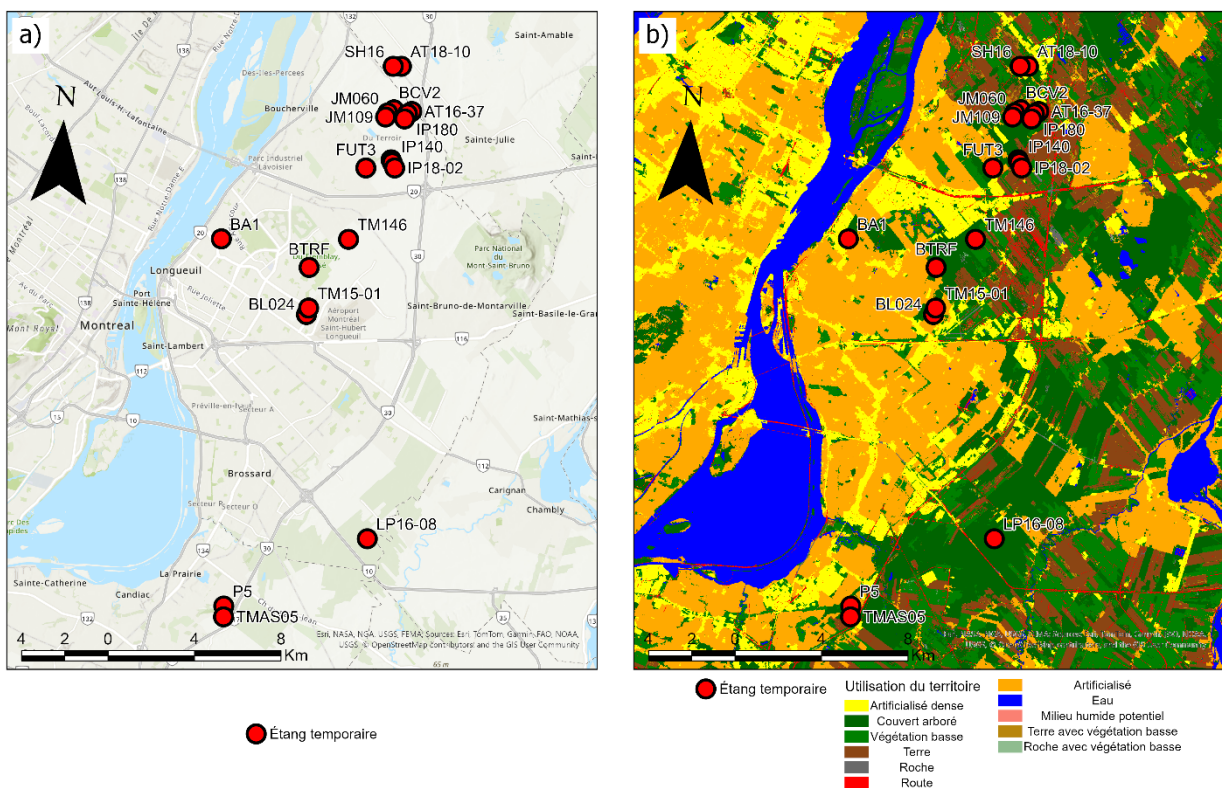


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude a) étangs temporaires étudiés et b) occupation du territoire (MRNF, 2025a)

2.2 Géologie

La zone d'étude fait partie de la plate-forme des Basses-Terres du Saint-Laurent et est constituée de roches sédimentaires peu déformées, généralement disposées en strates horizontales. Les sédiments marins fins dominent sur toute la zone d'étude, ils ont été déposés lors de l'invasion de la mer de Champlain (**Figure 2**). Ces dépôts peuvent atteindre de grandes épaisseurs, plus de

20 m par endroits (Dubé-Loubert et al., 2014 ; Carrier et al., 2013). Sur les flancs du mont Saint-Bruno se trouve du till remanié en couverture continue ainsi que des sédiments littoraux et périlittoraux. La couverture de dépôts quaternaires est interrompue seulement par le mont Saint-Bruno, une intrusion de roches ignées alcalines (Globensky, 1987).

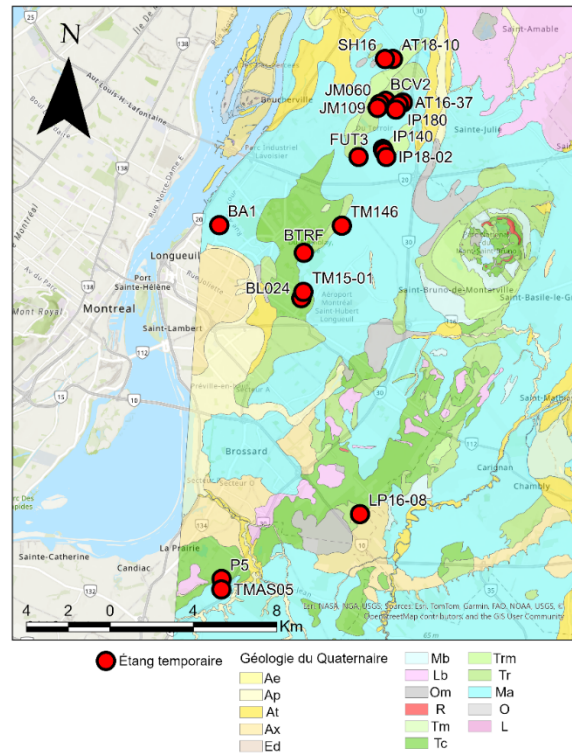


Figure 2 : Dépôts de surface sur la zone d'étude (MRNF, 2025b)

2.3 Conditions météorologiques

Les données de précipitations et de températures entre 2021 et 2025 proviennent de la station de Saint-Hubert (ID climatologique : 7027329) et de la station de l'aéroport international de Montréal (ID climatologique : 702S006 ; Environnement Canada, 2025). Les données manquantes de la station de Saint-Hubert ont été comblées avec celles de la station de Montréal.

Les précipitations moyennes interannuelles (1991-2020) mesurées à Saint-Hubert sont de 1173 mm/an. Pour les années hydrologiques 2021 à 2025 (c.-à-d. du 1^{er} octobre précédent à la fin septembre de l'année), les précipitations annuelles ont été respectivement de 1265, 1013, 1306, 1044 et 758 mm. En moyenne, les mois de juin, juillet, août et octobre sont les plus humides et le mois de février est le plus sec (**Figure 3**). La température mensuelle moyenne à long terme varie de -9°C en janvier à 20°C en juillet. Les températures moyennes mensuelles des cinq

années ont toutes été supérieures à celles de la moyenne de 1990-2020, à l'exception du mois de février (2021, 2022, 2023 et 2025) et des mois de janvier 2022 et décembre 2024. Les précipitations mensuelles ont été très variables entre 2021 et 2025. L'évapotranspiration potentielle (ETP) annuelle, calculée avec la méthode d'Oudin et al. (2005), qui se base uniquement sur la localisation et la température de l'air, a été de 686, 664, 668, 703 et 674 mm. Puisque l'ETP découle directement de la température, l'ETP est relativement stable à l'échelle mensuelle ou annuelle.

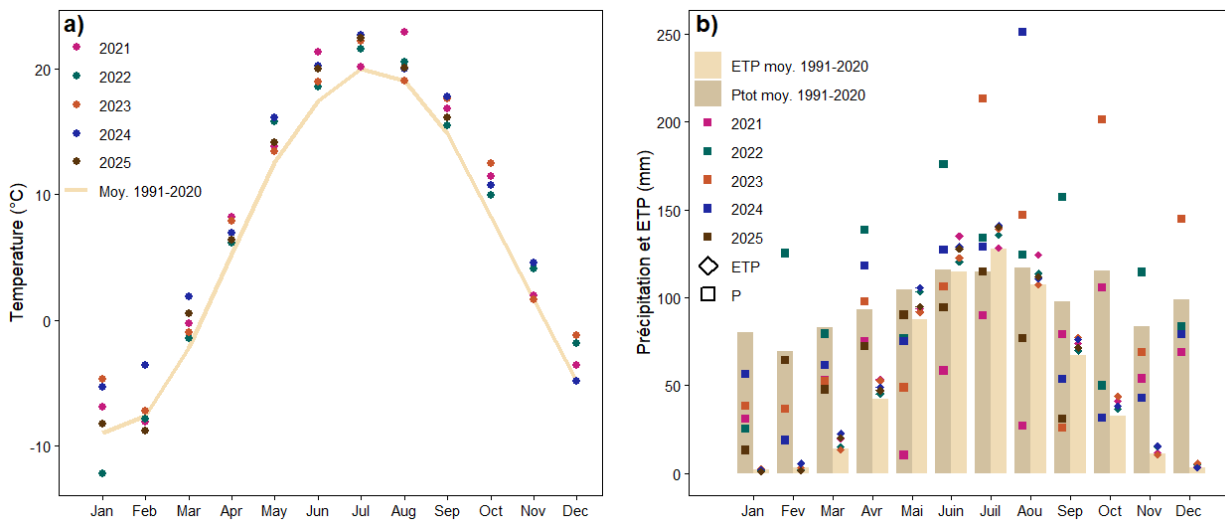


Figure 3 : a) Températures mensuelles moyennes à long terme (1991-2020) et des années 2021, 2022, 2023, 2024 et 2025, b) précipitations et évapotranspirations mensuelles moyennes à long terme (1991-2020) et des années 2021, 2022, 2023, 2024 et 2025

3 MÉTHODOLOGIE

3.1 Étangs instrumentés

Les étangs temporaires visés par l'étude ont été sélectionnés à l'automne 2020 et à l'hiver 2021, de manière à respecter le plus possible les critères identifiés par l'équipe du MELCCFP (le ministère était alors nommé MFFP) : 1) accessibilité du site, 2) occurrences viables de RFG, 3) présences de RFG entre 2015 et 2019, 4) présence d'une cuvette pouvant héberger un étang temporaire, 5) superficie maximale de 5000 m², 6) peu ou pas de perturbations anthropiques et 7) aucune modification du site prévue dans un avenir rapproché. Les sites ont été sélectionnés en collaboration avec l'équipe du ministère, considérant que certains compromis ont dû être faits pour certains critères à certains endroits. Les 20 étangs temporaires sélectionnés ont été utilisés

pour le suivi depuis le début du projet. Ils sont répartis sur cinq municipalités, c.-à-d. La Prairie (2 sites), Brossard (1 site), Longueuil (5 sites), Boucherville (10 sites), et Varennes (2 sites) (**Figure 1**). Il est important de souligner que, pour des raisons de logistique, quatre étangs ne respectent pas le critère de superficie maximale (BCV2, IP004, IP180 et LP16-08).

L'instrumentation des étangs inclut un piézomètre dans l'étang, un piézomètre dans la nappe à proximité de l'étang, des sondes mesurant les niveaux dans tous les piézomètres, un appareil photo de chasse sur neuf sites (AT18-10, BA1, BTRF, IP140, LP16-08, SH16, TM146, TM15-01 et TMS05) et une règle à neige sur quatre sites du printemps 2022 au printemps 2024 (AT18-10, BA1, BTRF et LP16-08). Des ajustements ont été réalisés en 2024 afin de rectifier l'alignement de certaines caméras pour qu'elles visent l'étang sur tous les sites. À la suite de ces ajustements, seule la caméra du site AT18-10 pointait à la fois l'étang et une règle.

Un protocole d'instrumentation et de suivi des étangs temporaires (Larocque et al., 2023 ; <https://chaire-eau.ugam.ca/outils/>; voir aussi Annexe E) a été élaboré afin de proposer une démarche permettant d'uniformiser l'instrumentation, le suivi et la caractérisation des habitats de la rainette. Il détaille le matériel nécessaire, les étapes de la préparation en laboratoire avant le terrain, les étapes pour l'instrumentation des sites, les étapes pour la caractérisation des étangs temporaires et les manipulations et observations à réaliser lors des visites de terrain. Le protocole décrit le suivi des niveaux d'eau de surface et de l'eau souterraine et l'observation de l'évolution du couvert nival. La caractérisation comprend l'ouverture de la canopée, la densité de la neige, la stratigraphie et la bathymétrie.

3.2 Mesure des niveaux dans les étangs et dans la nappe

Tous les sites ont été instrumentés à partir du mois d'avril 2021. Les piézomètres sont équipés de sondes *HOBO U20L* (sauf un piézomètre équipé d'une sonde *Solinst Levellogger M5*) mesurant les niveaux d'eau toutes les heures. Les sondes ont été laissées en place pendant toute la durée du projet et n'ont pas été retirées l'hiver dans le but de suivre la dynamique des niveaux pendant toute l'année. Les niveaux ont tous été corrigés pour la pression atmosphérique à l'aide de sondes barométriques (*HOBO U20L*) installées aux sites BCV2 et TM15-01. Les sondes ont été retirées des sites au début du mois d'octobre 2025. Les chroniques sont donc généralement continues, mais certaines sont interrompues, soit en raison de problèmes techniques avec les sondes, soit en raison d'erreurs de manipulation.

3.3 Morphologie des étangs

Des relevés topographiques ont été réalisés sur chaque site au moyen d'un GPS différentiel (DGPS) relié au réseau cellulaire GNSS (Global Navigation Satellite System), suivant les lignes directrices du protocole présenté à la section 2.1. Des données LiDAR (MFFP, 2020) sont également disponibles pour l'ensemble de la zone étudiée. Ces données ont permis de créer une couche matricielle de la topographie du fond des étangs. À partir de celle-ci, la superficie maximale ($S_{\max}$) et le volume maximal ($V_{\max}$) de chaque site ont été calculés avec l'outil «Surface-Volume» du logiciel ArcGIS pour chaque tranche de 5 cm à partir du fond de l'étang. La hauteur maximale d'eau ($h_{\max-an}$) a été identifiée à partir des chroniques de mesure des niveaux d'eau à tous les étangs entre le 1^{er} avril et le 30 septembre de chaque année. La hauteur maximale identifiée ($h_{\max}$) a été utilisée pour déterminer $V_{\max}$.

3.4 Conditions géologiques

Des sondages géologiques ont été réalisés à chaque site au moyen d'une tarière manuelle permettant le prélèvement de la matière organique et des sédiments fins à plus grossiers, suivant les lignes directrices du protocole présenté plus haut. Les mesures étant faites manuellement, les profondeurs ont été limitées par la présence de blocs ou de roc. Lors de sondages à la tarière manuelle, il est dans la majorité des cas impossible de distinguer le roc de blocs. Les données recueillies ont permis d'identifier visuellement la nature des matériaux, de mesurer l'épaisseur des couches géologiques rencontrées, et de tracer des coupes topogéologiques à chaque étang.

3.5 Aires de drainage

L'aire de drainage correspond à la surface à partir de laquelle l'eau converge vers chaque étang. Les données de pentes proviennent du LiDAR. Elles ont d'abord été transformées en direction d'écoulement à l'aide de l'outil *Flow Direction* d'ArcGIS. Ensuite, une couche d'accumulation de flux a été calculée à l'aide de l'outil *Flow Accumulation* d'ArcGIS. Finalement, l'outil *Watershed* d'ArcGIS a été utilisé pour calculer l'aire d'alimentation de chacun des étangs. Les résultats ont ensuite été validés manuellement en utilisant la couche ombrée du LiDAR ainsi que des photographies aériennes (Google, 2023).

3.6 Ouverture de la canopée

Le couvert forestier est un des paramètres pouvant influencer la présence de populations de RFG établies dans les étangs temporaires (Werner et al., 2009). Dans ce projet, l'ouverture de la

canopée a été mesurée à l'aide d'un densiomètre sphérique concave en juillet et en septembre 2021 (P5 et TMA05) et en juillet 2023. Les mesures d'ouverture de canopée n'ont pas été prises en 2023 aux sites P5 et TMA05 visés par la Loi sur les espèces en péril (LEP), puisqu'il n'est pas possible de s'y rendre en juillet et qu'une seule visite a été organisée en 2023.

3.7 Hydropériode (HP) et indice d'hydropériode (HPI)

La méthode de calcul de l'hydropériode (HP) est celle utilisée dans Larocque et al. (2020) et dans Roux et al. (2023), aussi recommandée par Whiting (2004). Le début de la période d'activité hydrologique printanière est déterminé en fonction de deux critères : 1) la température moyenne doit avoir été supérieure à un certain seuil pendant cinq jours consécutifs ; 2) durant les 10 jours suivants, aucune température journalière minimale ne doit être inférieure à une température de gel prédéterminée. La température seuil utilisée est 5°C (température journalière moyenne) et la température de gel utilisée est -5°C (température journalière minimale). Dans Larocque et al. (2020), ces critères ont été calibrés pour que le début de l'hydropériode corresponde aux dates de chants de rainettes enregistrés entre 1993 et 2019. Toutefois, des températures variables et parfois particulièrement chaudes à l'hiver 2024 ont engendré une fonte du couvert de neige précoce alors que le couvert de glace des étangs n'était pas tout à fait fondu. Un ajustement du nombre de jours suivant l'atteinte de la température seuil a été effectué pour cette année, passant de 10 à 15 jours. Ainsi, le début de l'hydropériode coïncide avec la fonte du couvert de glace des étangs. La fin de la période d'activité hydrologique printanière correspond à la première journée où l'étang est complètement sec. Il est possible que certains étangs ne s'assèchent pas durant l'été, auquel cas les données des étangs restés inondés ne sont pas incluses dans le calcul des hydropériodes.

L'indice hydropériode (HPI) correspond au ratio de la période inondée sur le nombre total de jours entre le 1^{er} avril et le 30 septembre (183 jours), la date de fin du HPI correspond ainsi avec la fin de l'année hydrologique. Un HPI égal à 1 signifie que l'étang ne s'est pas asséché durant la période. Cet indice représente la dynamique des étangs sur une plus longue période que le HP.

3.8 Taux d'abaissement relatif

L'abaissement du niveau d'eau dans l'étang peut être causé par l'infiltration à travers les sédiments, par la vidange au niveau d'un trop-plein et par l'évapotranspiration. Le taux d'abaissement (TA) de l'eau de surface et des eaux souterraines est calculé selon la méthode proposée par Chandler et al. (2017) et correspond au changement du niveau de minuit à minuit

(24h). Les abaissments considérés dans le calcul sont ceux dont la durée est de plus de 48 h à la suite d'une augmentation du niveau d'eau causée par une précipitation. Les taux d'abaissement des eaux souterraines ont été calculés uniquement lorsque l'étang était sec. Le taux d'abaissement relatif (TAR) est calculé en divisant TA par l'évapotranspiration potentielle pour chaque événement de baisse de niveau, tel que suggéré par Malzone et al. (2019). L'évapotranspiration potentielle étant calculée avec la méthode de Oudin et al. (2005).

$$TAR = \frac{TA}{ETP} \quad \text{éq. (1)}$$

où TAR représente le taux d'abaissement relatif (mm/mm) du niveau de l'étang ou du niveau de la nappe, TA est le taux d'abaissement (mm) et ETP est l'évapotranspiration potentielle (mm).

3.9 Analyses et modèles statistiques

Pour tenter de dégager l'influence des conditions météorologiques et des caractéristiques physiques des étangs sur les variables hydrologiques HP, HPI et TAR, des modèles statistiques de type modèles linéaires mixtes (MLM) ont été réalisés. Ces modèles sont fréquemment utilisés dans un contexte écohydrologique, car ils permettent de saisir efficacement la forte variabilité spatio-temporelle propre à ces systèmes ainsi que de traiter la structure de dépendance associée aux plans d'expérimentation à mesures répétées. Ces modèles peuvent notamment révéler la capacité relative de chaque variable d'intérêt à expliquer les variations de la variable réponse (HP, HPI et TAR). Certains postulats sont cependant à respecter pour s'assurer de la validité des MLM développés, à savoir l'indépendance des observations, l'absence de multicolinéarité et l'homoscédasticité des résidus.

La force des relations entre les variables hydrologiques, les conditions météorologiques et les caractéristiques physiques des étangs a d'abord été quantifiée par des analyses de corrélations (coefficient de Spearman). Celles-ci ont permis d'inférer certaines relations entre les variables d'intérêts et de sélectionner les variables à intégrer dans les MLM. Trois MLM ont été réalisés pour chacune des variables hydrologiques : (1) un modèle *météo* simple mettant en relation la variable hydrologique à la donnée météorologique présentant la plus forte corrélation avec celle-ci ; (2) un modèle *physique* simple utilisant la caractéristique physique de l'étang la plus corrélée avec la variable hydrologique ; et (3), un modèle *combiné* intégrant à la fois la donnée météorologique et la caractéristique physique sélectionnée précédemment. À noter que les données de températures ont été exclues des analyses concernant le TAR, car elles ont été utilisées pour calculer l'évapotranspiration potentielle, une variable utilisée dans le calcul du TAR.

Il en va de même pour les précipitations nettes, puisque celles-ci sont calculées à partir de l'évapotranspiration. Le plus performant des trois modèles a été retenu pour chacune des variables hydrologiques sur la base de trois critères : 1) le plus grand coefficient de détermination (R^2), permettant de quantifier la proportion de la variance expliquée par le modèle, 2) la plus petite racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), décrivant la capacité du modèle à simuler les observations et 3) le respect des trois postulats mentionnés précédemment. Lorsque ce dernier critère ne pouvait pas être satisfait, la variable présentant la corrélation la plus élevée suivante était substituée dans le modèle, et ce, jusqu'à ce que le critère soit rempli. Dans chacun des modèles, un effet aléatoire sur l'année a été ajouté afin d'inclure les effets annuels (par exemple, la variabilité météorologique régionale) qui affectent tous les étangs simultanément. Un second effet aléatoire a été ajouté sur l'identifiant de l'étang pour traiter la structure de dépendance occasionnée par la répétition temporelle sur le même étang, en plus d'inclure indirectement des caractéristiques qui rendent chaque étang plus humide ou plus sec que les autres. Dans le but d'augmenter la force des modèles statistiques, les HP, HPI et TAR disponibles de 2016 à 2019 (cf. Larocque et al., 2020) aux sites communs avec ceux du présent projet (BA1, BCV2, BTRF, FUT3, IP004, et P5) ont été ajoutés aux données récoltées entre 2021 et 2025.

Par ailleurs, les tests statistiques Kruskal-Wallis, puis Wilcoxon par paires sans correction (Ondo et al., 1997) ont été réalisés pour comparer les résultats entre les années et entre les périodes climatiques.

3.10 Changements climatiques

Sept scénarios climatiques ont été identifiés à partir des données issues du projet CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 ; Eyring et al., 2016). Le scénario SSP2-4.5 (Shared Socioeconomic Pathways ; Riahi et al., 2017) a été retenu, car il est considéré comme étant un des plus réalistes pour les prochaines décennies. Il représente un scénario dans lequel les tendances actuelles se poursuivent (*middle of the road scenario*) avec un forçage radiatif d'environ 4,5 W/m² en 2100, impliquant un réchauffement modéré résultant d'efforts de réduction des gaz à effet de serre décalés dans le temps. Les scénarios ont une durée de 30 ans et couvrent à la fois une période de référence passée (1991-2020) utilisée à fins de comparaison, et une période future (2041-2070). Les données de précipitations journalières correspondant à la zone d'étude ont été débiaisées et mises à l'échelle sur une grille d'environ 10 km x 10 km. Elles ont été utilisées pour calculer les dates de début d'hydropériodes pour l'horizon 2041-2070. Elles ont également été utilisées avec les modèles statistiques pour tenter d'estimer les HP, HPI et TAR en conditions futures.

4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Conditions météorologiques 2021-2025

Pour les hivers 2021 à 2025, les équivalents en eau de la neige tombée ont été de 76 mm, 165 mm, 142 mm, 125 mm et 110 mm respectivement, nettement en deçà de la moyenne interannuelle (1991-2020) de 249 mm. La durée de la couverture neigeuse entre 1991 et 2020 a varié entre 137 jours (2018) et 237 jours (2002). Entre 2021 et 2025, les durées de couverture neigeuse ont été de 176, 173, 178, 170 et 184 jours respectivement.

Pour les hivers 2022 à 2025, la hauteur maximale de neige aux sites suivis a été de respectivement 57 cm, 57 cm, 27 cm et 61 cm. La densité de la neige a été mesurée au site BTRF le 8 mars 2021, le 4 mars 2022, le 9 mars 2023, le 27 février 2024 et le 4 mars 2025 (**Figure 4**). Les valeurs moyennes de densité de la neige en milieu ouvert ont été assez similaires d'une année à l'autre, c.-à-d. 0,29 kg/L, 0,23 kg/L, 0,30 kg/L, 0,34 kg/L et 0,23 kg/L, tandis que les valeurs moyennes sous couvert forestier ont été de 0,26, 0,24, 0,29, 0,36 et 0,25 kg/L de 2021 à 2025. En équivalent en eau de la neige, ces hauteurs et densités donnent respectivement des valeurs de 162, 125, 153, 36 et 135 mm sans couvert forestier et de 124, 127, 138, 59 et 114 mm sous couvert forestier pour les cinq années. Les redoux importants en 2024 peuvent expliquer les faibles équivalents en eau de la neige et la disparité entre les hauteurs avec et sans couvert forestier.

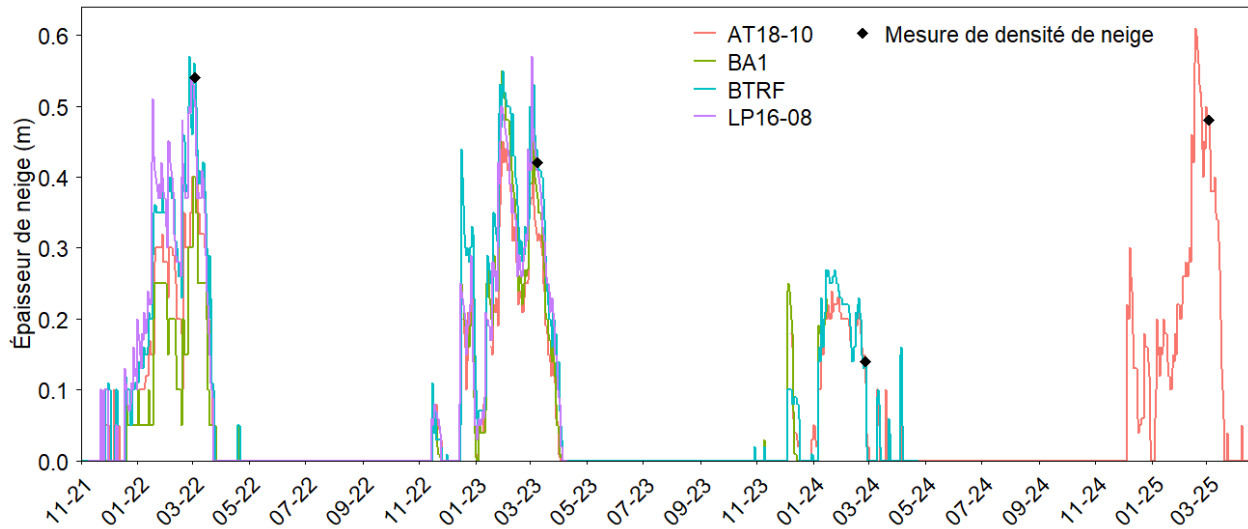


Figure 4 : Épaisseur de la neige aux sites équipés de règles à neige et de caméras pour les hivers 2022, 2023, 2024 et 2025 ainsi que densité de neige au site BTRF

4.2 Données géomorphologiques

4.2.1 Géologie des sites

Entre six (TM146 et TM15-01) et 12 (IP180) sondages manuels ont été réalisés par site pour déterminer la nature des matériaux sous-jacents. Les sondages ont atteint une profondeur comprise entre 0,12 m (BL024) et 1,67 m (TMAS05) (voir Annexe C). Ces données ont permis de tracer des coupes stratigraphiques pour tous les sites (Annexe D).

Sur tous les sites, l'unité 1 correspond à une couche de matière organique variant entre 0,11 m et 0,53 m d'épaisseur (Tableau 1). L'unité 2 est généralement composée de sédiments fins (silt et argile) tandis que l'unité 3 est composée de sédiments plus grossiers. Il est important de souligner que les dépôts meubles de granulométrie fine limitent, mais n'empêchent pas l'infiltration de l'eau. Ils contribuent au maintien de l'eau et à son accumulation dans les dépressions topographiques.

La présence d'un horizon de silt argileux est visible dans tous les étangs, particulièrement pour les sites IP18-02, JM060, JM109, P5 et TMAS05 où l'épaisseur de cet horizon est plus importante (entre 0,56 m et 1,30 m en moyenne). La présence de sable et gravier est aussi observée à tous les sites, sauf IP18-02, JM060 et TMAS05. Cet horizon est plus important aux sites AT16-37 (0,53 m) et TM146 (0,61 m). Les sondages ont été réalisés de manière à atteindre, autant que possible, 1,50 m de profondeur. Dans certains cas, cette profondeur n'a pu être atteinte, car la présence de blocs ou du roc a empêché la prolongation du sondage. Les points d'interrogation sous les horizons stratigraphiques sur les coupes stratigraphiques (**Annexe D**) représentent les endroits

où il n'a pas été possible de confirmer la composition des matériaux sous-jacents. La morphologie des cuvettes où se trouvent les étangs est assez variable d'un site à l'autre.

Tableau 1 : Données stratigraphiques pour tous les étangs

Site	Unité 1	Épaisseur moy. (m)	Unité 2	Épaisseur moy. (m)	Unité 3	Épaisseur moy. (m)
AT16-37	Matière organique	0,53	Silt et sable fin à moyen	0,24	Sable moyen à gravier	0,53
AT18-10	Matière organique	0,14	Silt et sable fin	0,31	Sable fin à gravier	0,20
BA1	Matière organique	0,29	Silt et argile	0,24	Sable moyen à gravier	0,38
BCV2	Matière organique	0,28	Silt et argile	0,44	Sable fin	0,20
BL024	Matière organique	0,23	Silt et sable fin	0,30	Roc calcaire	1,09
BTRF	Matière organique	0,30	Argile et silt	0,33	Sable grossier à gravier	0,22
FUT3	Matière organique	0,28	Silt	0,23	Sable fin	0,21
IP004	Matière organique	0,43	Silt et argile	0,34	Sable fin à gravier	0,6
IP140	Matière organique	0,23	Silt et argile	0,23	Silt et sable fin	0,4
IP142	Matière organique	0,24	Silt et argile	0,20	Sable fin et silt	0,27
IP180	Matière organique	0,11	Argile et silt	0,47	Sable moyen à gravier	0,16
IP18-02	Matière organique	0,19	Argile	0,70	-	-
JM060	Matière organique	0,07	Silt et argile	0,56	Silt et gravier	0,16
JM109	Matière organique	0,20	Argile et silt	0,78	Silt et gravier	0,28
LP16-08	Matière organique	0,26	Silt	0,09	Sable fin à grossier	0,17
P5	Matière organique	0,16	Silt et argile	0,47	Sable fin et silt	0,20
SH16	Matière organique	0,21	Silt	0,10	Sable fin	0,23
TM146	Matière organique	0,26	Silt	0,14	Sable fin et silt	0,61
TM15-01	Matière organique	0,14	Silt	0,17	Sable fin et silt	0,23
TMAS05	Matière organique	0,19	Argile	1,30	-	-

4.2.2 Paramètres physiques décrivant les sites

Les paramètres physiques décrivant les sites sont présentés au **Tableau 5** (Annexe A). La topographie de la région est très peu marquée, avec des pentes médianes dans les aires de drainage variant de 1,1% (IP004) à 4,2% (BL024). Les sites ayant des pentes faibles sont plus nombreux que ceux ayant des pentes plus élevées (**Figure 5a**). La plupart des aires de drainage des sites étudiés sont petites (valeur minimale 1 991 m² SH16) et un seul grand étang se démarque avec 131 172 m² (IP004) (**Figure 5b**). En raison des faibles pentes et de la présence de nombreux fossés (anciens et actifs), la délimitation des aires de drainage est toutefois considérée comme relativement imprécise. Les surfaces maximales des étangs varient entre 494 m² (TM15-01 - 2024) et 10 857 m² (IP180 - 2024) (médiane 2 664 m²) et seuls deux étangs sont particulièrement grands (**Figure 5c**). Les volumes maximums des étangs sont généralement faibles, variant entre 138 m³ (TM15-01 - 2024) et 2988 m³ (IP004 - 2024), mais cinq étangs contiennent nettement plus d'eau (**Figure 5d**). Les étangs sont tous relativement peu profonds et leurs hauteurs d'eau maximales sont assez bien distribuées, variant de 0,32 à 0,70 m (**Figure 5e**).

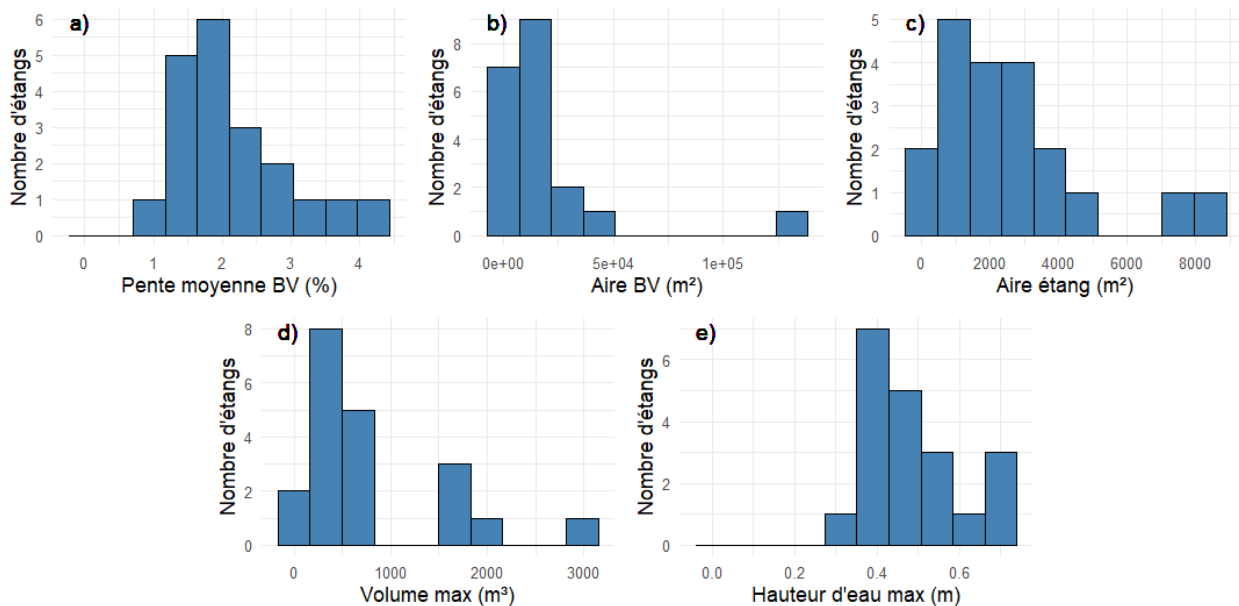


Figure 5 : Histogrammes de fréquence pour a) la pente moyenne des bassins versants, b) aire des bassins versants, c) aire des étangs, d) le volume d'eau maximum emmagasiné, e) la hauteur d'eau maximale dans l'étang.

Une attention particulière est portée ici sur les hauteurs d'eau dans les étangs, puisque cette variable peut être associée à un proxy de la profondeur maximale de chaque étang. Les niveaux d'eau quotidiens moyens mesurés ont varié de 0,18 m (TM146, 2021) m à 0,71 m (étang AT16-37, 2022). La valeur médiane de 0,47 m est du même ordre de grandeur que celle rapportée par Roux et al. (2023) pour des étangs temporaires forestiers en Outaouais. Il est intéressant de noter que les niveaux d'eau les plus élevés ont été observés dans les étangs en 2024 et que les niveaux ont été relativement similaires pour les autres années (**Figure 6**). Le printemps humide de 2024 ainsi que les précipitations importantes liées à l'ouragan Debby au mois d'août 2024 semblent avoir entraîné des niveaux d'eau particulièrement élevés dans les étangs.

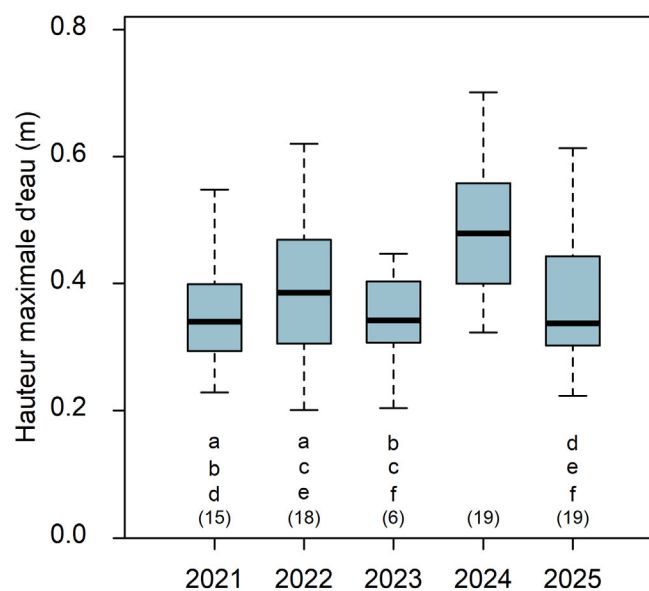


Figure 6 : Niveaux d'eau maximums de 2021 à 2025. Deux années ayant la même lettre n'ont pas des niveaux statistiquement différents (analyse par paires) et les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre d'étangs pour lesquels des données sont disponibles chaque année.

4.3 Ouverture de la canopée

L'ouverture de la canopée mesurée en 2021 varie de 45,2 % (SH16) à 92,6 % (IP140) pour les 20 étangs (**Figure 7** et **Tableau 5**, Annexe A), avec une médiane de 72,9%. Les mesures effectuées en 2023 varient de 5,8 % (JM109) à 92,6 % (BCV2) avec une médiane de 26,6 %. Les sites P5 et TMA505 visés par la LEP n'ont pas été visités à l'automne 2023. Il est très difficile d'expliquer les différences entre les deux années de mesure. Il est possible que la canopée ait changé entre 2021 et 2023, mais il semble plus probable que les différences soient dues à des erreurs ou des imprécisions au moment des mesures. Ces valeurs sont considérées comment

étant relativement imprécises. Néanmoins, deux types d'étangs se distinguent en termes d'ouverture de la canopée (**Figure 8**), certains sites montrant une importante présence d'arbustes en périphérie de l'étang et une portion centrale complètement ouverte (AT16-37, BCV2, BTRF, FUT3, IP004, IP140, IP142 et IP180) tandis que d'autres étant sous couvert forestier (AT18-10, BL024, IP18-02, JM060, JM109, LP16-08, P5, SH16, TM146, TM15-01 et TMS05). Le site BA1 présente un secteur forestier et d'autres secteurs plus ouverts avec présence d'arbustes. Des frênes morts ont été observés principalement aux sites sous couvert forestier.

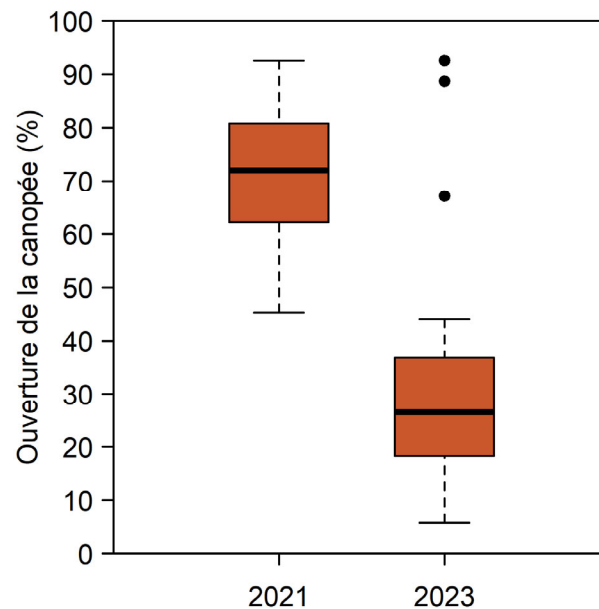


Figure 7 : Pourcentage d'ouverture de la canopée en 2021 et 2023



Figure 8 : Exemples types de végétation a) à la limite du site IP004 et b) au site LP16-08

4.4 Données hydrologiques

4.4.1 Hydropériode et indice d'hydropériode

Le début calculé de l'activité hydrologique correspond au 7 avril 2021, 8 avril 2022, 11 avril 2023, 30 mars 2024 et 14 avril 2025. Ces variations interannuelles pendant la période d'étude sont relativement limitées, mais l'analyse des données des cinq années précédentes semblait montrer une tendance vers les dates plus précoces de débuts d'HP depuis le début des calculs (cf. Larocque et al., 2020) (**Figure 9**). Les valeurs calculées entre 2016 et 2025 sont assez similaires, mais généralement plus tardives de 2-3 jours que les dates des 1^{ers} chants fournies par Bouthillier (communication personnelle). L'année 2024 montre un écart beaucoup plus grand, avec un début de HP calculée 22 jours plus tardif que la date des 1^{ers} chants. Ceci pourrait être expliqué par le fait que, cette année-là, le couvert de neige a fondu très tôt sans que le couvert de glace soit tout à fait fondu. Ceci a pu dégager des espaces d'eau libre où les rainettes ont pu commencer à s'activer et où des chants ont été entendus de manière précoce. Il est important de souligner que le calcul réalisé pour identifier le début de HP est une approximation de la journée à laquelle l'étang devient dégagé de glace. Bien que les 1^{ers} chants dépendent des visites de terrain par des observateurs sur un nombre réduit de sites, ces valeurs sont probablement l'estimation la plus fiable qui soit disponible au sujet du début de l'activité de reproduction des rainettes.

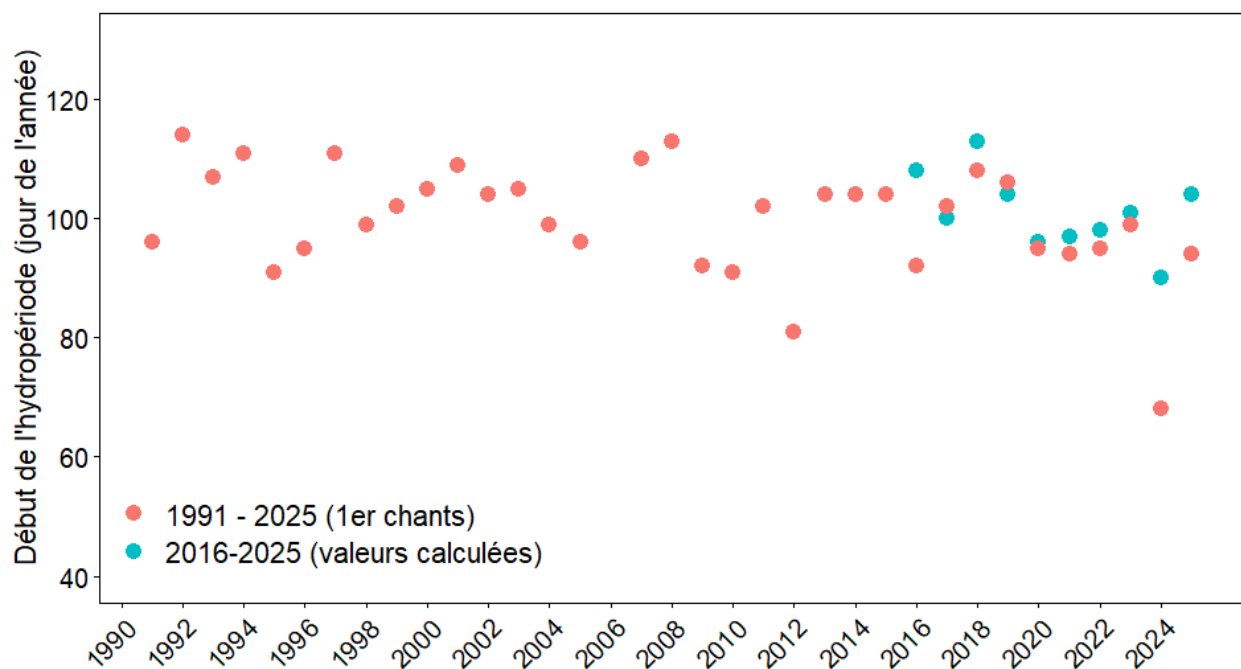


Figure 9 : Début de l'hydropériode calculée et découlant des chants de rainettes enregistrés au printemps entre 2021 et 2025

Afin de standardiser la démarche, la durée des HP a été quantifiée en utilisant les débuts d'hydropériodes calculés. Pour l'ensemble des données disponibles (tous les sites et toutes les années), les HP ont varié de 39 jours (TM146 en 2023) et 136 jours (SH16 en 2022) (médiane 65 jours ; **Figure 10** et **Tableau 6**, Annexe A). D'une année à l'autre, les HP sont toutefois très variables avec des médianes de 54 jours en 2021, 96 jours en 2022, 53 jours en 2023, 68 jours en 2024 et 84 jours en 2025. Il est important de souligner que le nombre de données disponibles a varié d'une année à l'autre. Dans certains cas, les données ont été interrompues en cours de saison pour cause de défaillance des sondes ou de problèmes techniques lors de l'installation (notamment en 2023) tandis que, pour d'autres sites, les étangs ne se sont pas asséchés entre le début avril et la septembre (surtout en 2022 et 2024, mais aussi en 2023 ; tous les sites se sont asséchés en 2021 et 2025). Ceci peut teinter l'apparente variabilité interannuelle des HP. À l'exception de 2021 et de 2023, une majorité de sites a eu des HP atteignant ou dépassant le seuil de 60 jours (39 % en 2021, 81 % en 2022, 43 % en 2023, 90 % en 2024 et 95 % en 2025), c.-à-d. dans la fourchette de durées considérées suffisamment longues pour assurer la survie des rainettes juvéniles (Whiting, 2004).

L'analyse statistique montre que les valeurs de HP sont significativement différentes entre 2021 et 2022 ($p = 0,0082$), entre 2021 et 2024 ($p = 0,0003$) et entre 2021 et 2025 ($p = 3,8 \times 10^{-5}$) (**Figure 10**). Les valeurs de HP sont aussi significativement différentes entre 2022 et 2023 ($p = 0,0292$), entre 2023 et 2024 ($p = 0,0109$) et entre 2023 et 2025 ($p = 0,0020$). Les HP sont donc significativement plus faibles en 2021 que pour toutes les autres années, sauf 2023, et plus faibles en 2023 que pour toutes les autres années, sauf 2021. Les faibles précipitations printanières (avril, mai et juin) de 2021 (144 mm) comparées à celles plus importantes de toutes les autres années (391 mm en 2022, 253 mm en 2023, 320 mm en 2024 et 257 mm en 2025) pourraient expliquer ces écarts. Les différences entre 2023 et les années 2022, 2024 et 2025 pourraient être dues au nombre limité de sites disposant de données en 2023 et pour lesquels les HP étaient généralement plus courts. Il est intéressant de souligner que, malgré une saison estivale très sèche en 2025, le printemps a été suffisamment pluvieux pour que les HP soient relativement longues.

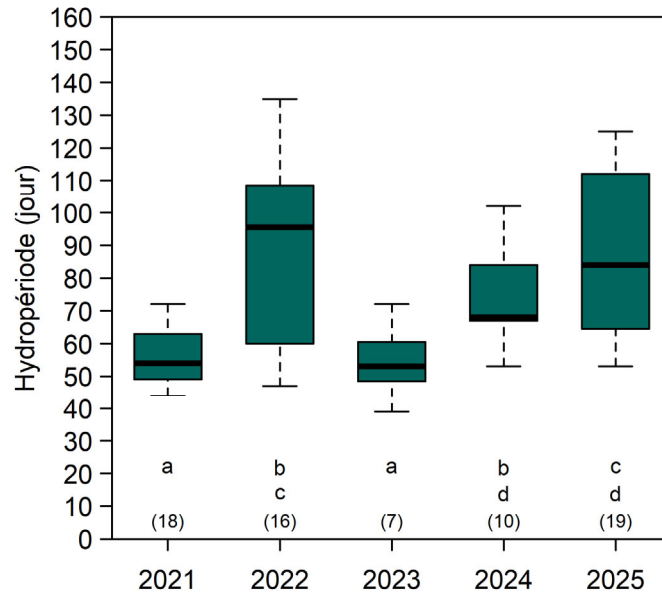


Figure 10 : Durée de l'hydropériode (HP) de 2021 à 2025. Deux années ayant la même lettre n'ont pas des HP statistiquement différentes (analyse par paires) et les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre d'étangs pour lesquels des données sont disponibles chaque année.

Pour l'ensemble des données disponibles (tous les étangs et toutes les années), les HPi varient de 0,27 (TM146 en 2021) à 1 (plusieurs étangs ne se sont pas asséchés en 2022, 2023 et 2024) (médiane 0,71 ; **Figure 11** et **Tableau 6**, Annexe A). Les étangs qui ne se sont pas asséchés sont généralement considérés comme suboptimaux pour la rainette. D'une année à l'autre, les HPi sont toutefois très variables avec des médianes de 0,34 en 2021, 0,82 en 2022, 0,93 en 2023, 1 en 2024 et 0,62 en 2025. Statistiquement, les HPi se distinguent des HP, car les HPi peuvent être calculés lorsque les étangs ne se sont pas asséchés. Les résultats montrent un contraste marqué entre 2021 et les autres années. L'année 2025 se distingue également avec un HPi supérieur à celui de 2021, mais nettement inférieur à celui de 2022, 2023 et 2024. Ceci s'explique probablement par les conditions météorologiques très sèches entre juillet et septembre.

L'analyse statistique montre que les HPi de 2021 sont statistiquement différents de toutes les autres années (2022 $p = 2,2 \times 10^{-7}$, 2023 $p = 3,4 \times 10^{-5}$, 2024 $p = 1,8 \times 10^{-7}$ et 2025 $p = 3,0 \times 10^{-7}$) (**Figure 11**). Une différence significative est également identifiée entre 2022 et 2024 ($p = 0,044$), entre 2022 et 2025 ($p = 0,0001$), entre 2023 et 2025 ($p = 0,0005$) et entre 2024 et 2025 ($p = 7,5 \times 10^{-6}$). Les années 2021 et 2025 se distinguent donc comme les deux années significativement différentes des autres, avec des HPi plus bas, mais les deux années sont statistiquement différentes l'une de l'autre.

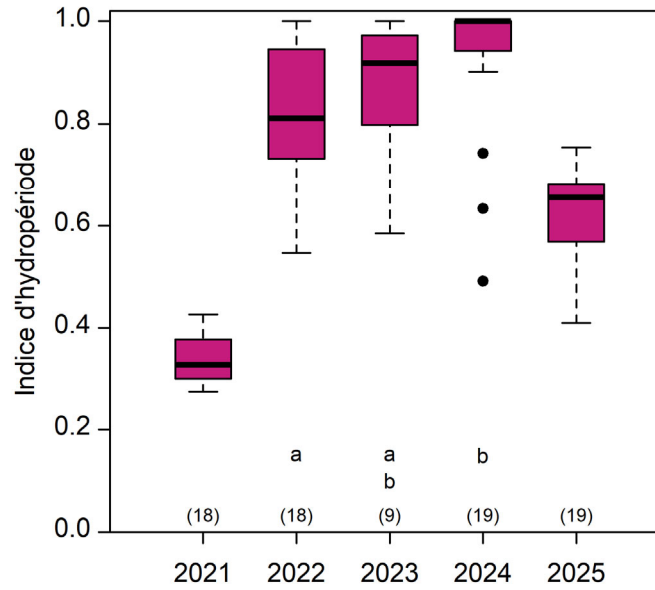


Figure 11 : Indice d'hydropériode (HPI) de 2021 à 2025. Deux années ayant la même lettre n'ont pas des HPI statistiquement différentes (analyse par paires) et les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre d'étangs pour lesquels des données sont disponibles chaque année.

4.4.2 Niveaux d'eau dans les étangs et dans la nappe

La dynamique des variations de niveaux d'eau est similaire entre les étangs pour toutes les années, avec une baisse graduelle entre le début de l'activité hydrologique et la fin du printemps. La majorité des étangs s'assèchent pendant l'été, ce qui est indiqué par une ligne horizontale sur les figures de l'Annexe B. Il est important de souligner ici qu'en raison de la position des sondes mesurant les niveaux d'eau dans les étangs, il est possible qu'un faible niveau sous la surface du fond de l'étang soit observé après l'assèchement. Ces valeurs ont été considérées comme non représentatives de la présence d'eau dans la cuvette de l'étang et les données ont été corrigées à un niveau de 0 m, ce qui représente un étang sec. Les niveaux d'eau dans les étangs et dans la nappe ont été mesurés toute l'année, mais les données hivernales n'ont pas été utilisées dans les analyses, en raison du couvert de glace et de neige qui rendent leur interprétation difficile.

Au cours de l'été 2021 (particulièrement sec), seuls les étangs IP004 et TM15-01 se sont réactivés après des précipitations estivales. En 2022, quatre sites ont été inondés tout au long de l'été et les étangs qui se sont asséchés se sont tous réactivés en juillet après un événement pluvieux important. En 2023, la réactivité des sites a été importante aux sept sites où les données étaient disponibles, deux sites sont restés inondés durant toute cette période ou se sont asséchés

brèvement, et les étangs asséchés se sont tous réactivés au cours de l'été. En 2024, les 11 étangs qui se sont asséchés se sont tous réactivés le 23 juin, après un événement pluvieux de 36 mm. L'événement pluvieux majeur du 9 août 2024 (135 mm, ouragan Debby) est visible sur l'ensemble des chroniques. Au cours de l'été 2025, tous les étangs étaient secs au mois d'août. Quelques étangs se sont asséchés plus tôt en juin, puis réactivés en juillet pour plusieurs jours (AT16-37, AT18-10, BCV2, BL024, FUT3, IP18-02, IP180, JM060, TM146).

La connectivité entre l'étang et la nappe la plus importante, identifiée par des niveaux d'étang et de nappe similaires, a été observée aux sites AT16-37 (2022), BCV2 (2024), BL024 (2025), IP140 (2023) et IP18-02 (2023, 2024 et 2025). Une déconnexion permanente est visible au site BA1 depuis le début du suivi et temporaire au site JM109 en saison estivale. Les chroniques des sites IP180, JM060 et P5 montrent des niveaux de nappe généralement plus élevés que ceux de surface. De ce fait, des déconnexions permanentes semblent visibles aux sites IP180 et P5 alors qu'une déconnexion partielle est observable hors saisons estivales au site JM060.

Pour tous les étangs à l'exception du LP16-08, le niveau de la nappe est descendu sous la base des piézomètres en 2021 (ligne horizontale). En 2022, c'était le cas de huit sites et en 2023 pour quatre sites seulement (à noter que moins de données étaient disponibles en 2023). En 2024, le niveau de la nappe est descendu sous la base des piézomètres pour six sites (AT18-10, BA1, BL024, FUT3, SH16 et TM15-01). Au cours de l'année 2025, qui a été particulièrement sèche, le niveau de la nappe est descendu sous la base des piézomètres à tous les étangs.

4.4.3 Taux d'abaissement

Pour l'ensemble des données disponibles, la valeur médiane du taux d'abaissement relatif (TAR) varie de 3,02 mm/mm (P5 en 2022) à 7,18 mm/mm (FUT3 en 2022) pour l'eau de surface et de 4,94 mm/mm (IP18-02 en 2021) à 14,68 mm/mm (BL024 en 2022) pour l'eau souterraine (**Tableau 7**, Annexe A). Pour tous les piézomètres dans les étangs, les TAR sont supérieurs à 1, c.-à-d. que la baisse du niveau d'eau est supérieure à l'évapotranspiration potentielle. Ces résultats indiquent que l'évapotranspiration n'est pas le seul processus responsable de la baisse des niveaux d'eau dans les étangs, mais que l'infiltration à travers le fond de l'étang peut aussi contribuer à l'abaissement des niveaux d'eau (Chandler et al., 2017 ; Roux et al., 2023). Le fait que les TAR médians pour l'eau souterraine soient supérieurs à ceux des étangs (**Figure 12**) peut toutefois être trompeur, car les TAR des piézomètres dans la nappe ne tiennent pas compte de la porosité effective des sédiments, ce qui pourrait réduire de manière marquée les TAR. La porosité effective des sédiments à la base des étangs étant très incertaine, il n'est pas possible d'estimer le TAR réel de la nappe. Néanmoins, il semble probable que l'évapotranspiration n'a

qu'un effet limité sur la baisse des niveaux de nappe. L'apport provenant de l'aire de drainage de l'étang et la vidange par trop-plein de surface peuvent aussi influencer la baisse des niveaux d'eau. Certains sites qui ne se sont pas asséchés certaines années (p.ex., BA1, BTRF, IP142, P5 et TMA505) ont des couches argileuses plus épaisses à leur base. La géologie locale pourrait également expliquer les taux d'abaissement relatif de ces sites qui sont parmi les plus faibles mesurés.

Plusieurs étangs ne présentent pas de résultats de TAR pour l'eau souterraine. Ceci s'explique par le fait que les critères de calculs des TAR n'ont pas été remplis lors des années du suivi, soit en raison d'un étang inondé en permanence, en raison de l'absence de variations de niveaux d'eau souterraine lorsque l'étang était sec entre le 1^{er} avril et le 30 septembre ou en raison d'un nombre insuffisant de niveaux d'eau souterraine (< 9) pour effectuer un calcul de TAR représentatif.

Les TAR supérieurs à 1 démontrent que la baisse du niveau dans l'étang peut s'expliquer par une combinaison d'évapotranspiration et d'infiltration à partir du fond de l'étang. Une valeur plus élevée de TAR dans l'étang indique que l'infiltration est plus importante, ce qui est une information importante pour évaluer la connectivité des étangs avec l'eau présente dans les sédiments sous-jacents, et ce, malgré la présence de sédiments fins sur un grand nombre de sites. Toutefois, il est important de rappeler que TAR résulte d'un calcul plus complexe et indirect que HP et HPI lesquels sont basés sur l'observation directe de la présence ou de l'absence d'eau dans l'étang. TAR est donc une information moins précise dont la valeur médiane représente une population de plusieurs événements d'infiltration pendant l'été.

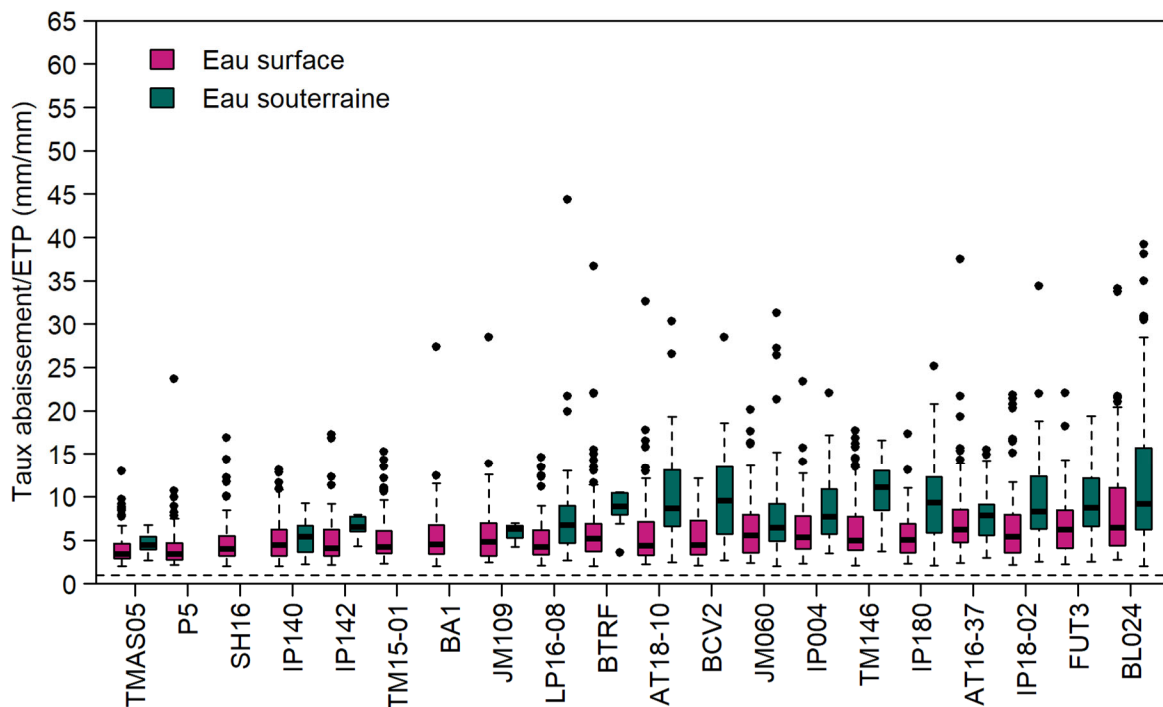


Figure 12 : Taux d'abaissement relatif (TAR) pour l'eau de surface et pour l'eau souterraine depuis le début des suivis

4.5 Facteurs influençant HP, HPi et TAR

Une analyse corrélatrice de Spearman (coefficient de corrélation croisée de Spearman r_s) a été faite entre les HP, HPi et TAR de chaque année et des variables de température, de précipitations, d'évapotranspiration, de précipitations nettes ainsi qu'avec des paramètres physiques (**Figure 13**). Il est important de souligner ici que les corrélations entre les variables de température et TAR ne sont pas analysées. Le calcul de TAR inclut l'évapotranspiration calculée selon Oudin et al. (2005) qui est basée sur la température de l'air. Chercher des corrélations entre la température et TAR mènerait à des résultats biaisés.

Les résultats montrent qu'une augmentation des températures maximale, moyenne et minimum des différents mois (mars à septembre) diminue HP (à l'exception de la température maximale de juillet) et que l'effet est similaire pour tous les mois. Ceci est en lien direct avec l'évapotranspiration mensuelle qui a un effet similaire sur HP. Les précipitations de mai sont celles qui influencent le plus HP ($r_s = 0,62$), c.-à-d. que plus il pleut en mai, plus HP est long. Les précipitations de juin, les précipitations totales et la quantité totale de neige ont des effets similaires, mais avec des r_s plus faibles. La hauteur d'eau maximale dans l'étang est le paramètre physique qui a le plus

d'impact sur HP ($r_s = 0,41$), une augmentation de la hauteur d'eau entraînant un allongement de HP. Une couverture de canopée plus importante semble diminuer HP, de manière similaire à ce que Roux et al. (2023) ont observé dans les étangs temporaires de l'Outaouais. Toutefois, comme ces données sont considérées comme imprécises, il est hasardeux de pousser plus loin l'interprétation.

L'effet des températures mensuelles sur HPi est moins clair que sur les HP, une température élevée entraînant parfois une HPi plus grande, parfois une HPi plus faible. Toutefois, une augmentation des précipitations mensuelles (tous les mois sauf septembre), ainsi que les précipitations totales entre avril et août, ainsi que les précipitations sous forme de neige allongent le HPi, l'effet le plus marqué étant observé pour le mois d'août ($r_s = 0,82$). Comme pour les températures, les évapotranspirations mensuelles influencent de manière variée le HPi. Seule la hauteur maximale d'eau dans l'étang influence HPi de manière significative, une hauteur d'eau plus grande étant corrélée à une HPi plus importante, ce qui paraît intuitif.

Les TAR des étangs augmentent avec les précipitations de presque tous les mois et sont influencés, en particulier par les précipitations nettes du mois de mars ($r_s = 0,55$), c.-à-d. plus les précipitations sont importantes, plus le taux d'abaissement relatif à l'évapotranspiration sera élevé. Ceci indique sans doute que des précipitations importantes en mars génèrent des niveaux d'étang plus élevés qui s'abaisseront plus vite jusqu'au moment de l'assèchement. Le volume maximum de l'étang et la canopée sont les deux seuls paramètres physiques qui influencent TAR, c.-à-d. plus l'étang contient d'eau et plus la canopée est importante, plus le taux d'abaissement relatif de l'étang est important. Pour le volume de l'étang, ce résultat s'explique par le fait qu'il y a une charge plus grande en surface et donc une pression plus importante qui entraîne un gradient hydraulique plus grand et un potentiel d'infiltration plus important. Pour la canopée, il est probable qu'une présence importante d'arbres accélère la baisse du niveau de la nappe sous l'étang, ce qui induit un gradient hydraulique étang-nappe plus grand et un TAR plus important. Il est également possible que les arbres pompent directement l'eau des étangs.

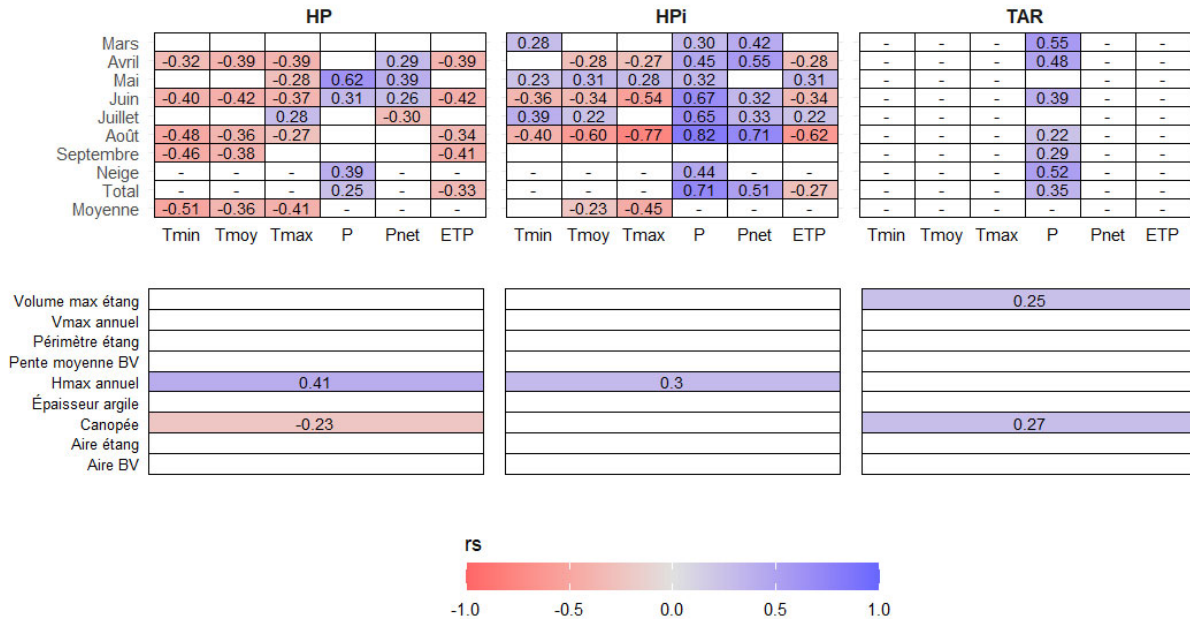


Figure 13 : Coefficients de corrélation croisée de Spearman (rs) statistiquement significatifs ($p < 0.05$) entre les trois variables étudiées (HP, HPi et TAR de l'étang) et les températures, les précipitations, les évapotranspirations, les précipitations nettes et les paramètres physiques. Les cases vides représentent des corrélations non significatives. Les traits horizontaux représentent des analyses qui ne s'appliquent pas pour une variable spécifique.

4.6 Modèles statistiques explicatifs des variables hydrologiques

La modélisation statistique a permis d'identifier les variables et paramètres qui permettent d'expliquer au mieux les HP, HPi et TAR des étangs. Dans les trois cas, des modèles simples et combinés ont été testés. Les équations 2 à 4 représentent les modèles retenus pour HP (modèle combiné retenu), HPi et TAR de surface (modèles météo simples retenus). Les modèles permettent de reproduire relativement bien les HP et les HPi, mais un peu moins bien les TAR (**Figure 14, Tableau 2**).

$$HP = 29.34 + 0.51 P_{tot-mai} + 42.5 h_{max-an} \quad \text{éq. (2)}$$

$$\log(HPi) = -0.38 + 0.0016 P_{tot-août} \quad \text{éq. (3)}$$

$$\log(TAR) = 0.57 + 0.0029 P_{tot-mars} \quad \text{éq. (4)}$$

où $P_{tot-mois}$ représente la précipitation totale pour un mois donné (mm) et h_{max-an} représente la hauteur d'eau maximale dans l'étang chaque année (m).

Il est important de souligner que, pour tous les modèles produits, la différence entre le R^2 marginal et le R^2 conditionnel est très grande (**Tableau 2**). Le R^2 marginal indique que les effets fixes (variables météorologiques et paramètres physiques) ont une bonne influence sur la variable expliquée (HP, HPi ou TAR). Cependant, les effets aléatoires expliquent aussi une grande partie de la variance totale, c'est-à-dire que les conditions météorologiques annuelles et les caractéristiques propres aux étangs expliquent une grande partie de la variabilité de la variable hydrologique concernée. Ceci signifie aussi que les variables hydrologiques varient beaucoup d'une année à l'autre et d'un étang à l'autre. Cette amélioration de performance induite par l'ajout des effets aléatoires aux modèles est une indication que la structure des modèles est bonne et qu'elle permet de bien dégager les relations des effets fixes avec la variable expliquée, renforçant ainsi la validité et la crédibilité des modèles.

Tableau 2. Statistiques liées aux modèles statistiques

	R^2 marginal*	R^2 conditionnel**	RMSE (erreur quadratique moyenne)	Commentaires
HP	0.39	0.82	10.0 jours	Inclut des effets aléatoires sur l'année et l'identifiant de l'étang Modèle combiné (variable météo + paramètre physique)
HPi	0.49	0.93	0.035	Inclut des effets aléatoires sur l'année et l'identifiant de l'étang Modèle simple (variable météo)
TAR	0.24	0.65	0.063	Inclut des effets aléatoires sur l'année et l'identifiant de l'étang Modèle simple (variable météo)

* R^2 marginal : exprime la variance expliquée par les effets fixes seulement (précipitation et hauteur d'eau)

* R^2 conditionnel : exprime la variance expliquée lorsque l'on ajoute les effets aléatoires

Pour le HP, le modèle combinant la précipitation totale du mois de mai et la hauteur d'eau annuelle a été retenu. Celui-ci suggère que, pour chaque étang et chaque année, des précipitations printanières (mois de mai) plus importantes et une hauteur d'eau annuelle plus élevée ont tendance à entraîner des HP plus longues, donc à réduire la tendance à l'assèchement. Plus précisément, le modèle indique qu'en moyenne, une augmentation de 10 mm dans les précipitations du mois de mai prolonge l'hydropériode de 5,1 jours, et une augmentation de 0,5 m de la hauteur d'eau maximale annuelle dans l'étang est associée à un allongement de 21,3 jours de l'hydropériode. Les effets d'autres changements de précipitations ou de niveaux peuvent être facilement être estimées à partir des équations présentées plus haut. Dans leur étude des étangs temporaires forestiers de l'Outaouais, Roux et al. (2023) ont utilisé les précipitations totales de mars à juin ainsi que le périmètre maximum pour estimer HP.

En ce qui concerne le HPI, le modèle physique simple a démontré une influence significative de la hauteur d'eau annuelle. Cependant, lorsqu'une variable météo, ici la précipitation totale du mois d'août, est ajoutée pour tenter un modèle combiné, la relation avec la hauteur d'eau est obscurcie par celle avec la météo qui est très forte. Un modèle météo simple a donc été retenu. Une transformation logarithmique du HPI a été effectuée pour stabiliser la variance du modèle et améliorer sa validité. Ici, le modèle nous indique que des précipitations plus importantes au mois d'août occasionnent des HPI plus grands, et donc que l'étang tend à être humide pendant une plus longue fraction de la saison. Il est possible que ces conditions humides prolongées contribuent à maintenir des niveaux plus élevés jusqu'à la fin de l'automne et au début du printemps suivant, mais ceci n'a pas pu être vérifié. La transformation logarithmique implique une relation exponentielle entre les précipitations d'août et le HPI qui s'interprète comme suit, selon les coefficients du modèle : chaque millimètre additionnel de précipitations accroît le HPI de 0,37 %, en moyenne. En conséquence, plus le HPI d'un étang est grand, plus son augmentation pour chaque millimètre de précipitations supplémentaires est importante. Roux et al. (2023) ont rapporté un MLM incluant à la fois les précipitations totales de juin à août et le périmètre maximum de l'étang comme étant la combinaison optimale.

Pour le TAR, aucune variable physique n'a permis de produire un modèle significatif et valide. Un modèle météo simple a donc été retenu, mettant en relation le TAR avec la précipitation totale du mois de mars. La transformation logarithmique du TAR permet ici aussi de stabiliser la variance du modèle et d'améliorer sa validité. À l'inverse des autres modèles, celui-ci indique que d'importantes précipitations au mois de mars entraîneraient des TAR plus élevés, donc un assèchement plus rapide. Ici aussi, la transformation logarithmique implique une relation exponentielle entre les précipitations nettes du mois de mars et le TAR. Ici, chaque millimètre additionnel de précipitations accroît le TAR de 0,65 %, en moyenne, et plus le TAR d'un étang est grand, plus son augmentation pour chaque millimètre de précipitation supplémentaire est importante. Bien que cette relation puisse sembler contre-intuitive, des apports précoces importants pourraient élever le niveau maximal des étangs, entraînant un abaissement total relatif à la précipitation nette plus élevée sans nécessairement indiquer un assèchement plus rapide. Roux et al. (2023) ont trouvé un lien inverse entre TAR et les précipitations (dans leur cas, les précipitations totales de janvier à avril), mais aussi dans un MLM nettement moins significatif statistiquement. Il est important de rappeler que les données de TAR sont moins précises que HP et HPI, car découlant d'un calcul plus complexe et indirect. De surcroît, les TAR utilisés dans le MLM sont les médianes d'un ensemble de données obtenues chaque année tout au long de la

saison estivale. Il n'est donc pas surprenant que le modèle identifié soit un peu moins performant que les deux autres.

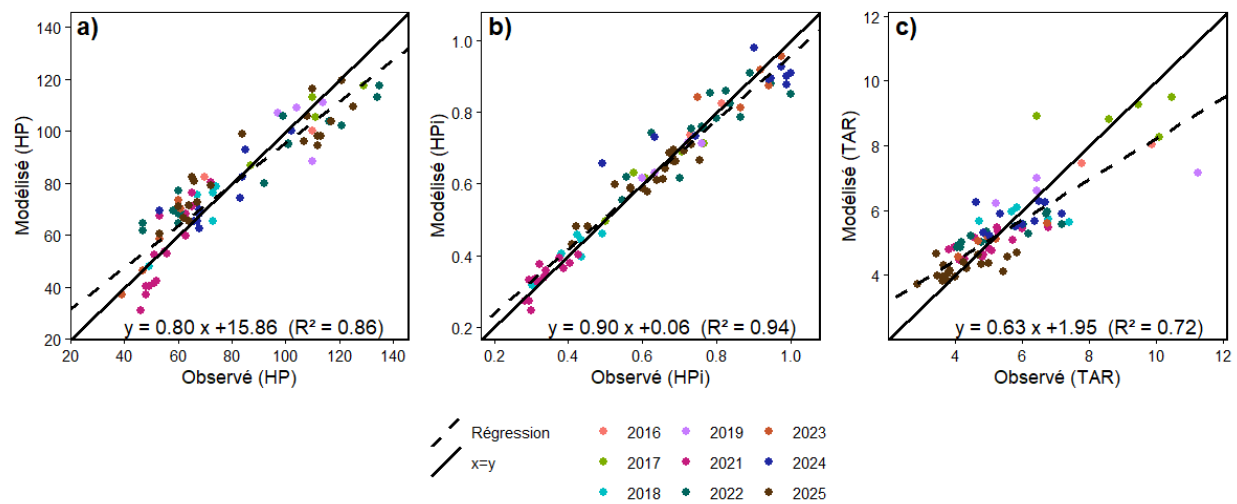


Figure 14 : Comparaison entre les variables hydrologiques observées et modélisées a) HP, b) HPI et c) TAR

4.7 Conditions futures

Les périodes correspondant aux observations (OBS ; 2016-2025) et aux scénarios climatiques de références (REF ; 1991-2020) se recoupent sur cinq années seulement. Néanmoins, les précipitations, les évapotranspirations potentielles et les températures mensuelles médianes des deux groupes d'années sont relativement similaires (Tableau 3

Tableau 3. Précipitations (P), évapotranspirations potentielles (ETP) et températures observées entre 2016 et 2025 et provenant des scénarios climatiques). Il est important de souligner que la distribution intra-annuelle des précipitations n'est pas la même entre la période 2016-2025 et la période de référence. En comparant les variables P, ETP et T des scénarios pour la période future avec ceux de la période de référence, les données montrent que les conditions climatiques seront plus chaudes et plus humides, et qu'il y aura plus d'évapotranspiration dans le futur. Les précipitations annuelles augmenteront légèrement (1102 à 1191 mm), la température moyenne augmentera de 7,1 °C à 9,5 °C et l'évapotranspiration potentielle sera également plus élevée (660 à 739 mm). À l'échelle journalière, les données montrent, sans surprise, que les précipitations plus intenses seront plus fréquentes, que les évapotranspirations potentielles élevées seront plus fréquentes, que les températures froides seront plus rares, et que les températures élevées seront plus fréquentes (**Figure 15**).

Tableau 3. Précipitations (P), évapotranspirations potentielles (ETP) et températures observées entre 2016 et 2025 et provenant des scénarios climatiques pour la période de référence (1991-2020) et pour la période future (2041-2070)

Mois	P (mm)			ETP* (mm)			T (°C)		
	OBS	REF	FUT	OBS	REF	FUT	OBS	REF	FUT
Janvier	13–78 (54)**	77***	90	1–4 (2)	2	3	-12,2–4,3 (-6,8)	-8,6	-5,3
Février	19–135 (57)	65	77	1–7 (3)	3	5	-8,9–3,6 (-7,1)	-7,7	-4,9
Mars	48–130 (62)	80	91	9–23 (17)	13	18	-5,4–1,9 (-0,6)	-2,0	0,1
Avril	68–139 (103)	101	110	34–54 (46)	46	54	3,0–8,2 (6,3)	6,1	8,0
Mai	10–108 (76)	99	107	83–106 (93)	92	102	11,6–16,1 (13,7)	13,1	15,1
Juin	23–176 (108)	106	110	112–135 (121)	124	134	16,9–21,4 (18,8)	18,7	20,8
Juillet	69–213 (106)	108	111	122–146 (140)	137	148	19,0–23,7 (22,4)	21,4	23,4
Août	27–251 (115)	90	89	103–124 (112)	116	127	18,1–23,0 (20,0)	20,4	22,9
Septembre	26–157 (72)	88	100	64–77 (72)	74	83	14,2–17,8 (16,3)	16,2	18,9
Octobre	22–250 (107)	110	104	16–44 (36)	37	42	6,7–14,7 (10,4)	9,5	11,5
Novembre	2–114 (69)	90	100	6–16 (12)	13	16	-1,7–4,6 (2,0)	2,9	4,5
Décembre	52–145 (79)	88	102	2–6 (4)	4	6	-8,6–1,2 (-4,7)	-4,3	-1,4
Total ou médiane	1012	1102	1191	653	660	739	7,7	7,1	9,5

* : L'évapotranspiration potentielle est calculée avec la méthode de Oudin et al. (2005).

** : Valeurs observées minimum et maximum, avec la médiane entre parenthèses.

*** : Pour les scénarios de référence (REF) et futurs (FUT), les valeurs présentées sont les médianes.

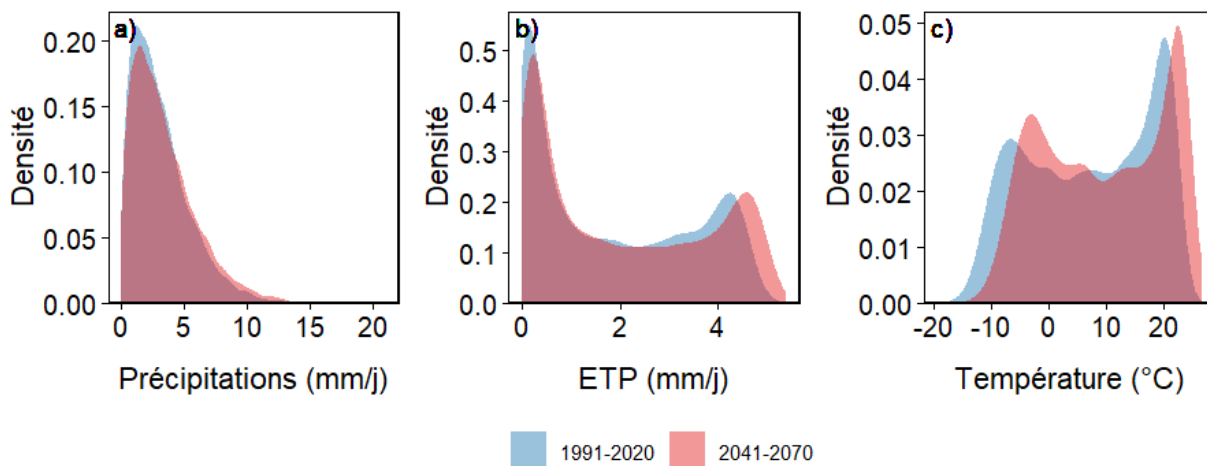


Figure 15 : Comparaison entre la période de référence (1991-2020) et la période future (2041-2070) des fonctions de densité a) de la précipitation journalière, b) de l'évapotranspiration journalière (ETP) et c) de la température journalière

Les données de températures provenant des scénarios climatiques permettent d'évaluer les dates possibles de début de HP pour la période de référence et pour l'horizon futur, et de les comparer avec les valeurs calculées pour la période 2016-2025, le calcul étant le même dans les trois cas (**Figure 16**). Les résultats montrent que le début médian des HP avec les données de la période

de référence est légèrement plus hâtif (7 avril) que celui calculé avec les températures observées (9 avril), mais qu'il n'y a pas de différence significative entre ces groupes de données ($p = 0,23$). La gamme des HP découlant des températures de la période de référence est toutefois beaucoup plus étendue que celle observée entre 2016 et 2025. Ceci peut s'expliquer en partie par le plus grand nombre d'années utilisées (30 ans comparativement à 10 ans), mais il semble que les scénarios de référence génèrent occasionnellement des hivers plus chauds que les conditions réellement observées (hydropériodes parfois plus précoces dans les scénarios 1991-2020 que dans les données observées). Le début de HP médian pour l'horizon futur est significativement plus hâtif que pour la période de référence ($p < 0,001$) et pour la période observée ($p < 0,001$). Avec les températures futures, le début médian des HP est 11 jours plus tôt que celui de la période de référence (27 mars).

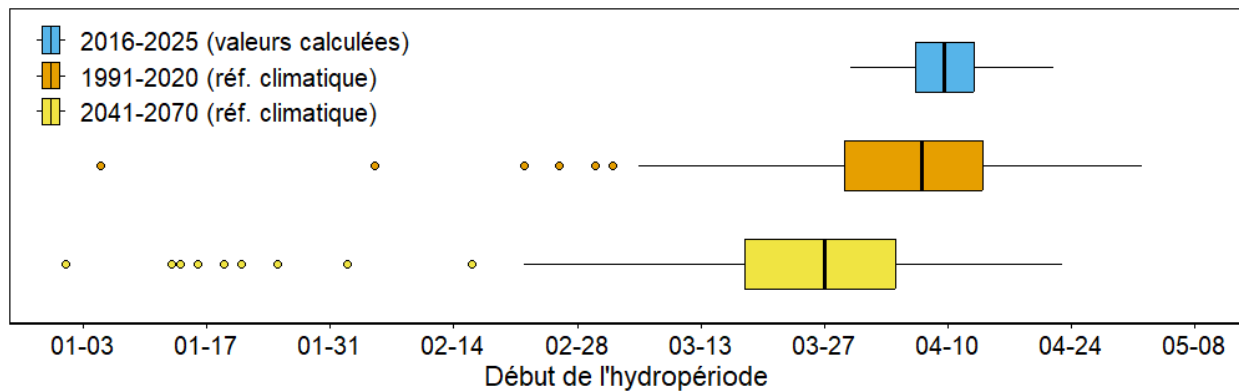


Figure 16 : Début de l'hydropériode calculée pour la période 2016-2025, pour la période de référence climatique (1991-2020) et pour l'horizon climatique futur (2041-2070)

Les scénarios climatiques de référence et future montrent une augmentation de la médiane des précipitations de mars de 11 mm (utilisée dans le modèle statistique de TAR), une augmentation de la médiane des précipitations de mai de 8 mm (utilisée dans le modèle statistique de HP), et une diminution de la médiane des précipitations d'août de 1 mm (utilisée dans le modèle statistique de HPI). Ces valeurs médianes ont été utilisées pour estimer les changements futurs des trois variables hydrologiques.

Les résultats montrent que l'augmentation des précipitations futures de mai amènerait un allongement médian de HP de 4 jours. Puisque les précipitations futures d'août changent très peu, le HPI médian ne devrait pas être modifié de manière marquée. Avec l'augmentation des précipitations de mars, le TAR pourrait augmenter de 0,5 mm/mm. Il est important de souligner que ces médianes reflètent des valeurs très variables dans les 30 années et les sept scénarios

climatiques analysés pour les périodes de référence et future. L'emploi des médianes ne représente donc pas la variabilité des conditions futures possibles. Toutefois, considérant la simplicité des modèles statistiques ayant pu être développés, il serait hasardeux de pousser l'interprétation plus loin.

5 BILAN DES RÉSULTATS

5.1 Principales observations

Les conditions météorologiques ont été variables de 2021 à 2025. Les étés 2021 et 2025 ont été particulièrement secs et l'hiver 2024 a été peu enneigé. Ces conditions ont des impacts importants sur les variables hydrologiques.

Les étangs étudiés reposent presque tous sur une couche de matériaux fins (silt et argile) relativement peu épaisse, mais variable d'un site à l'autre. Dans presque tous les cas, des matériaux plus perméables se trouvent en dessous. Les étangs présentent donc un potentiel de connectivité hydrologique avec les matériaux sous-jacents. Cette connectivité est démontrée dans plusieurs sites par des niveaux dans les étangs et dans la nappe qui sont étroitement reliés.

Sauf pour quelques années, les débuts d'hydropériodes calculés à partir des températures de l'air représentent assez bien les dates de 1^{ers} chants observés sur le terrain de 2016 à 2025. L'estimation des dates de début de HP utilisée semble donc pertinente. Les résultats montrent que, chaque année, des étangs ont un HP dans l'intervalle de la longueur d'hydropériode propice pour assurer le succès reproducteur de la RFG, c.-à-d. 60-80 jours. Ces étangs sont toutefois moins nombreux en 2021, une année pendant laquelle le printemps et l'été ont été particulièrement secs (l'année 2023 n'est pas représentative en raison du petit nombre d'étangs avec des données disponibles). Pour les autres années, la médiane des HP est au centre de l'intervalle de viabilité (2024) ou nettement au-dessus (2022 et 2025).

Les HPI, qui reflètent l'activité hydrologique de la période entre avril et septembre, ont été très faibles en 2021 et relativement bas en 2025, en raison des conditions météorologiques sèches des deux étés. Les trois autres années ont eu des HPI très élevés et plusieurs étangs ne se sont pas asséchés, ce qui correspond à des conditions suboptimales pour la RFG.

Les valeurs des TAR montrent que les étangs sont généralement connectés au milieu géologique sous-jacent, ce qui indique que les matériaux fins situés sous les étangs ne bloquent pas l'infiltration. L'eau des étangs percole donc vers la nappe une partie de l'été. Il est possible que,

lorsque la percolation n'est pas observée, la nappe alimente les étangs. Ceci a été identifié avec les chroniques de niveaux, mais il n'y a pas d'indicateur pour confirmer les périodes d'alimentation.

Les analyses statistiques ont montré que plus il fait chaud, plus il y a de l'évapotranspiration à partir des étangs et plus HP diminue. De plus, plus les précipitations printanières sont importantes, plus HP est long. Une couverture plus importante de neige augmente aussi HP. Les précipitations d'avril à août entraînent également une augmentation de HPi. Fait intéressant, plus un étang est profond, plus HP et HPi sont élevés. Le TAR augmente avec les précipitations de presque tous les mois et il augmente aussi avec le volume maximum de l'étang, ce qui indique que plus il y a d'eau, plus le taux d'abaissement du niveau de l'étang est important comparativement à l'évapotranspiration. Ceci peut être directement relié à la charge hydraulique appliquée en surface.

Les modèles statistiques simples qui ont été développés permettent de représenter de manière satisfaisante les variables hydrologiques, en reliant 1) HP avec les précipitations du mois de mai la hauteur maximale d'eau dans l'étang, 2) HPi avec les précipitations d'août et 3) TAR avec les précipitations de mars. Ces modèles ont permis d'évaluer le gain des trois variables résultant d'une augmentation des précipitations ainsi que le gain pour HP d'une augmentation de la profondeur de l'étang.

Sans surprise en raison de l'augmentation des températures, les conditions futures provenant de sept scénarios climatiques SSP2-4.5 montrent que les débuts de HP seront significativement plus précoces à l'horizon 2041-2070 que pour la période de référence 1991-2020. Lorsque les précipitations médianes provenant des scénarios climatiques sont utilisées pour estimer les HP, HPi et TAR en conditions futures, les résultats montrent que la durée de HP ainsi que la variable TAR pourraient légèrement augmenter, tandis que HPi demeurerait à peu près le même. Les modèles statistiques sont toutefois très simples et ces estimations demeurent très incertaines.

5.2 Recommandations

Cette étude de 20 étangs sur cinq années a permis de faire de nombreuses observations au sujet de la dynamique hydrologique des étangs temporaires utilisés comme habitat pour la RFG. Le choix d'instrumenter un grand nombre d'étangs (20) a permis de récolter un nombre important de données, malgré certaines difficultés techniques rencontrées au fil du projet. Un suivi rigoureux des sites pendant cinq années a également permis d'analyser des conditions météorologiques

très contrastées, ce qui est particulièrement important pour augmenter la force des analyses statistiques.

Le protocole de caractérisation et de suivi s'est avéré pertinent et robuste dans l'ensemble. La superficie du bassin versant a été difficile à estimer, principalement en raison des pentes faibles et de la présence de fossés de drainage faisant dévier les directions d'écoulement. Les mesures de la canopée ont également donné des résultats mitigés et difficilement compatibles entre les deux années de mesure. Les sondes *HOBOT* utilisées pour les suivis de niveaux d'eau se sont avérées moyennement fiables. Étant donné l'importance d'avoir des chroniques ininterrompues pour obtenir des résultats robustes, il est recommandé d'utiliser des sondes plus fiables à moyen et long terme (p. ex : Solinst Levellogger 5, *HOBOT* U20).

Les variables HP et HPI se sont avérées très utiles pour comprendre la dynamique hydrologique des étangs, à la fois au printemps et pendant toute la période d'avril à septembre. Les informations qui en découlent sont pertinentes pour comprendre la viabilité des populations RFG qui utilisent les étangs. La variable TAR de l'étang a été utile pour comprendre la connectivité entre l'étang et la nappe. Cette donnée est rarement quantifiée, mais permet de confirmer que les étangs se vident autrement que par évapotranspiration. Le TAR de la nappe n'a pas apporté beaucoup d'information pour l'analyse des étangs. Toutefois, la mesure des niveaux de nappe à proximité des étangs a permis d'évaluer à quelles périodes de l'année et sur quels étangs les niveaux de nappe pouvaient excéder ceux des étangs, indiquant ainsi un apport d'eau souterraine vers l'étang.

Dans l'ensemble, il est recommandé de mettre en œuvre le protocole développé et suivi dans ce projet pour les futurs suivis hydrologiques des étangs temporaires. Ce protocole devrait pouvoir être transféré sans modification, c.-à-d. à la fois pour la caractérisation, le suivi et l'analyse des données, dans d'autres régions où la géologie et la topographie pourraient être différentes. Une version préliminaire de ce protocole a déjà été testée avec succès par Roux et al. (2023) dans les étangs forestiers temporaires du Bouclier canadien en Outaouais.

Les analyses corrélatoires utilisées sont robustes et pertinentes pour ce type d'analyse. Elles ont permis d'avoir une évaluation de l'ensemble des variables et paramètres qui influencent et n'influencent pas HP, HPI et TAR. Les modèles statistiques ont permis de mettre en lumière les principales conditions qui influencent les variables. Toutefois, comme ces modèles sont très simples et considèrent peu de variables et de paramètres, ils ne permettent pas de pousser très loin les interprétations dans des contextes différents.

Finalement, les résultats permettent de faire certaines recommandations pour éventuellement améliorer les conditions propices aux RFG. Par exemple, les résultats ont montré que des étangs plus profonds ont des HP et des HPi plus grands. Un surcreusage de certains étangs pourrait peut-être permettre d'allonger les HP, ce qui serait bénéfique aux populations de RFG. Toutefois, des étangs trop profonds pourraient aussi ne plus s'assécher, ce qui serait alors au détriment des rainettes. La gestion des niveaux d'eau par l'entremise de seuils pourrait permettre d'éviter l'enneigement permanent des étangs. Étant donné que les résultats n'ont pas permis d'identifier ce seuil pour différentes conditions dans lesquelles se retrouvent les étangs (par exemple, selon la taille et la géologie de l'étang, ou selon la superficie de son bassin versant), il n'est pas possible de quantifier la hauteur d'eau maximale à ne pas dépasser pour maintenir la viabilité des populations de rainettes.

Cette étude ne permet pas de déterminer quel pourcentage de la superficie de la zone d'alimentation d'un étang temporaire doit être protégée, ni quelle dimension devrait avoir une zone tampon en conservation autour des étangs. Bien que ces questions soient très importantes pour protéger les habitats de la RFG, elles ne faisaient pas partie des questions posées par ce projet. Pour approfondir la question, un dispositif expérimental étendu sur un plus vaste territoire serait nécessaire pour recenser de manière détaillée l'utilisation du territoire et assurer un suivi systématique des écoulements de surface et souterrains sur une vaste zone autour des étangs. Ceci représenterait un défi important dans une zone péri-urbaine, surtout si une vingtaine de sites sont étudiés comme dans la présente étude. Ces questions demeurent entières en ce qui concerne les milieux humides en général, et pas uniquement les étangs temporaires. Néanmoins, par principe de précaution, il serait souhaitable de minimiser autant que possible les interventions humaines (drainage, imperméabilisation des surfaces, redirection des écoulements) dans la zone d'alimentation des étangs.

6 RÉFÉRENCES

- Carrier, M.-A., Lefebvre, R., Rivard, C., Parent, M., Ballard, J.-M., Benoit, N., Vigneault, H., Beaudry, C., Malet, X., Laurencelle, M., Gosselin, J.-S., Ladevèze, P., Thériault, R., Beaudin, I., Michaud, A., Pugin, A., Morin, R., Crow, H., Gloaguen, E., Bleser, J., Martin, A., Lavoie, D. (2013). *Portrait des ressources en eau souterraine en Montérégie Est, Québec, Canada*. Projet réalisé conjointement par l'INRS, la CGC, l'OBV Yamaska et l'IRDA dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines, rapport final INRS R-1433.
- Chandler, H. C., McLaughlin, D. L., Gorman, T. A., McGuire, K. J., Feaga, J. B. et Haas, C. A. (2017). Drying rates of ephemeral wetlands: Implications for breeding amphibians. *Wetlands* 37, 545–557, doi: 10.1007/s13157-017-0889-1.
- Dubé-Loubert, H., et al. (2014). *Cartographie des dépôts de surface des bassins versants contigus des rivières Richelieu, Yamaska et de la baie Missisquoi*. Ministère des Ressources Naturelles du Québec. RG 2014-01: 26.
- Environnement Canada. (2025). *Données météorologiques*. Données récupérées en octobre 2025 sur la page web www.climat.meteo.gc.ca/
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937-1958, doi:10.5194/gmd-9-1937-2016.
- Globensky, Y. (1987). *Géologie des Basses-terres du Saint-Laurent*. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, Rapport MM 85-02, 70 p., 1 carte au 250 000.
- Google (2023). *Imagerie satellite de la zone d'étude* (acquisition 2023). Google Earth / Google Maps.
- Larocque, M., Roux, M., Brunelle, L. (2023). *Protocole – Instrumentation, caractérisation et suivi des étangs temporaires*. Chaire de recherche Eau et conservation du territoire. Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec, 19 p.
- Larocque, M., Roux, M., Gagné, S., Cousineau, O. (2020). *Acquisition de connaissances sur la dynamique hydrique de la rainette faux-grillon de l'ouest – Rapport final*. Rapport déposé au MFFP. Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec. 86 p.

- Malzone, J.M., Sweet, E.G., Bell, A.C., Minzenberger, G.L. (2019). Geomorphic controls of perched groundwater interaction with natural ridge-top depressional wetlands. *Hydrological Processes*, 34, 1089–1100 doi: 10.1002/hyp.13657
- Ministère des Ressources naturelles et des Forêts (MRNF). (2025a). *Cartographie de l'occupation des terres du Québec, [Jeu de données], dans Données Québec, 2025, mis à jour le 23 juillet 2025.* [<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/cartographie-de-l-occupation-des-terres-du-quebec>], (consulté le 21 novembre 2025).
- Ministère des Ressources naturelles et des Forêts (MRNF). (2025b). *Géologie du Quaternaire – données cartographiques (SIGÉOM)*. Données téléchargées depuis le Système d'information géominière du Québec (SIGÉOM). Québec, Canada, 2025, (consulté le 20 novembre 2025).
- Ondo, J. C., Ouarda, T. B., Bobée, B. (1997). *Revue bibliographique des tests d'homogénéité et d'indépendance*. Rapport préparé pour Environnement Canada. Institut national de la Recherche scientifique, INRS-Eau, Sainte-Foy, Québec. 78 p.
- 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 modelling. *Journal of Hydrology*, 303, 290-306.
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., et al. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168.
- Roux, M., Larocque, M., Nolet, P., & Bizhanimanazar, M. (2023). Geomorphological and meteorological drivers of ephemeral pond hydrology in the Canadian shield forest. *Hydrological Processes*, 37(10), e15009.
- Werner, E. E., Relyea R. A., Yurewicz K. L., Skelly, D. K. and Davis, C. J. (2009). Comparative landscape dynamics of two anuran species: climate-driven interaction of local and regional processes. *Ecological Monographs*, 79, 503-521.
- Whiting, A. (2004). *Population ecology of the Western Chorus Frog, Pseudacris triseriata*. Mémoire de maîtrise, Université de McGill, Montréal, Québec. 108 p.

7 **ANNEXE A – Synthèse des résultats**

Tableau 4 : Localisation et dates d'instrumentation des sites

Site	X	Y	Z	Ville	Date instrumentation
AT16-37	626100	5051600	31,7	Boucherville	2021-04-27
AT18-10	625500	5053600	19	Varenes	2021-05-14
BA1*	617900	5045000	19,5	Longueuil	2021-05-15
BCV2*	625300	5051600	31,3	Boucherville	2021-04-01
BL024	622100	5041800	29,6	Longueuil	2021-04-22
BTRF*	622100	5044000	29,9	Longueuil	2021-04-14
FUT3*	624300	5048800	32,1	Boucherville	2021-04-22
IP004*	626000	5051500	32,1	Boucherville	2021-04-08
IP140	625400	5049300	31,3	Boucherville	2021-04-07
IP142	625500	5049200	30,2	Boucherville	2021-04-27
IP18-02	625600	5048900	30	Boucherville	2021-04-07
IP180	625500	5049200	32,6	Boucherville	2021-04-14
JM060	625000	5051400	31,2	Boucherville	2021-04-14
JM109	625000	5051200	31,6	Boucherville	2021-05-28
LP16-08	625800	5031800	13,8	Brossard	2021-05-28
P5*	619500	5028100	21,9	La Prairie	2021-12-09
SH16	625100	5053600	18,5	Varenes	2021-05-14
TM146	623800	5045400	28,5	Longueuil	2021-05-15
TM15-01	622200	5042100	28,7	Longueuil	2021-04-22
TMAS05	619500	5027600	22,9	La Prairie	2021-12-09

*Sites dans lesquels le niveau d'eau dans l'étang était suivi par le MFFP avant le début du projet.

Tableau 5 : Paramètres physiques décrivant les sites

Site	Pente médiane BV (°)	Aire BV (m ²)	Superficie max. S _{max} * (m ²)	Volume max V _{max} * (m ³)	Hauteur d'eau max H _{max} * (m)	Ouverture canopée 2021 (%)	Ouverture canopée 2023 (%)
AT16-37	2,2	8936	5000	1805	0,69	86,6	13,3
AT18-10	1,8	6642	2610	608	0,49	71,4	35,4
BA1	2,8	6327	1392	205	0,42	80,3	67,1
BCV2	1,2	30249	5639	1876	0,70	88,7	92,6
BL024	4,2	3365	1194	228	0,55	56,6	22,3
BTRF	2,1	9184	2719	537	0,54	63,7	18,3
FUT3	1,9	18229	4023	783	0,40	72,7	44,1
IP004	1,1	131172	9251	2988	0,65	56,5	28,2
IP140	2,9	9238	2717	614	0,43	92,6	88,7
IP142	1,6	10 794	4115	807	0,42	80,8	28,8
IP18-02	1,5	10 043	2062	345	0,40	69,2	22,0
IP180	1,2	32692	10857	1660	0,37	74	36,9
JM060	2,1	3793	1759	421	0,50	74,9	23,5
JM109	2,1	3411	2047	297	0,47	56,1	5,8
LP16-08	3,6	10444	6033	1660	0,49	62,2	8,0
P5	1,8	2432	1061	178	0,40	73	-
SH16	3,3	1991	561	152	0,70	45,2	11,7
TM146	1,2	21672	1424	240	0,32	85,4	24,9
TM15-01	2,4	45 412	494	138	0,57	63,2	29,5
TMAS05	2,4	8569	2925	492	0,38	75,3	-
Min	1,1	1991	494	138	0,32	45,2	5,9
Max	4,2	131172	10857	2988	0,70	92,6	92,6
Médiane	2,1	8936	2664	515	0,47	72,9	26,6
Moyenne	2,17	18138	3394	802	0,49	71,4	33,4

* : Pour la période 2021-2025

Tableau 6 : Hydropériodes (HP) et indices d'hydropériodes (HPI)

Site	HP 2021 (j)	HP 2022 (j)	HP 2023 (j)	HP 2024 (j)	HP 2025 (j)	HPI 2021	HPI 2022	HPI 2023	HPI 2024	HPI 2025
AT16-37	46	60	-	53	53	0,28	0,71	-	0,66	0,42
AT18-10	52	60	50	83	72	0,32	0,62	0,58	0,99	0,61
BA1	63	101	-	p.a.	107	0,34	0,87	-	1,00	0,66
BCV2	55	99	-	85	65	0,33	-	-	1,00	0,52
BL024	49	58	-	67	60	0,31	0,56	-	0,52	0,41
BTRF	63	p.a.	60	p.a.	117	0,38	1,00	0,98	1,00	0,71
FUT3	48	47	-	66	62	0,30	0,58	-	0,76	0,45
IP004	65	121	-	p.a.	84	0,40	0,83	-	1,00	0,68
IP140	56	p.a.	53	-	-	0,36	-	0,95	-	-
IP142	53	101	-	p.a.	112	0,34	1,00	-	1,00	0,68
IP18-02	48	60	47	68	64	0,30	0,78	0,86	0,95	0,57
IP180	51	61	-	68	67	0,33	0,74	-	0,96	0,60
JM060	51	92	-	84	66	0,32	0,76	-	0,99	0,57
JM109	64	99	-	p.a.	125	0,40	0,78	-	1,00	0,75
LP16-08	63	134	-	p.a.	110	0,39	0,95	-	1,00	0,67
P5	-	p.a.	p.a.	p.a.	112	-	1,00	1,00	1,00	0,68
SH16	72	136	p.a.	p.a.	121	0,43	0,91	1,00	1,00	0,73
TM146	44	47	39	68	64	0,27	0,81	0,77	0,99	0,64
TM15-01	65	116	72	102	108	0,39	0,84	0,81	0,91	0,66
TMAS05	-	p.a.	61	p.a.	113	-	1,00	0,93	1,00	0,69
Min	44	47	39	53	53	0,27	0,56	0,58	0,52	0,41
Max	72	136	72	102	125	0,43	1,00	1,00	1,00	0,75
Médiane	54	96	53	68	84	0,34	0,82	0,93	1,00	0,62
Moyenne	56	87	55	74	89	0,34	0,82	0,88	0,93	0,66

« - » : Donnée non disponible

p.a. : Pas d'assèchement entre le début de l'hydropériode et la fin de l'année hydrologique le 30 septembre

Tableau 7 : Taux d'abaissement relatif (TAR) médians de surface et souterrains (mm/mm)

Site	TAR-surf 2021	TAR-surf 2022	TAR-surf 2023	TAR-surf 2024	TAR-surf 2025	TAR-sout 2021	TAR- sout 2022	TAR- sout 2023	TAR- sout 2024	TAR- sout 2025
AT16-37	5,24	6,76	-	6,51	5,85	7,40	7,11	-	8,31	7,35
AT18-10	4,85	4,80	-	4,83	3,64	-	-	-	-	-
BA1	5,09	5,01	4,97	4,85	3,80	-	-	-	-	-
BCV2	6,77	4,64	-	4,62	3,46	5,75	10,41	-	-	12,51
BL024	6,01	6,71	-	6,69	4,69	7,03	14,68	-	8,92	10,51
BTRF	5,29	4,48	6,74	4,88	5,55	-	-	-	-	-
FUT3	4,59	7,20	6,83	7,18	4,26	-	7,18	7,27	9,93	7,12
IP004	5,72	5,78	-	5,58	4,78	7,39	9,91	-	-	6,96
IP140	5,00	4,31	4,71	-	-	5,05	-	-	-	-
IP142	4,14	4,07	-	5,40	3,79	-	-	-	-	-
IP18-02	3,98	6,19	5,22	6,01	3,84	4,94	12,85	8,13	-	8,03
IP180	3,81	4,49	-	5,80	5,43	9,64	9,45	-	-	-
JM060	5,21	6,03	-	5,35	5,01	6,49	7,90	-	-	5,89
JM109	-	5,01	-	5,05	3,48	-	-	-	-	-
LP16-08	-	4,19	5,53	4,61	3,99	6,29	-	-	-	7,62
P5	-	3,02	3,09	4,38	3,66	-	-	-	-	-
SH16	4,27	4,18	-	4,65	3,63	-	-	-	-	-
TM146	-	4,95	4,98	6,37	4,36	9,38	12,60	-	-	-
TM15-01	4,81	4,11	-	5,05	3,68	-	-	-	-	-
TMAS05	-	3,40	4,11	5,51	2,90	-	-	-	-	-
Min	3,81	3,02	3,09	4,38	2,90	4,94	7,11	7,27	8,31	5,89
Max	6,77	7,20	6,83	7,18	5,85	9,64	14,68	8,13	9,93	12,51
Médiane	5,00	4,72	4,98	5,35	3,84	6,76	9,91	7,70	8,92	7,49
Moyenne	4,99	4,97	5,13	5,44	4,20	6,94	10,23	7,70	9,05	8,25

« - » : Donnée non disponible

8 ANNEXE B – Niveaux d'eau dans les étangs et dans la nappe

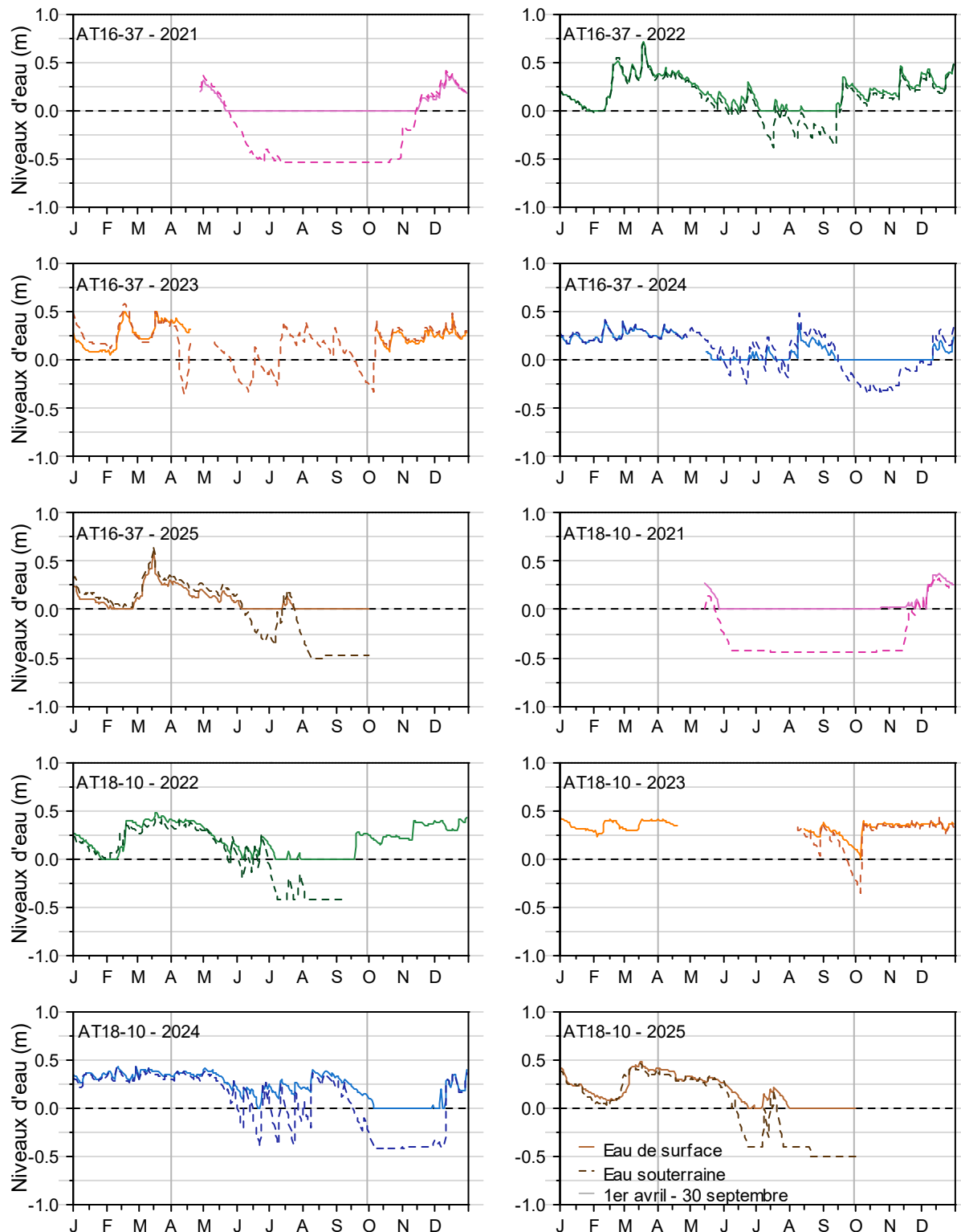


Figure 17 : Niveaux d'eau dans les étangs et dans la nappe entre avril 2021 et septembre 2025 pour les sites AT16-37 et AT18-10

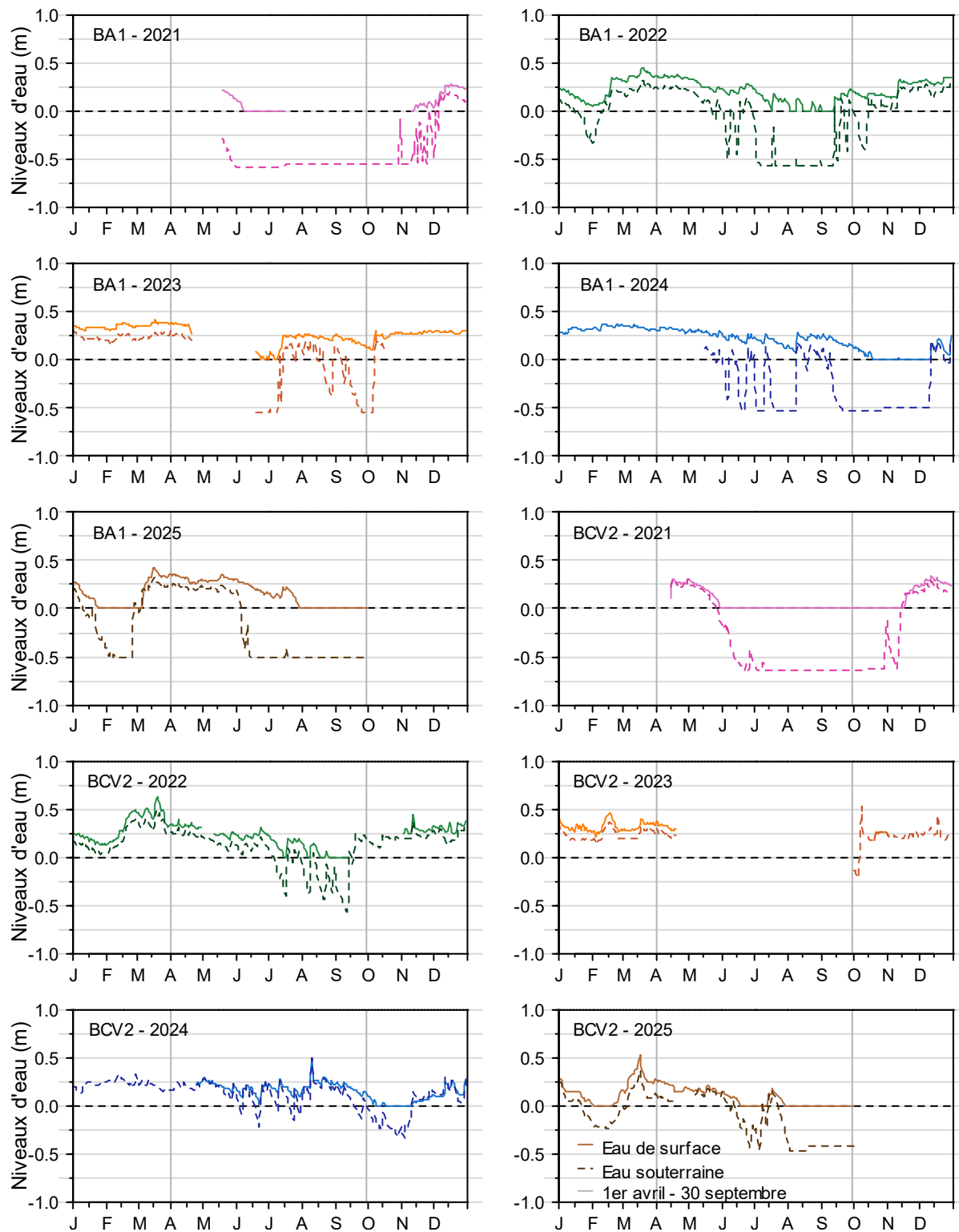


Figure 18 : Niveaux d'eau dans les étangs et dans la nappe entre avril 2021 et septembre 2025 pour les sites BA1 et BCV2

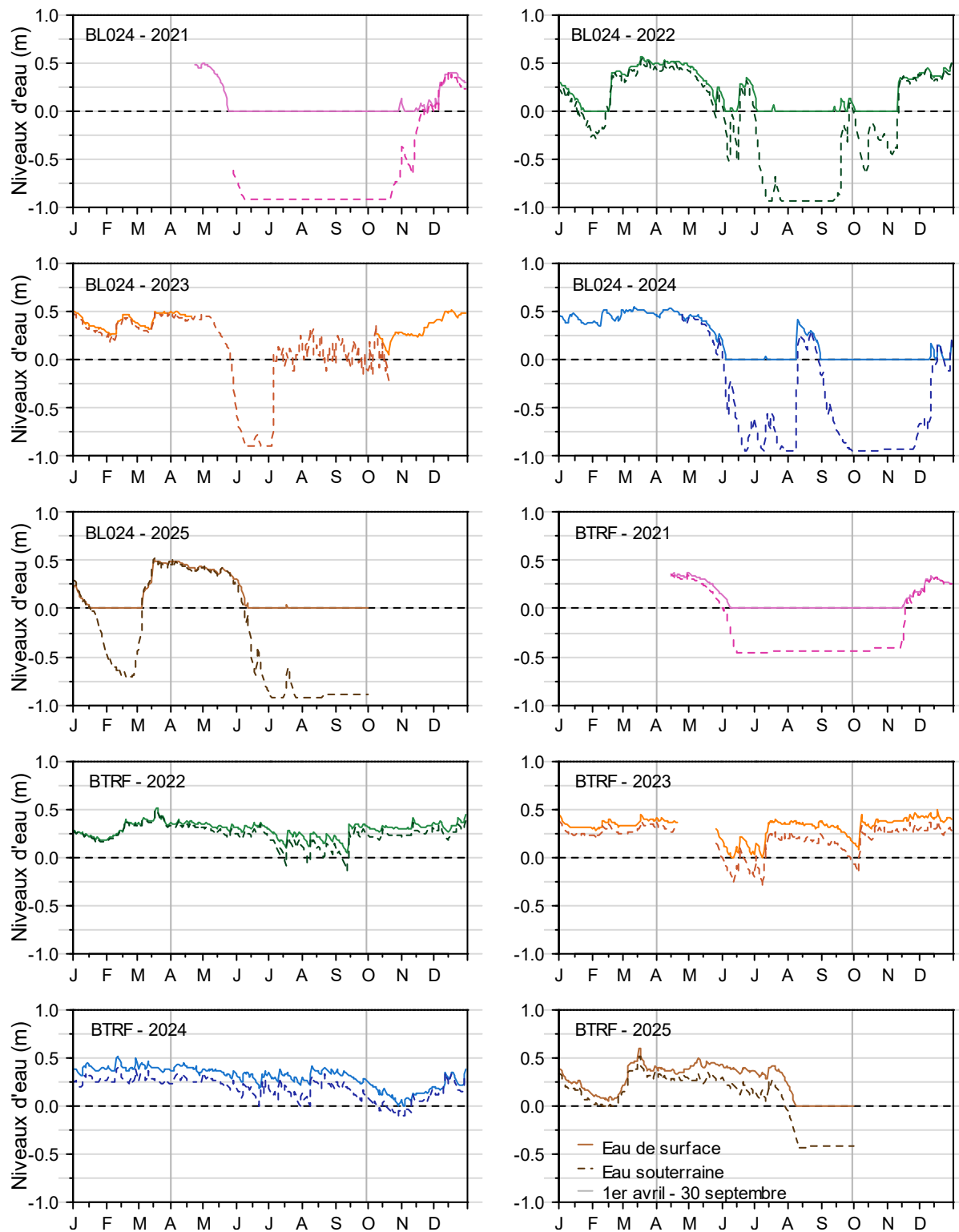


Figure 19 : Niveaux d'eau dans les étangs et dans la nappe entre avril 2021 et septembre 2025 pour les sites BL024 et BTRF

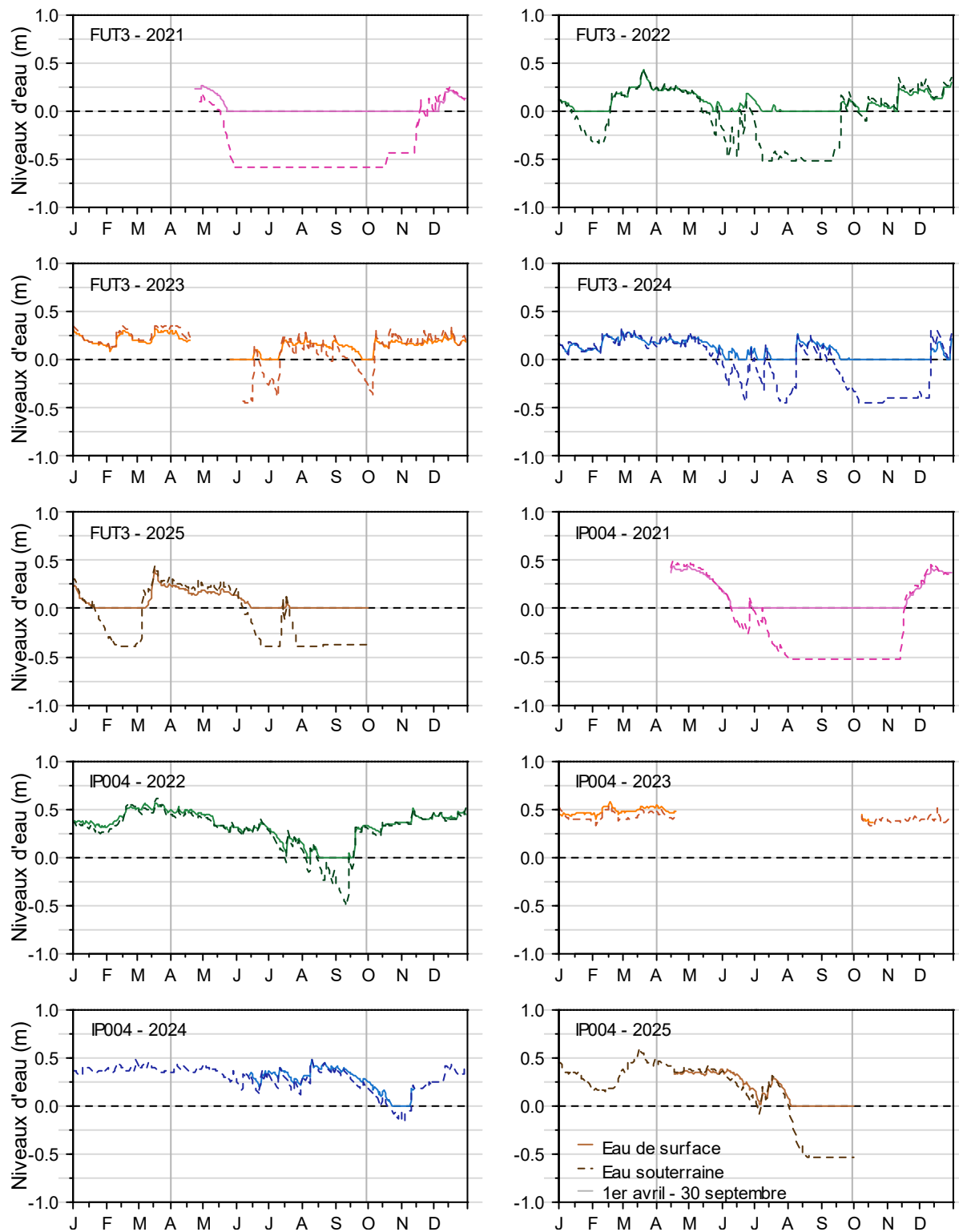


Figure 20 : Niveaux d'eau dans les étangs et dans la nappe entre avril 2021 et septembre 2025 pour les sites FUT3 et IP004

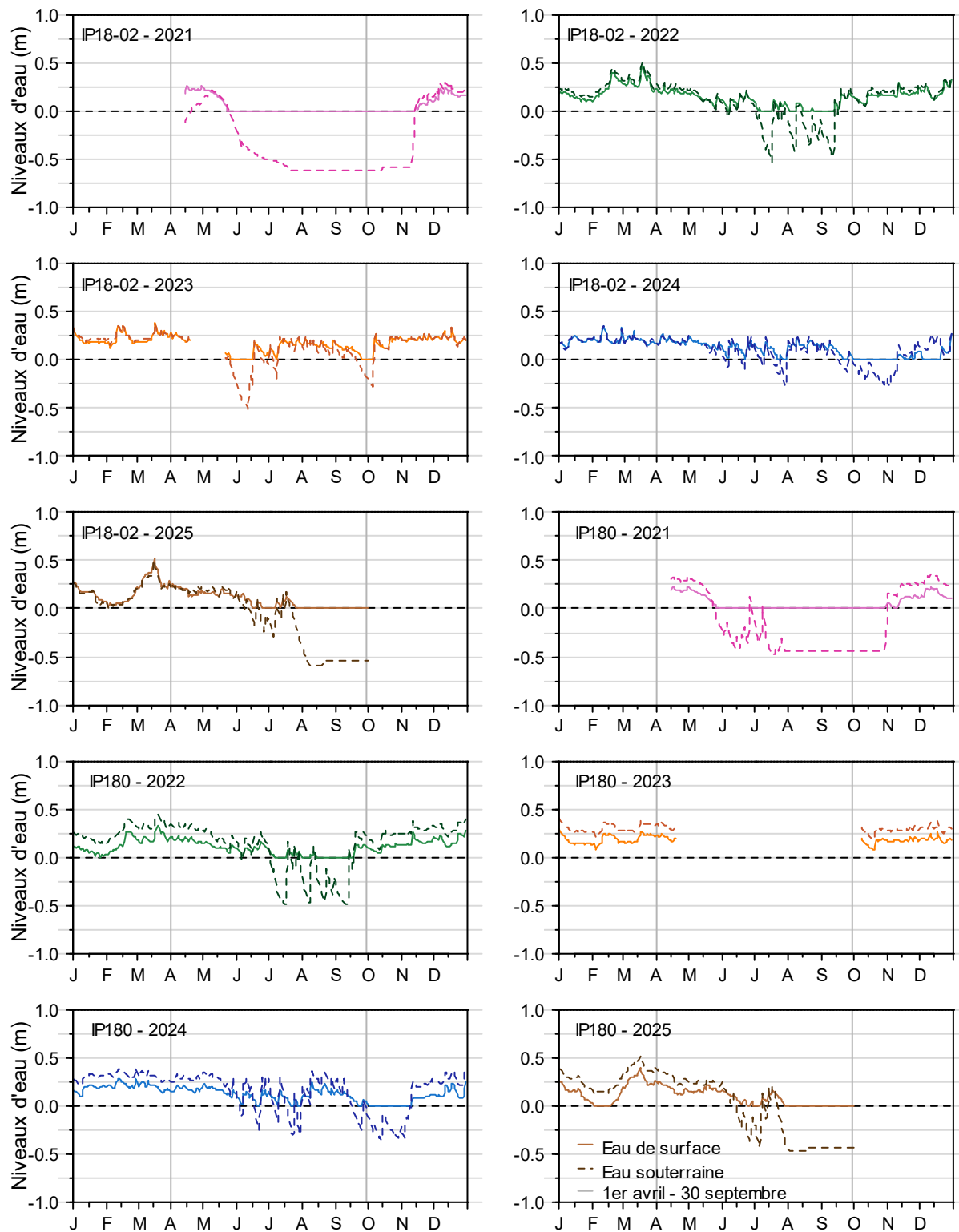


Figure 21 : Niveaux d'eau dans les étangs et dans la nappe entre avril 2021 et septembre 2025 pour les sites IP18-02 et IP180

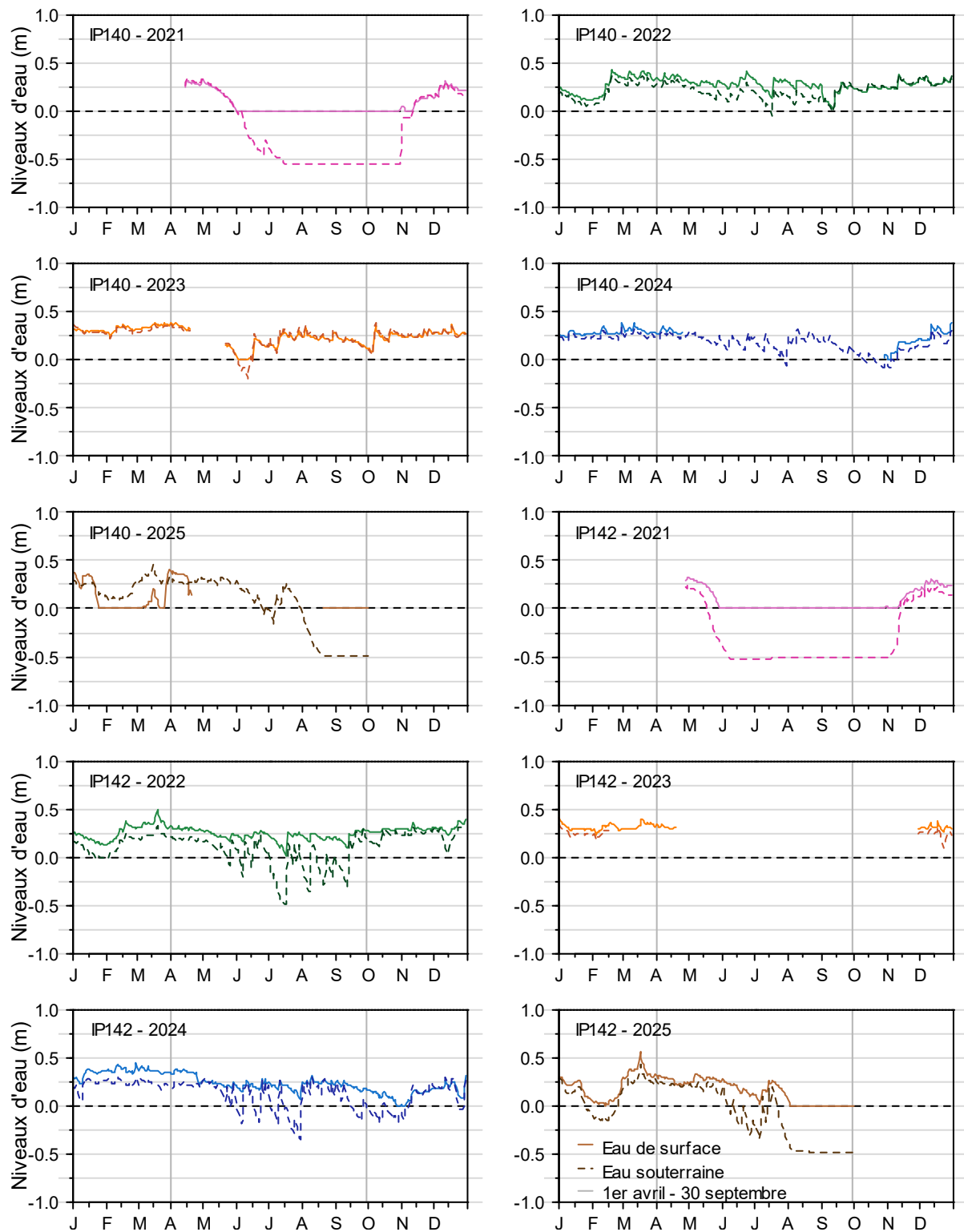


Figure 22 : Niveaux d'eau dans les étangs et dans la nappe entre avril 2021 et septembre 2025 pour les sites IP140 et IP142

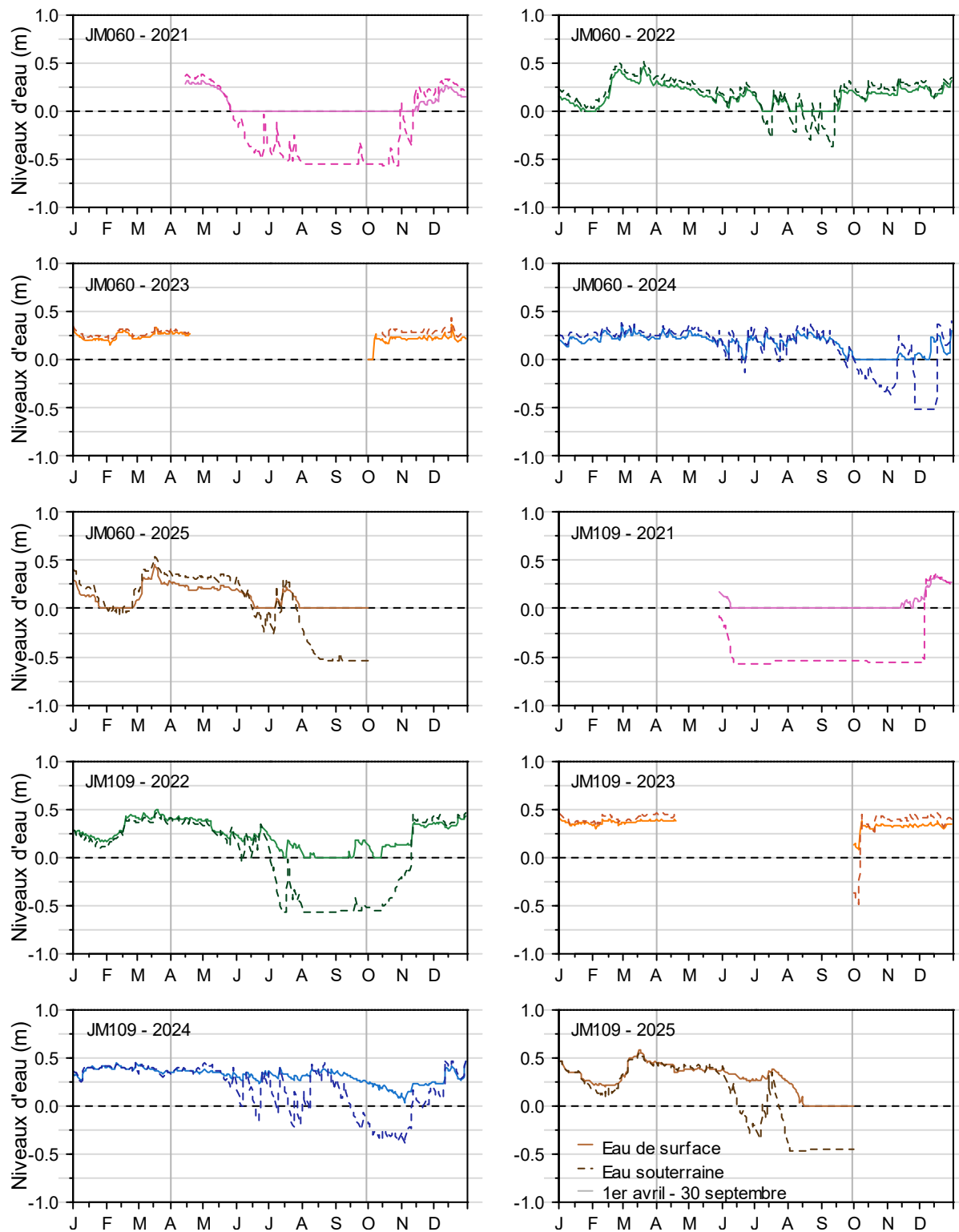


Figure 23 : Niveaux d'eau dans les étangs et dans la nappe entre avril 2021 et septembre 2025 pour les sites JM060 et JM109

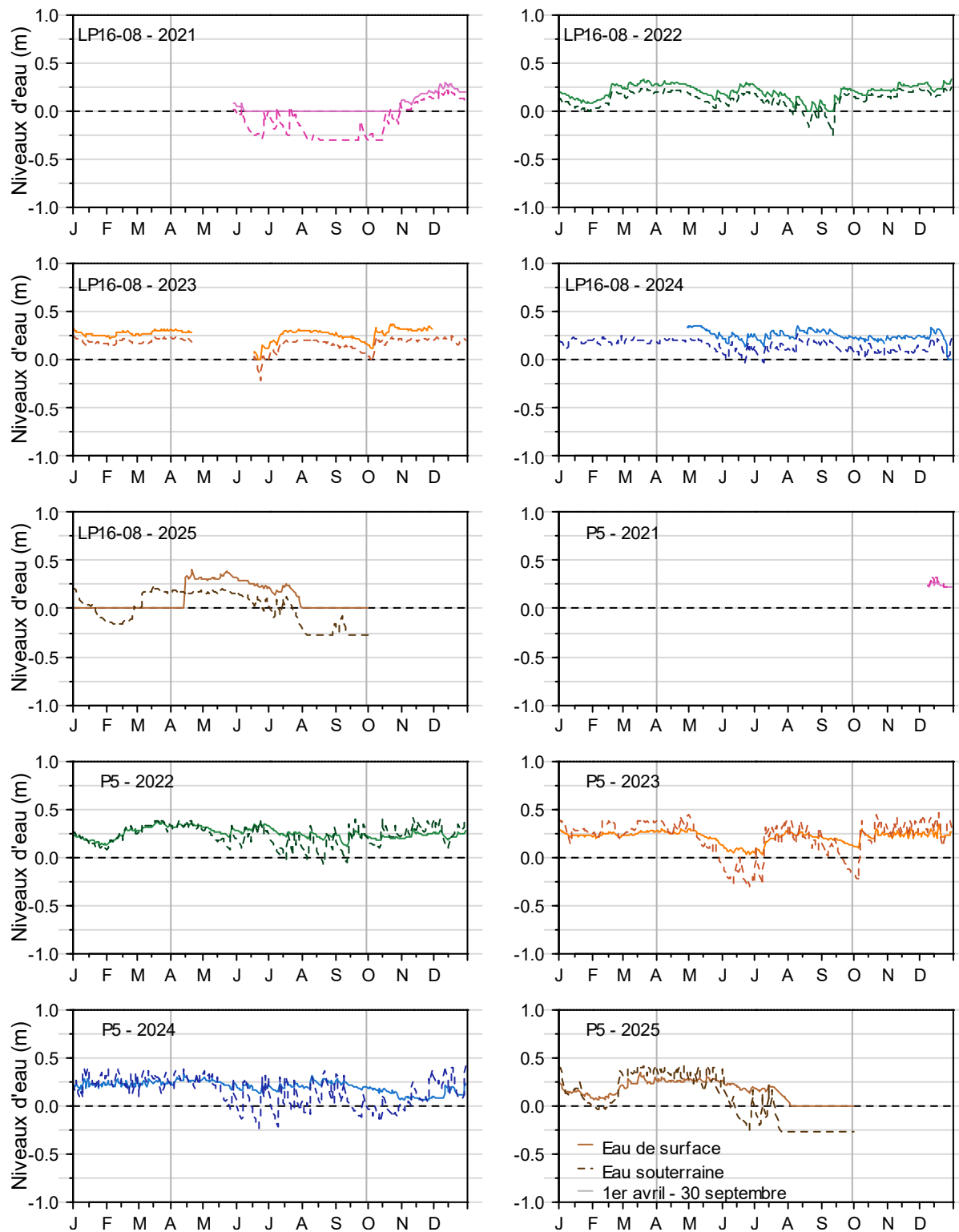


Figure 24 : Niveaux d'eau dans les étangs et dans la nappe entre avril 2021 et septembre 2025 pour les sites LP16-08 et P5

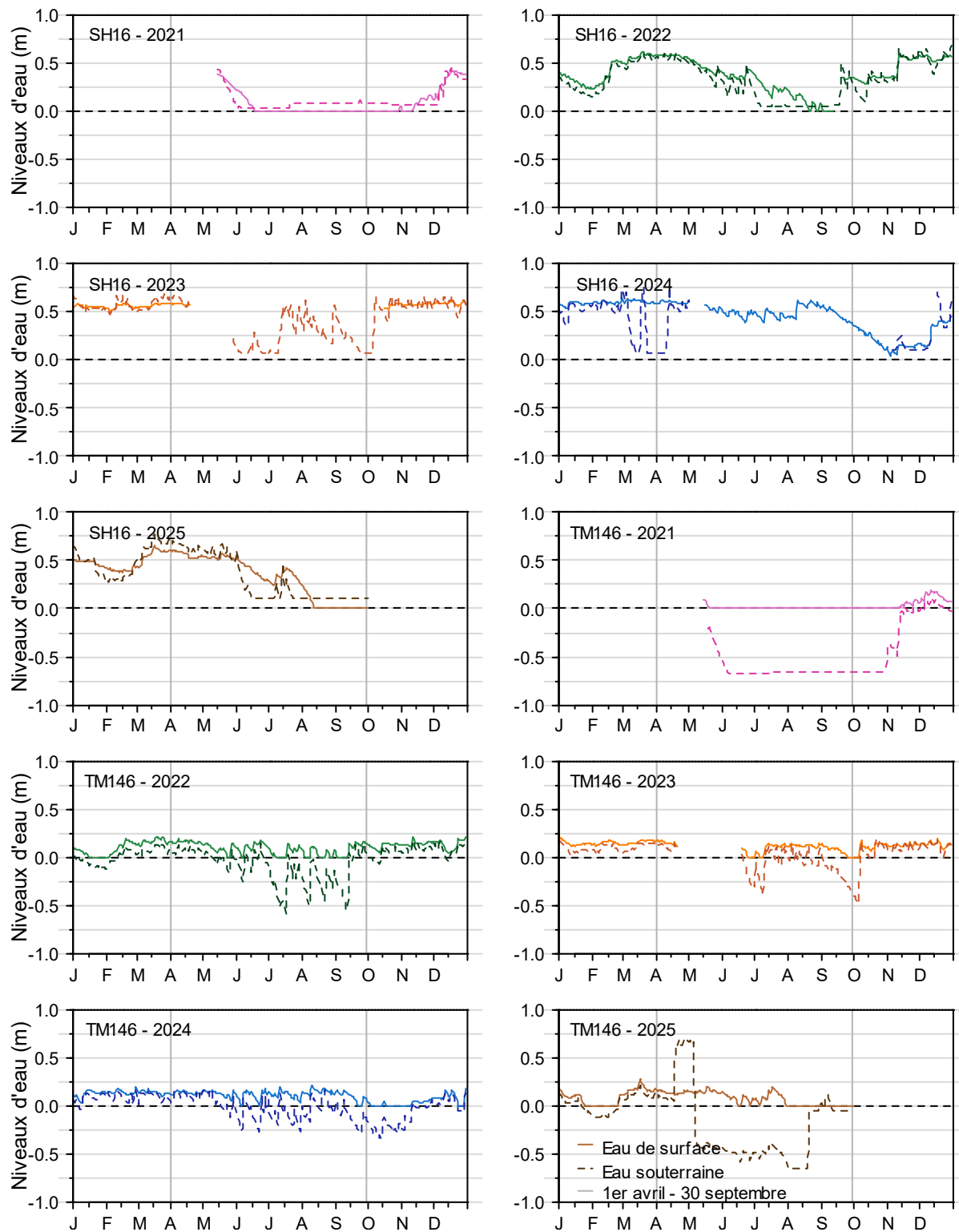


Figure 25 : Niveaux d'eau dans les étangs et dans la nappe entre avril 2021 et septembre 2025 pour les sites SH16 et TM146

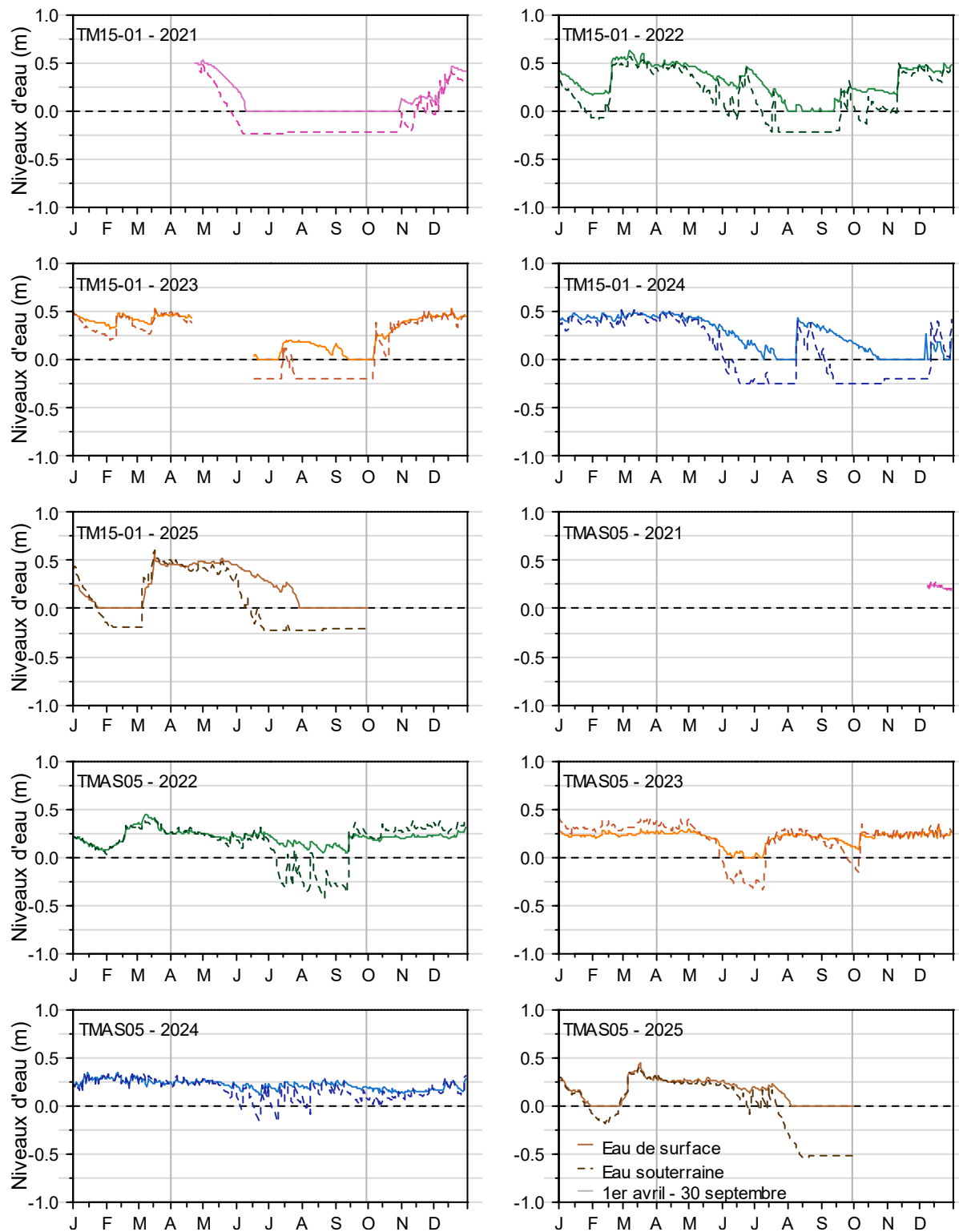


Figure 26 : Niveaux d'eau dans les étangs et dans la nappe entre avril 2021 et septembre 2025 pour les sites TM15-01 et TMA505

9 ANNEXE C – Logs des piézomètres

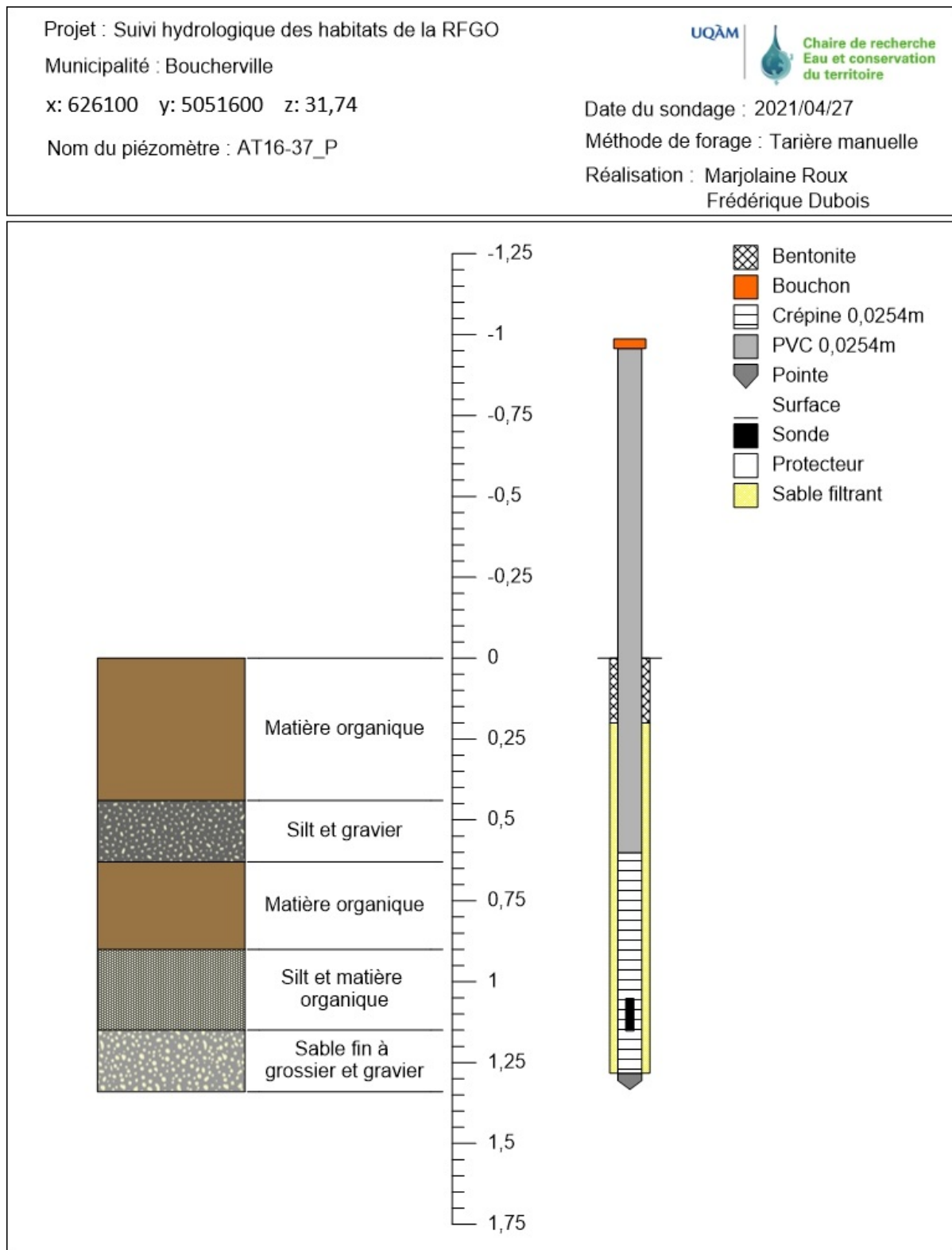


Figure 27 : Log du piézomètre AT16-37

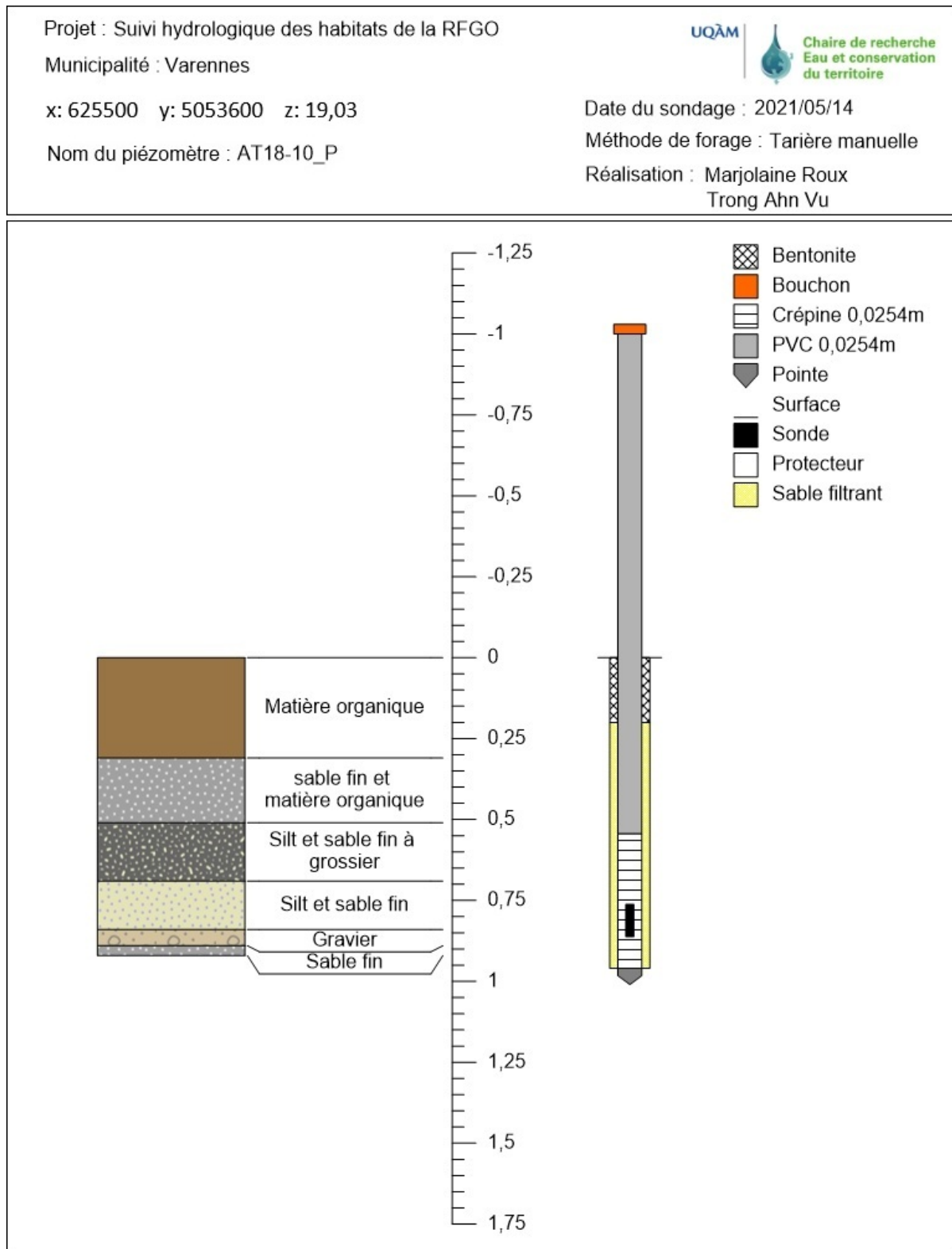


Figure 28 : Log du piézomètre AT18-10

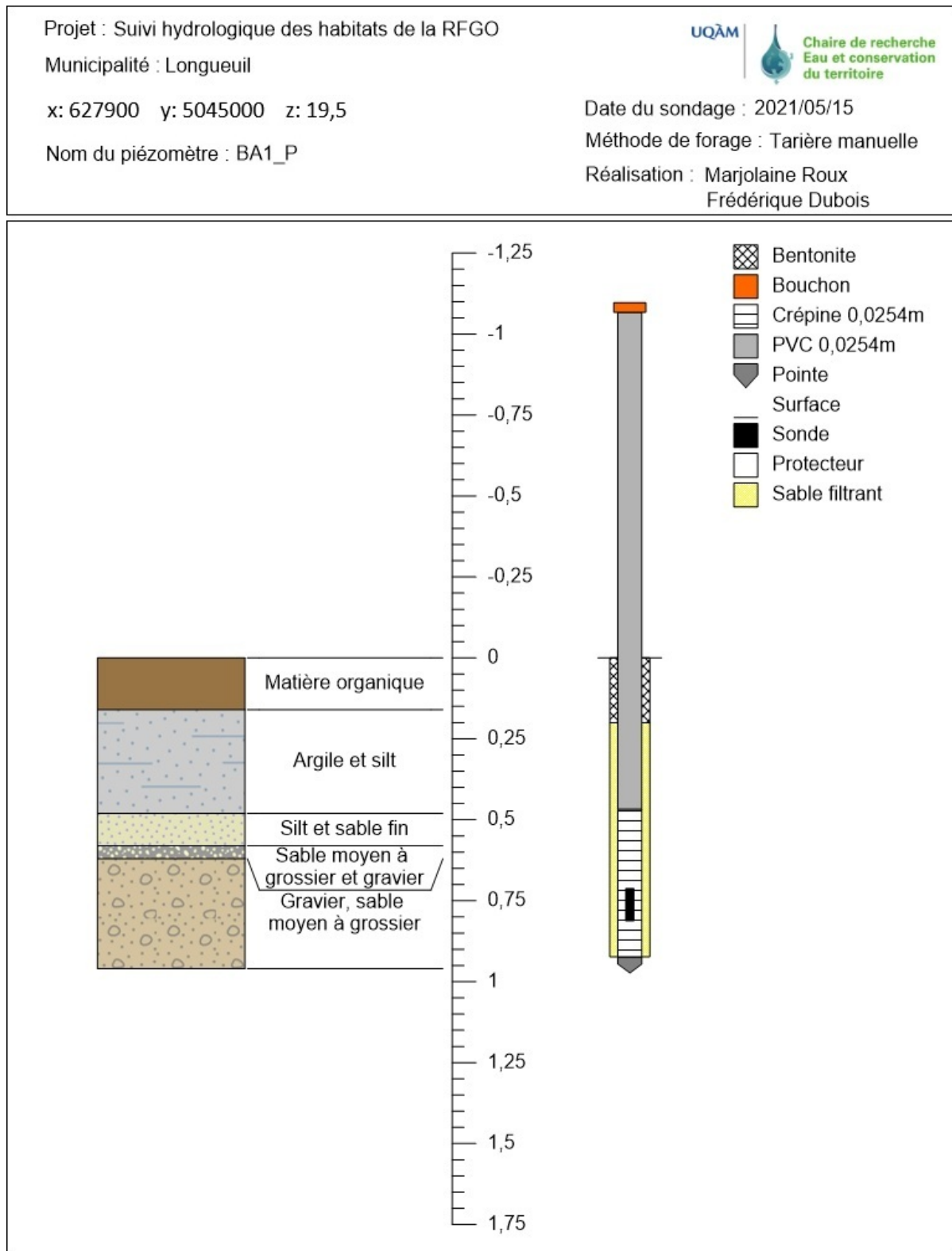


Figure 29 : Log du piézomètre BA1

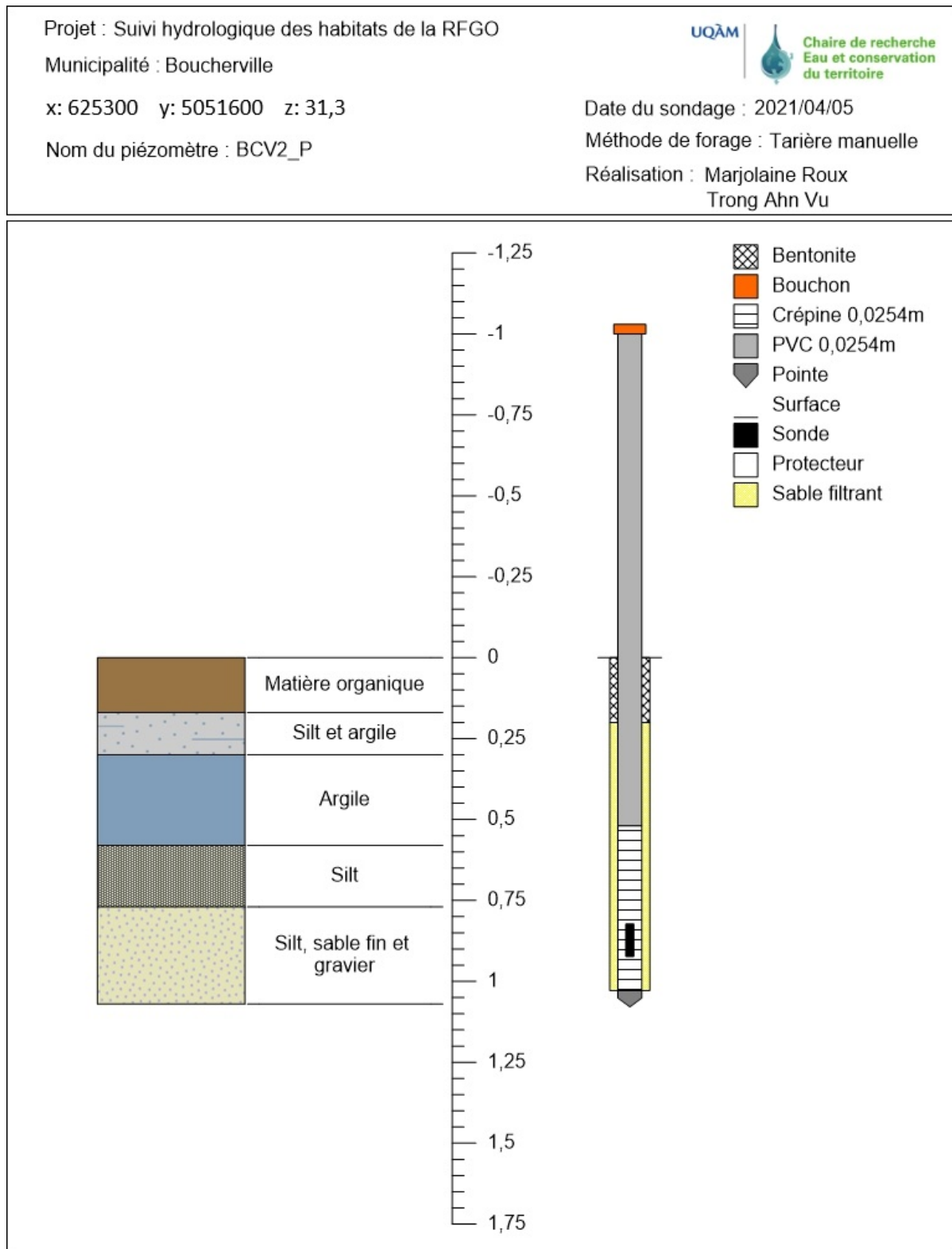


Figure 30 : Log du piézomètre BCV2

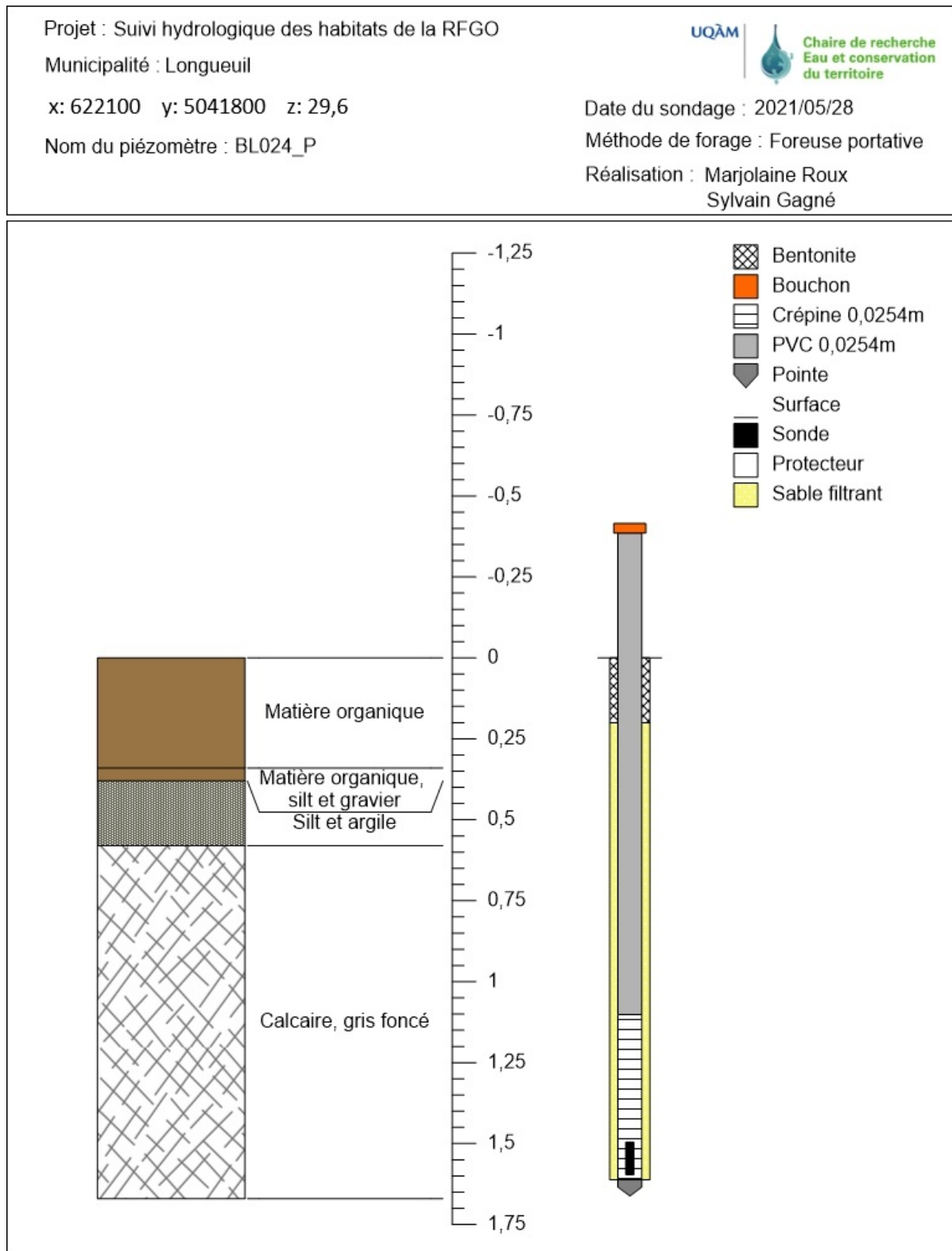


Figure 31 : Log du piézomètre BL024

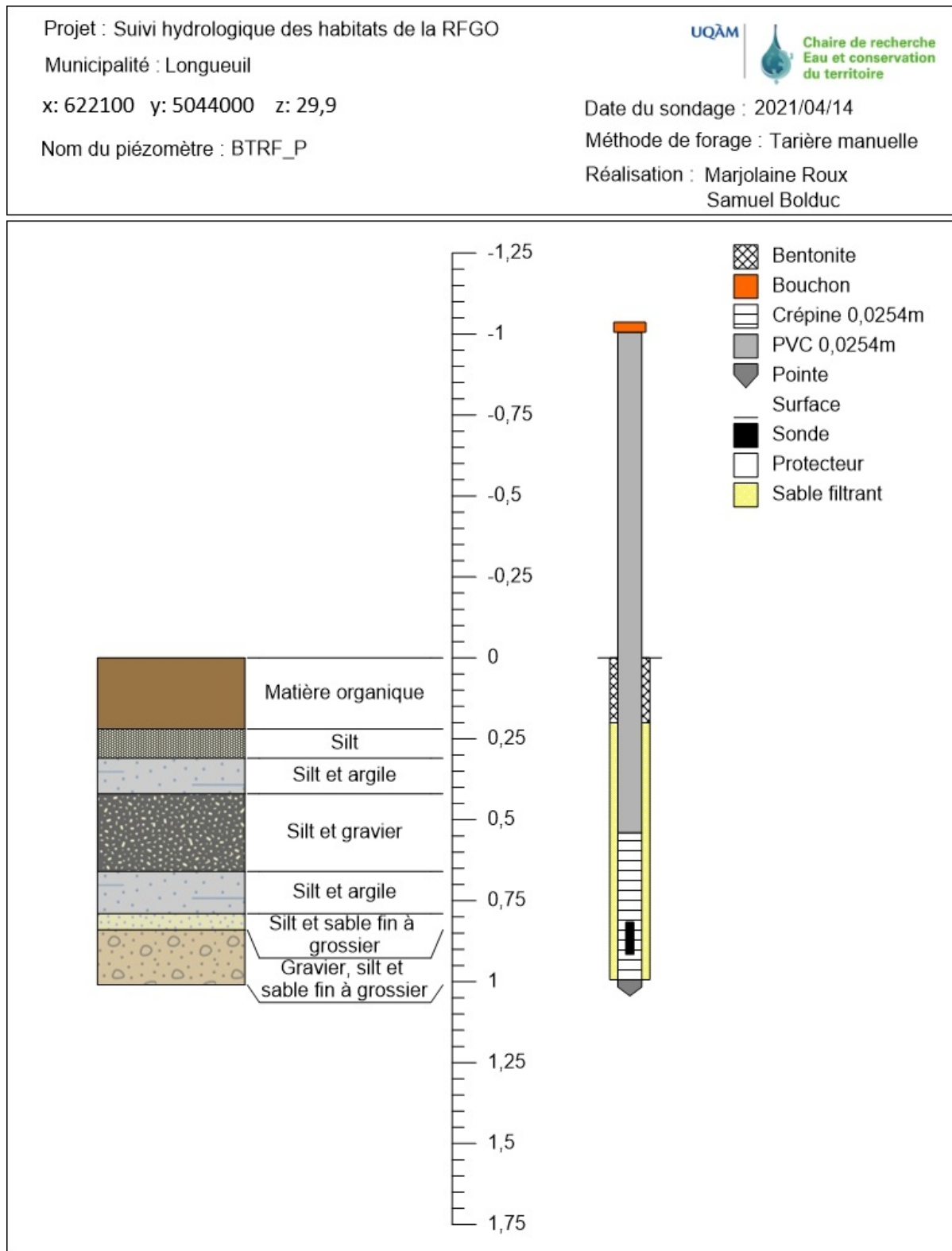


Figure 32 : Log du piézomètre BTRF

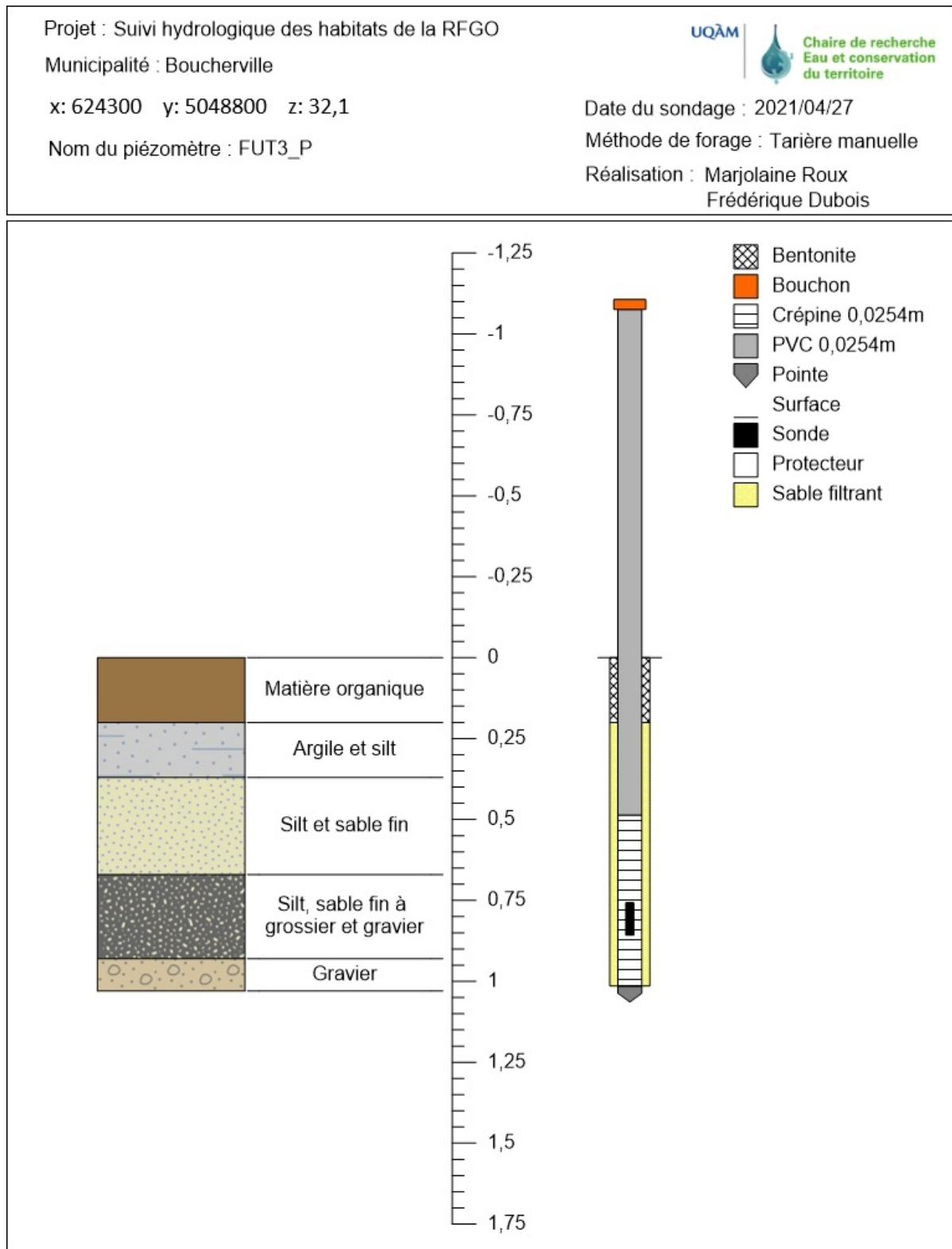


Figure 33 : Log du piézomètre FUT3

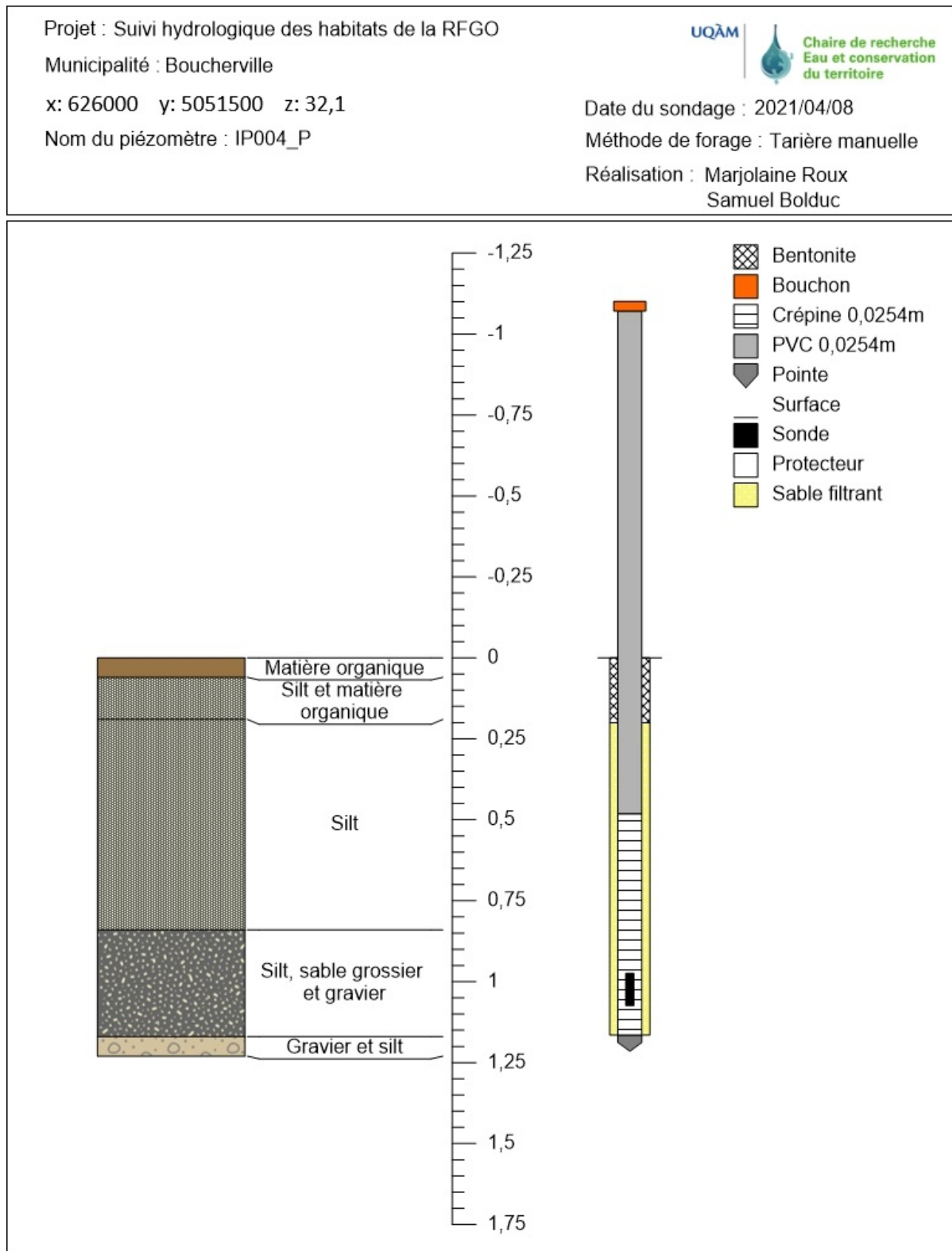


Figure 34 : Log du piézomètre IP004

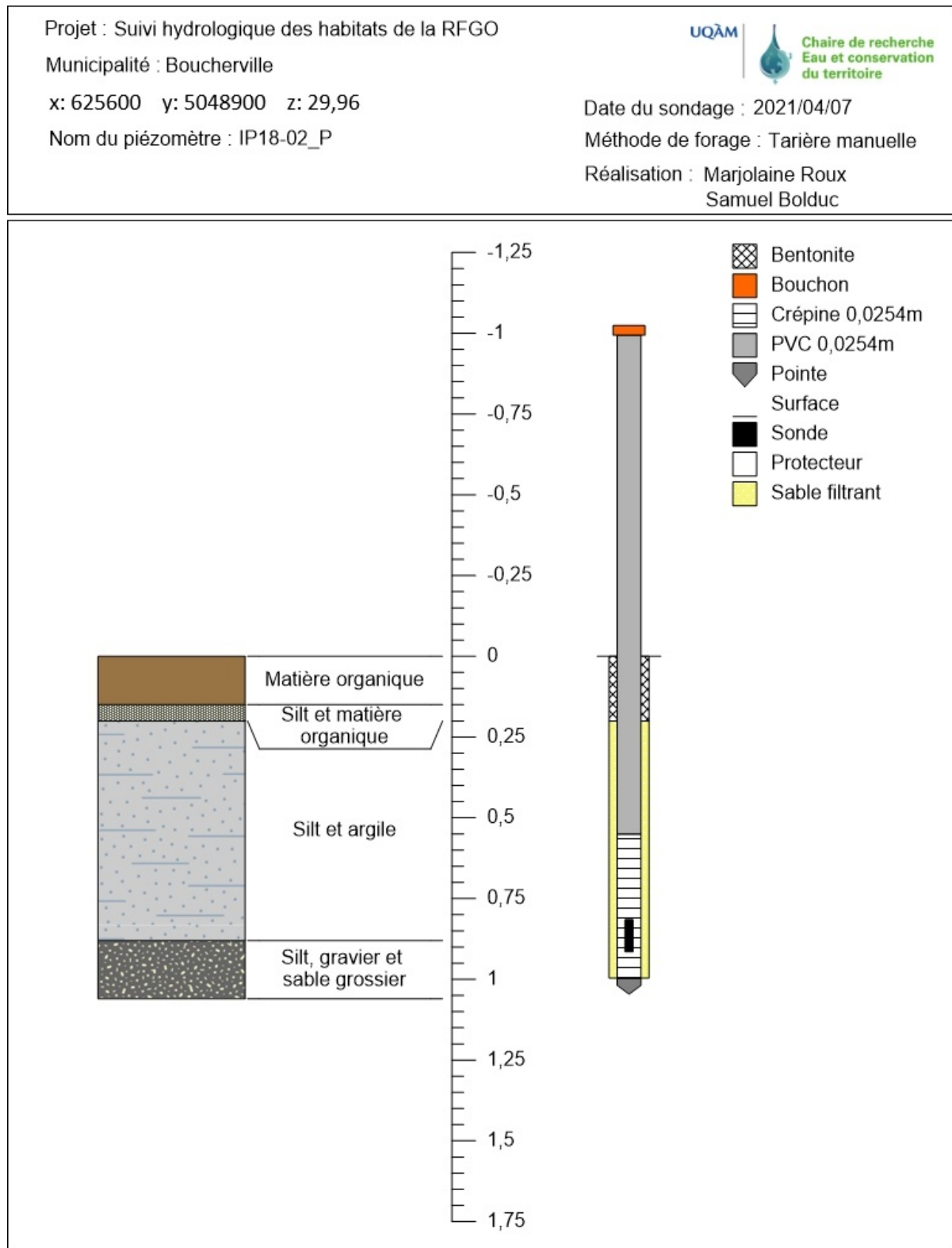


Figure 35 : Log du piézomètre IP18-02

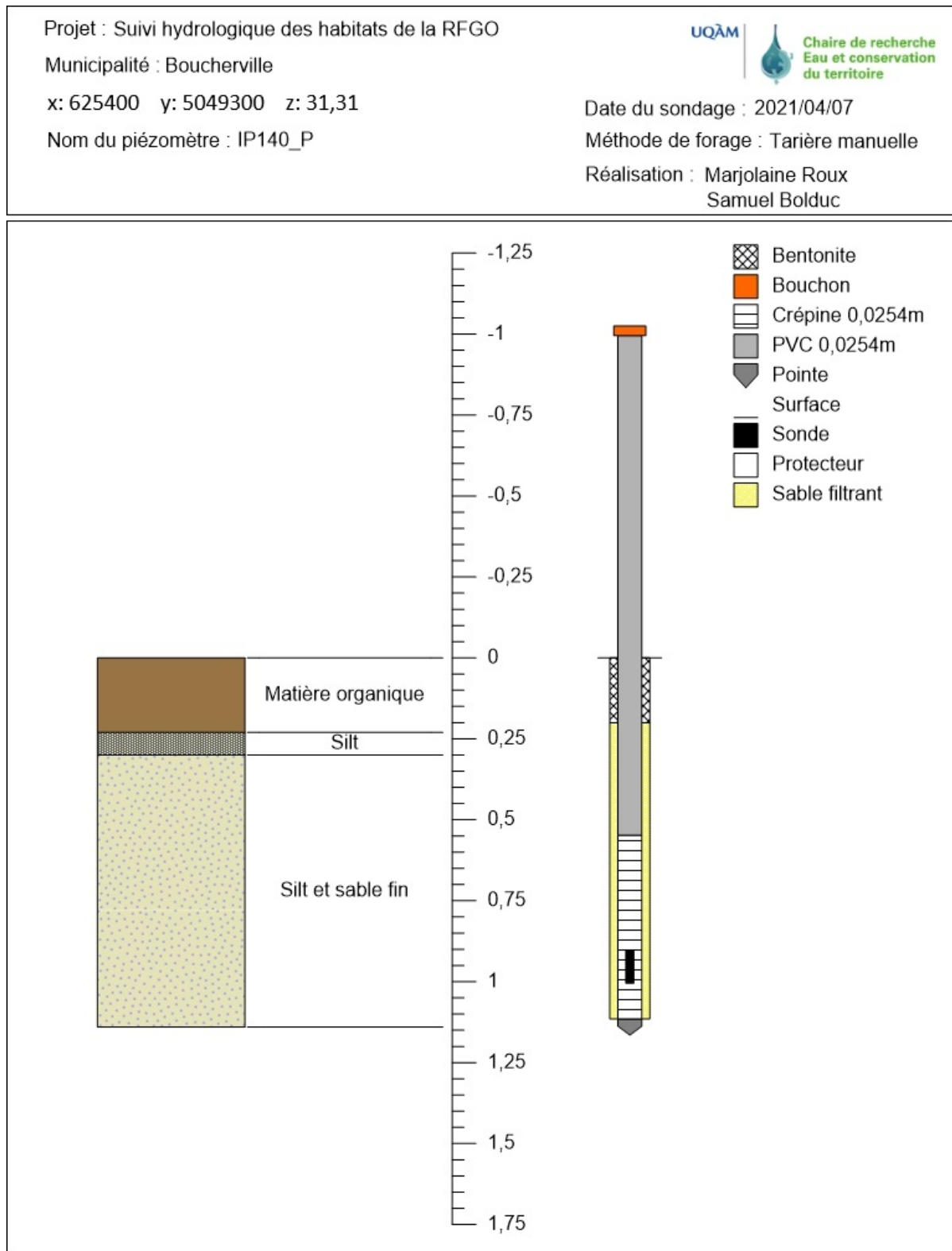


Figure 36 : Log du piézomètre IP140

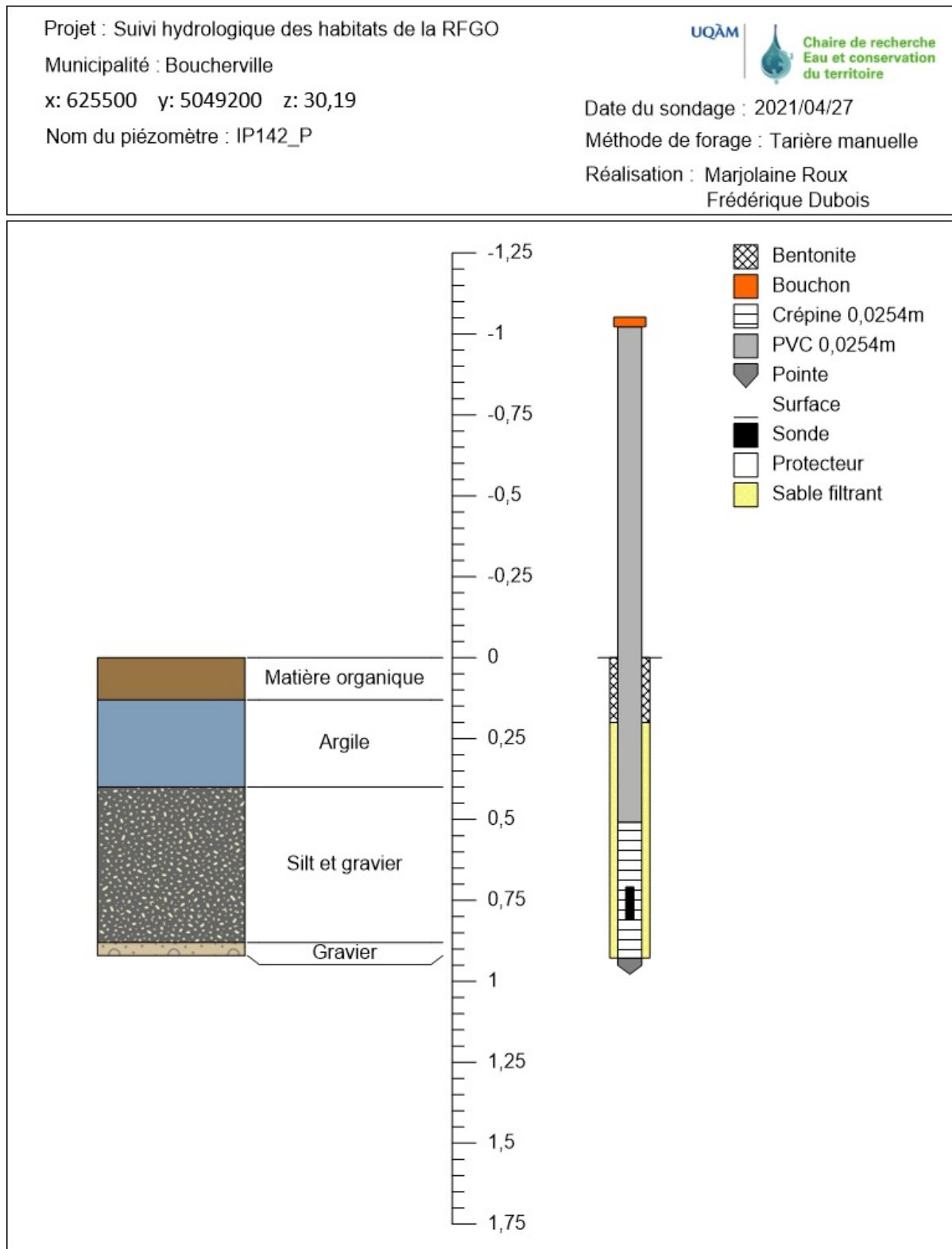


Figure 37 : Log du piézomètre IP142

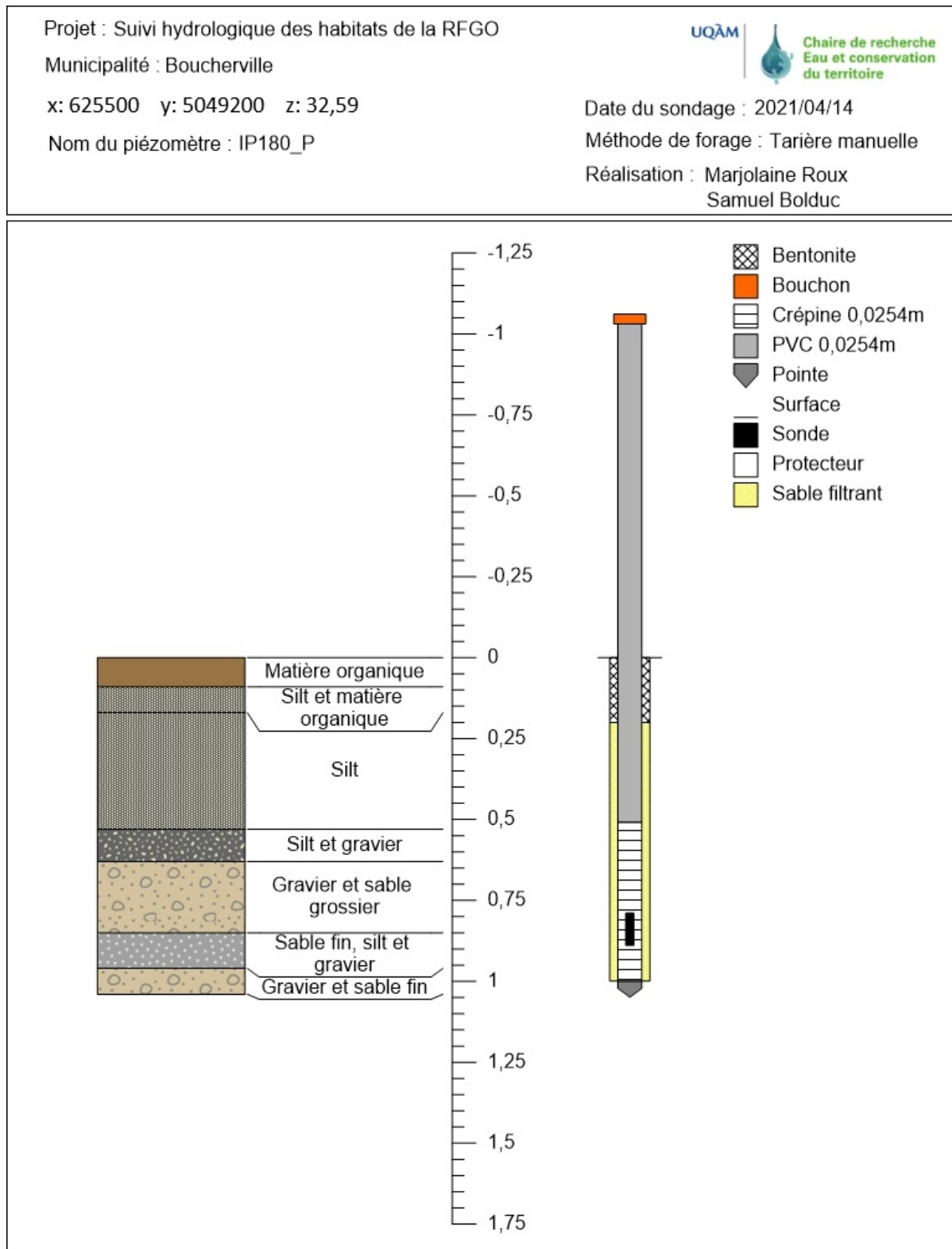


Figure 38 : Log du piézomètre IP180

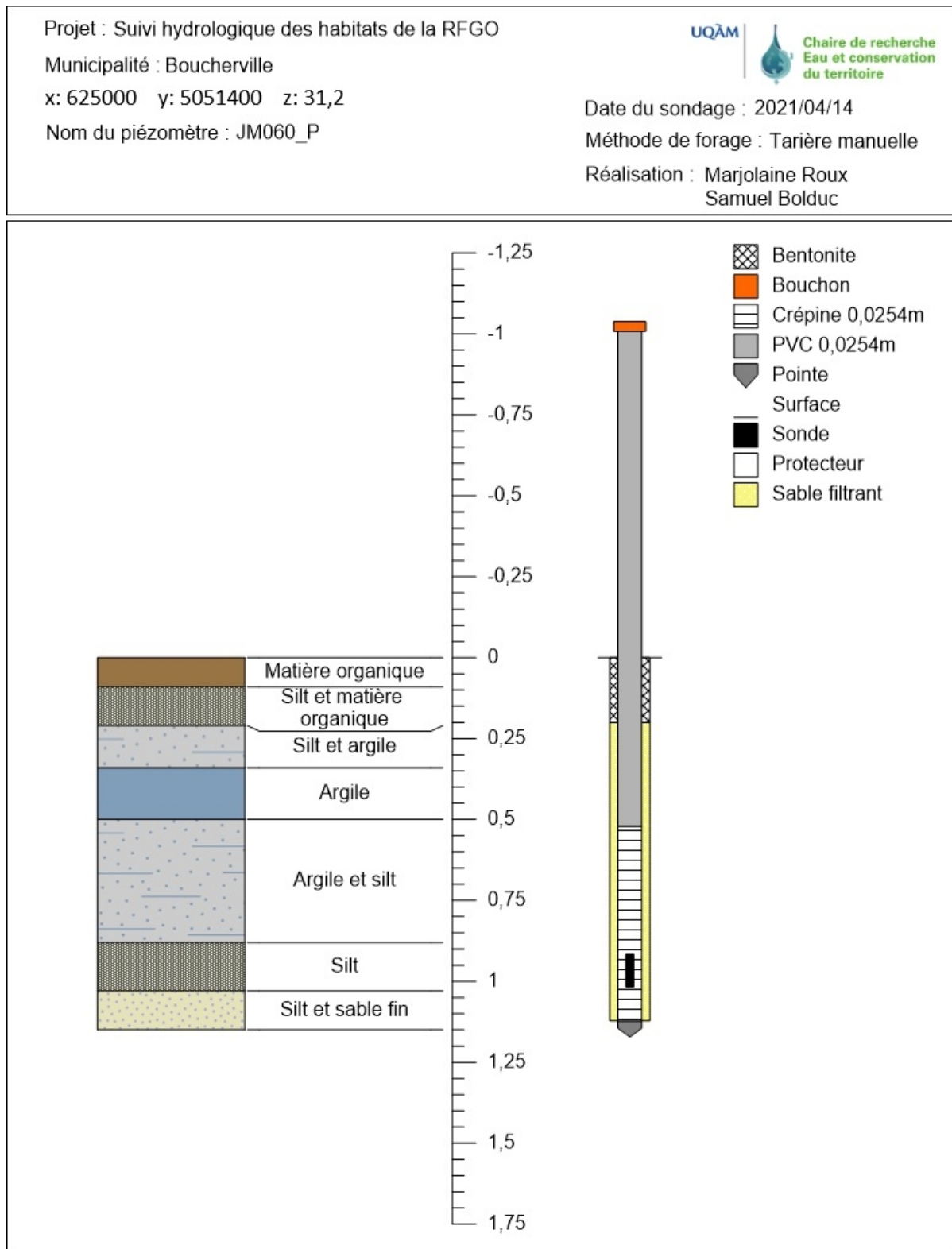


Figure 39 : Log du piézomètre JM060

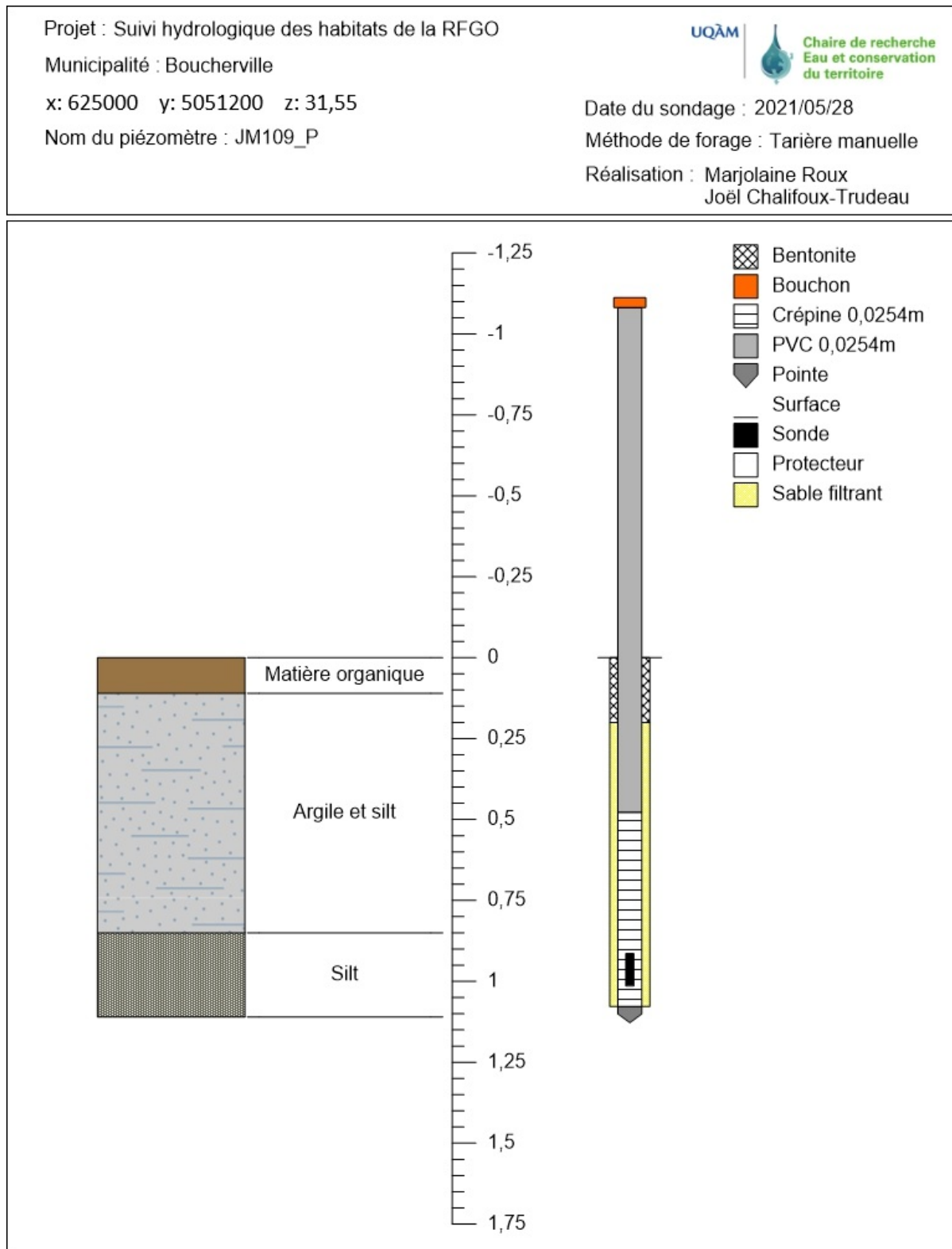


Figure 40 : Log du piézomètre JM109

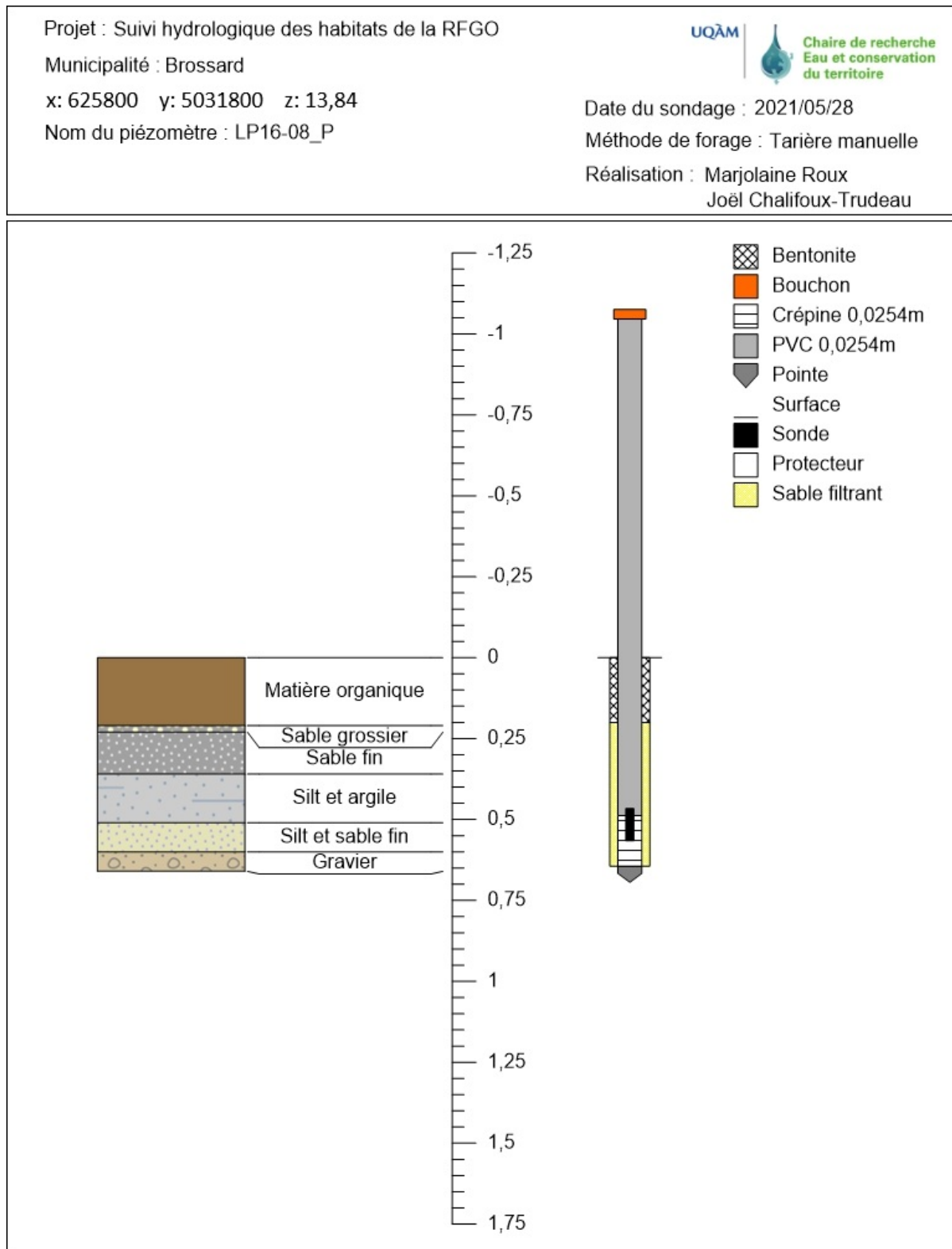


Figure 41 : Log du piézomètre LP16-08

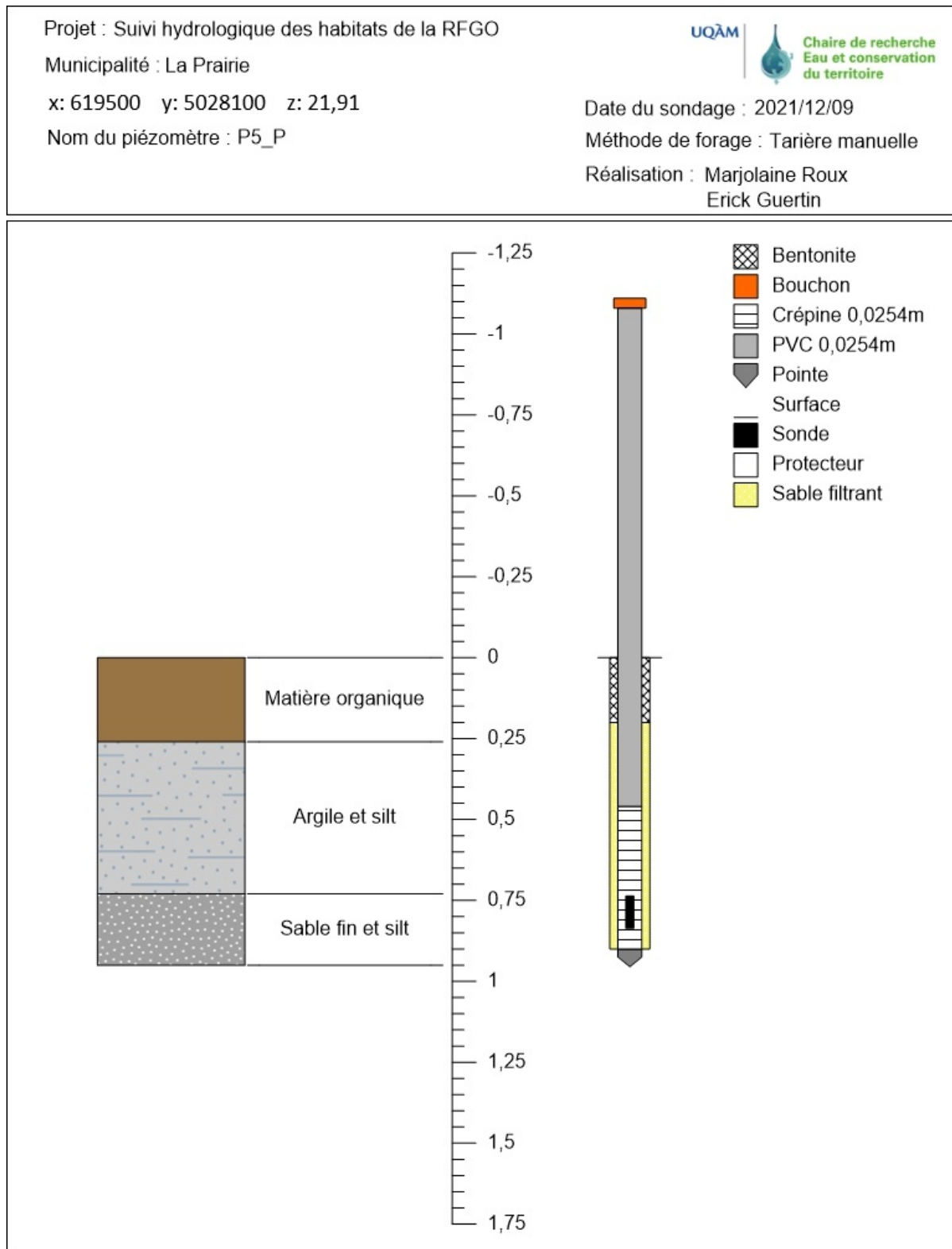


Figure 42 : Log du piézomètre P5

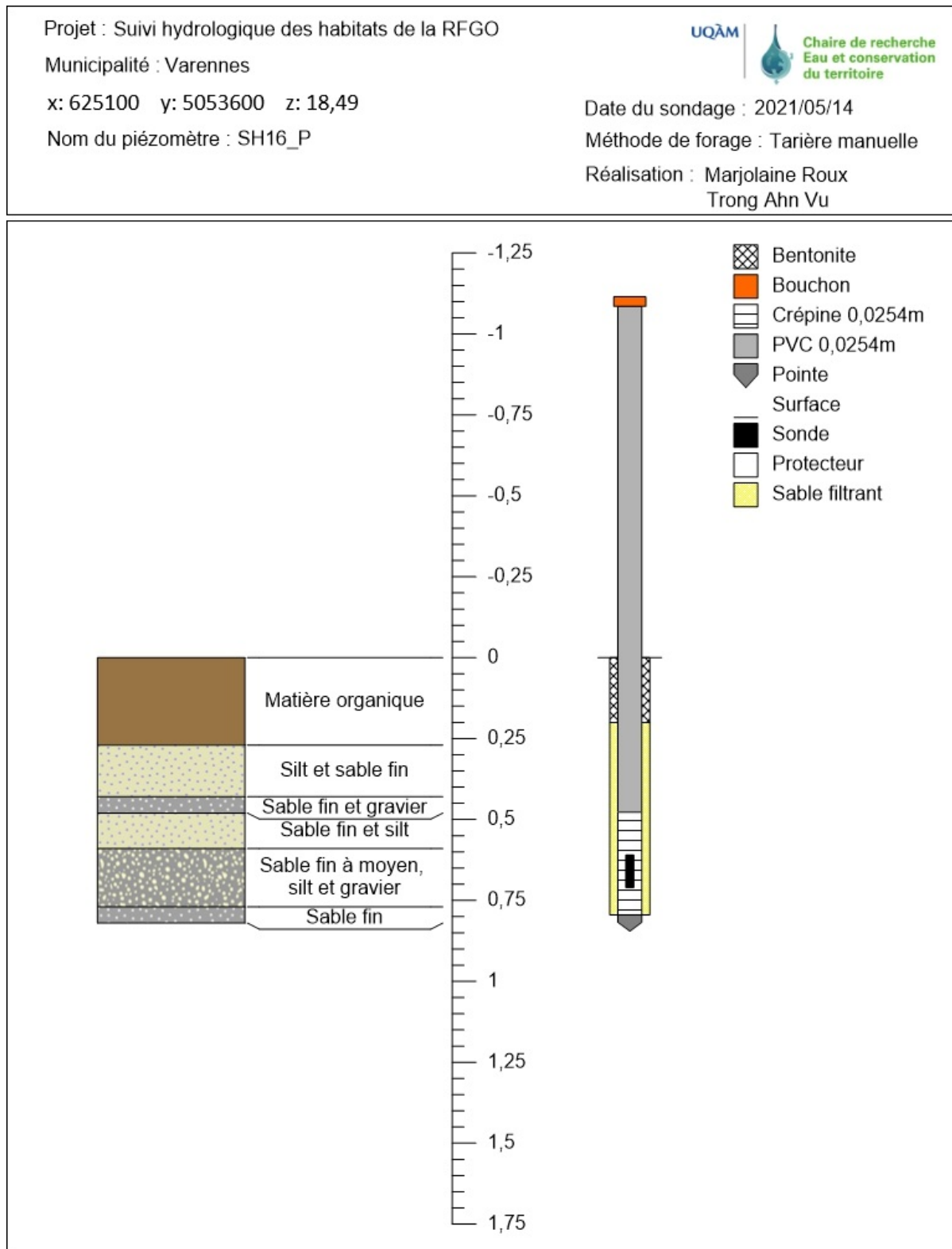


Figure 43 : Log du piézomètre SH16

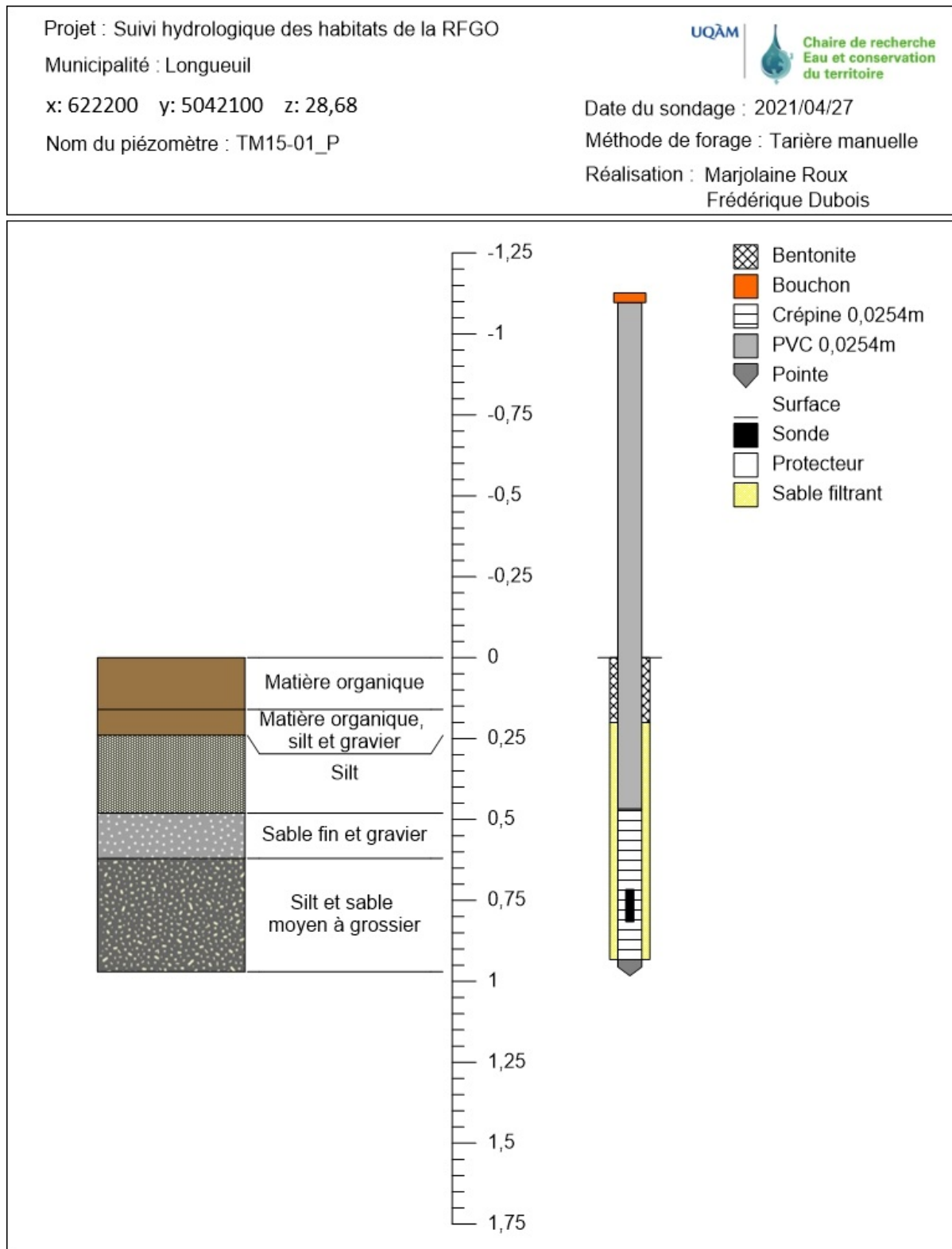


Figure 44 : Log du piézomètre TM15-01

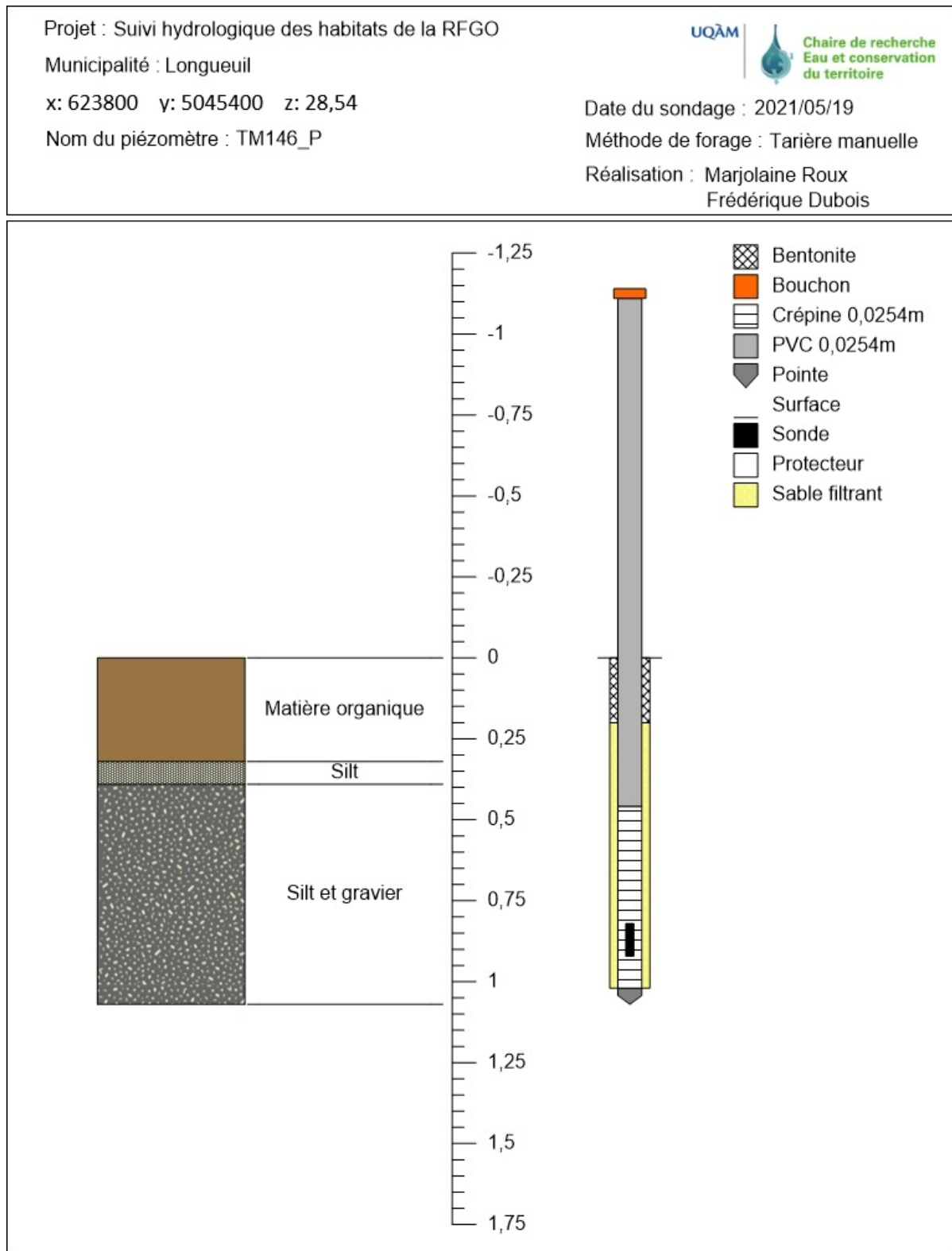


Figure 45 : Log du piézomètre TM146

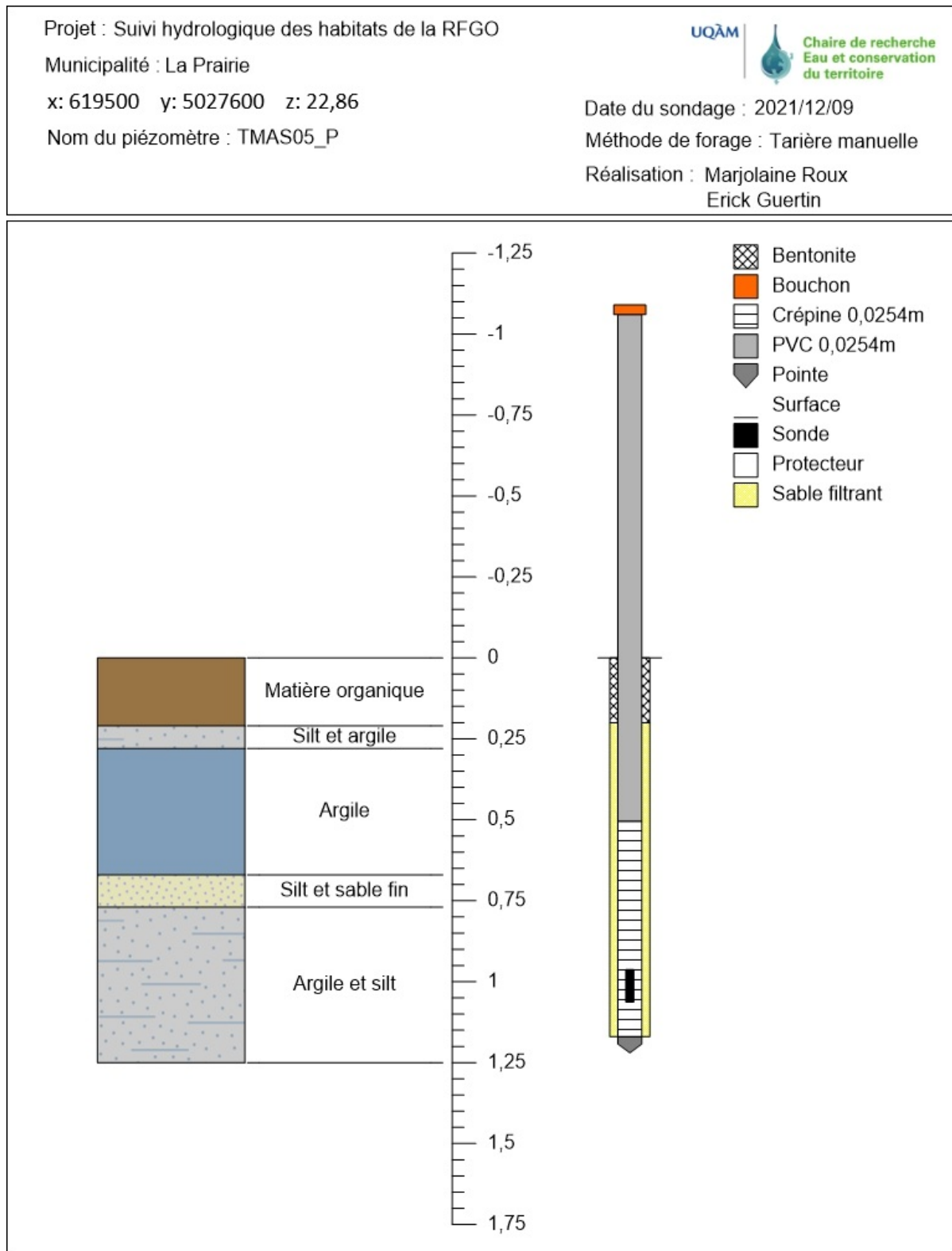


Figure 46 : Log du piézomètre TMAS05

10 ANNEXE D – Coupes stratigraphiques des étangs

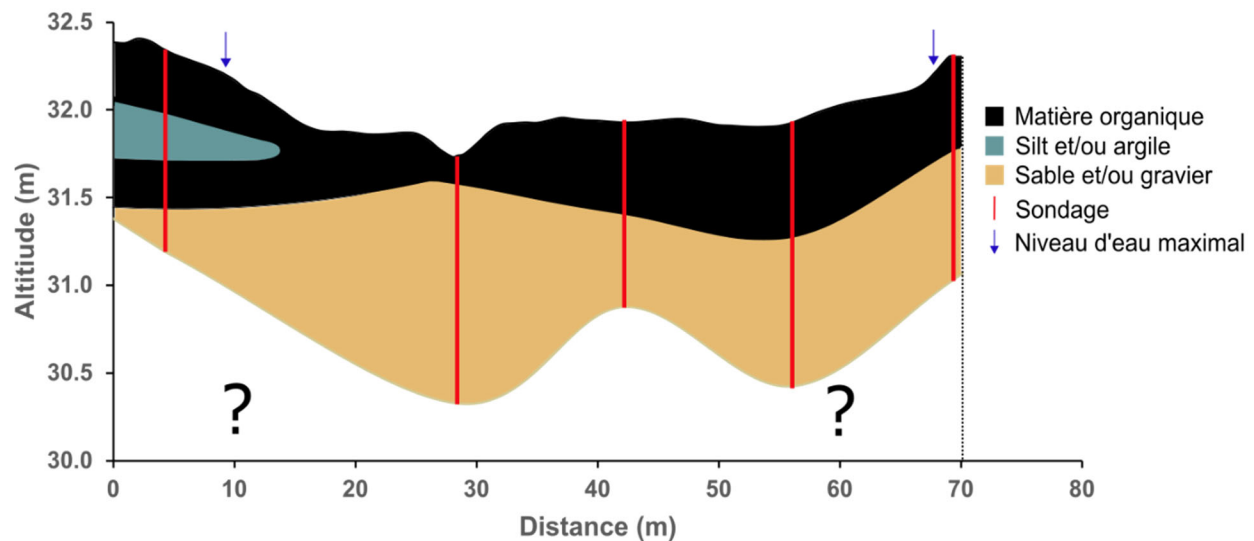


Figure 47 : Coupe stratigraphique du site AT16-37

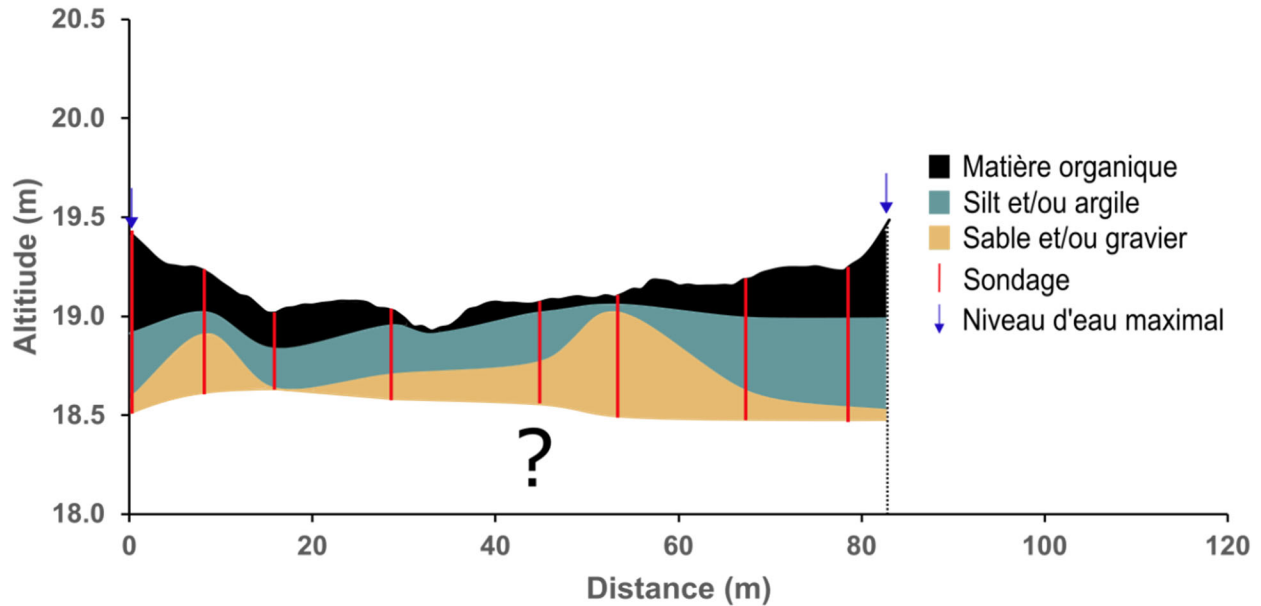


Figure 48 : Coupe stratigraphique du site AT18-10

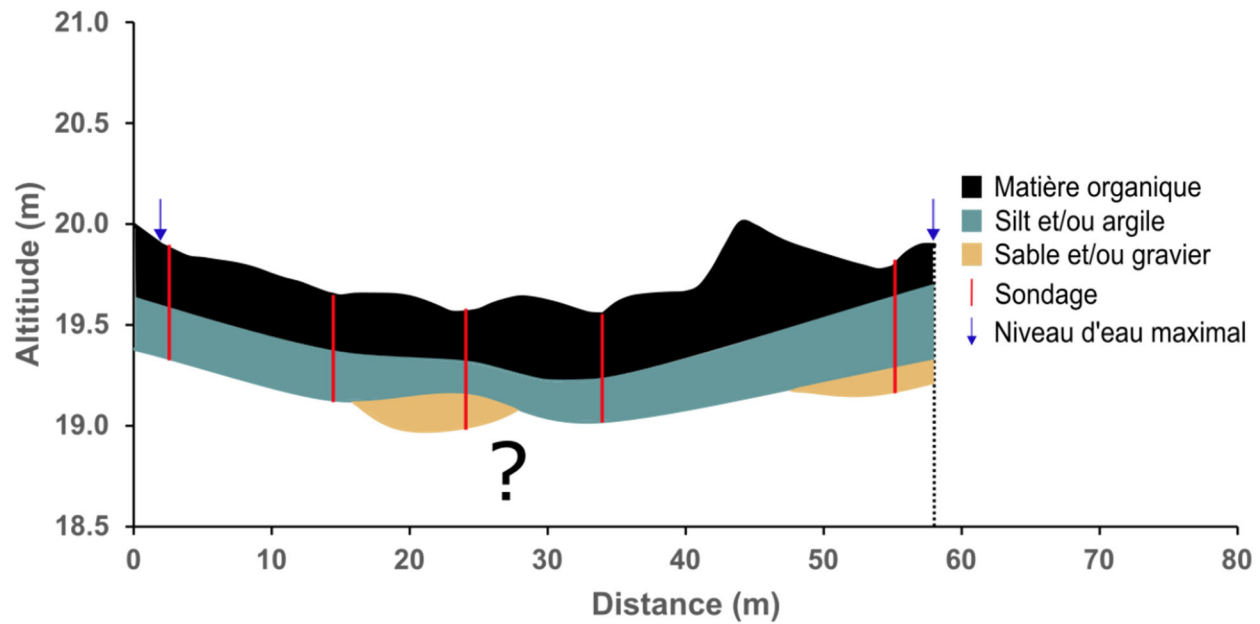


Figure 49 : Coupe stratigraphique du site BA1

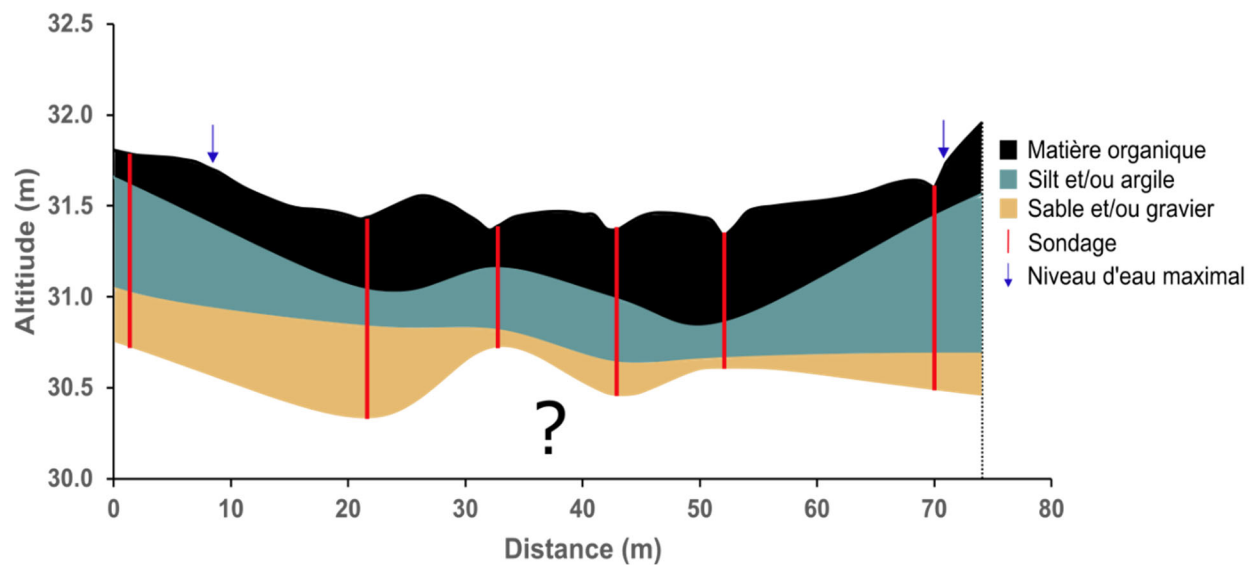


Figure 50 : Coupe stratigraphique du site BCV2

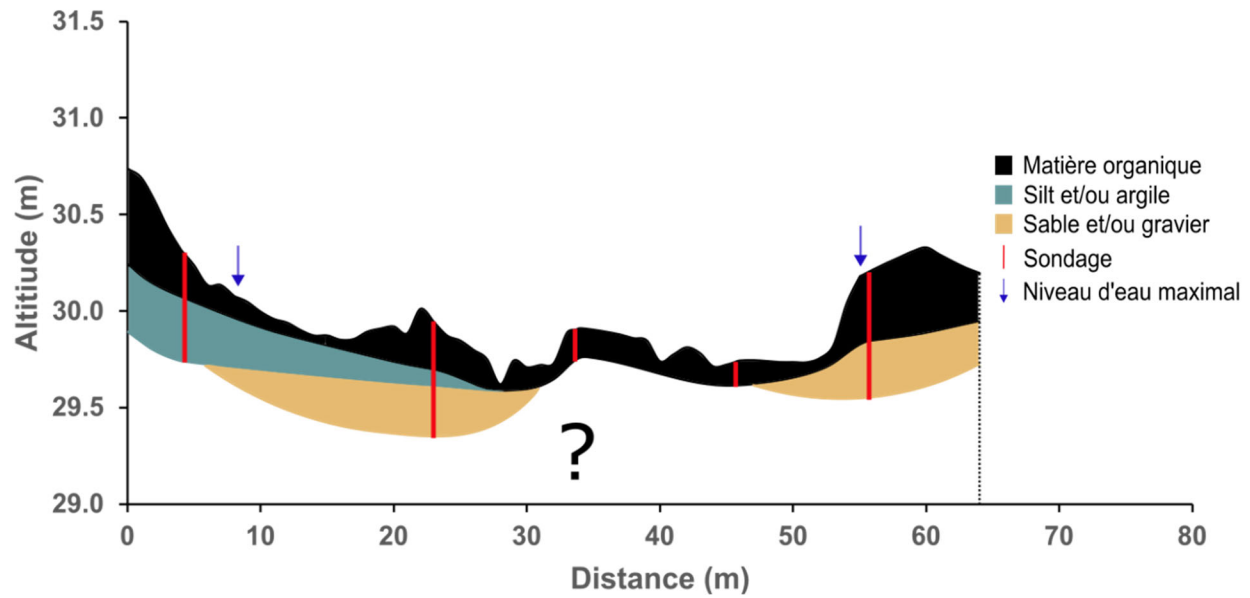


Figure 51 : Coupe stratigraphique du site BL024

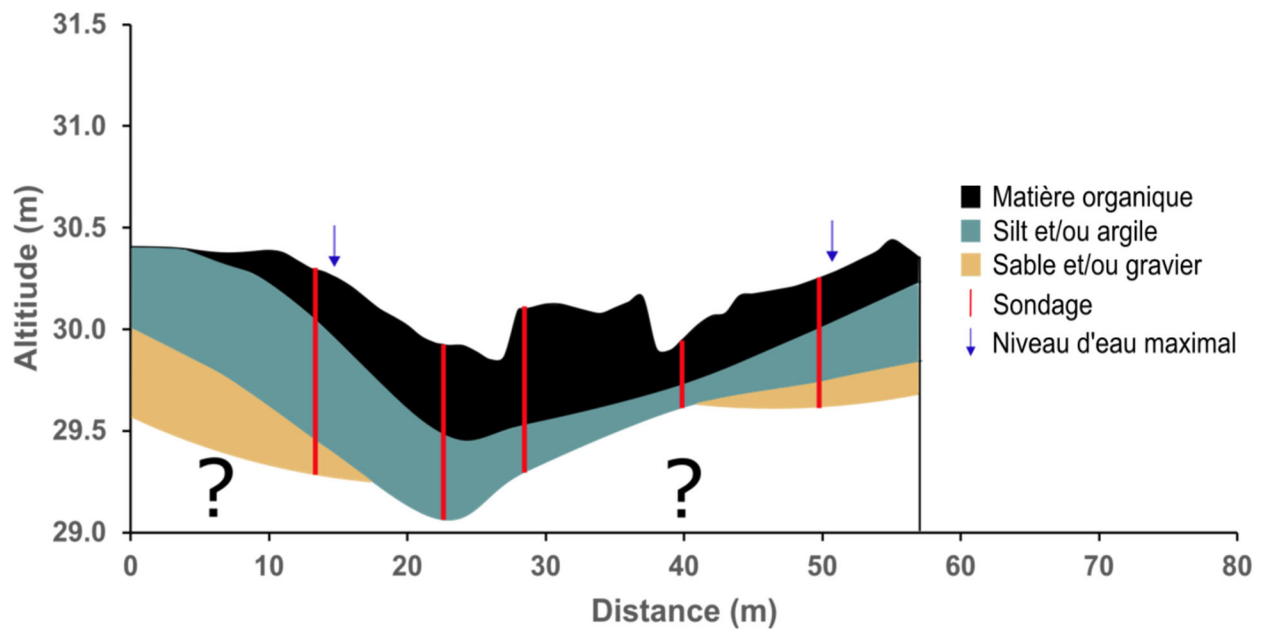


Figure 52 : Coupe stratigraphique du site BTRF

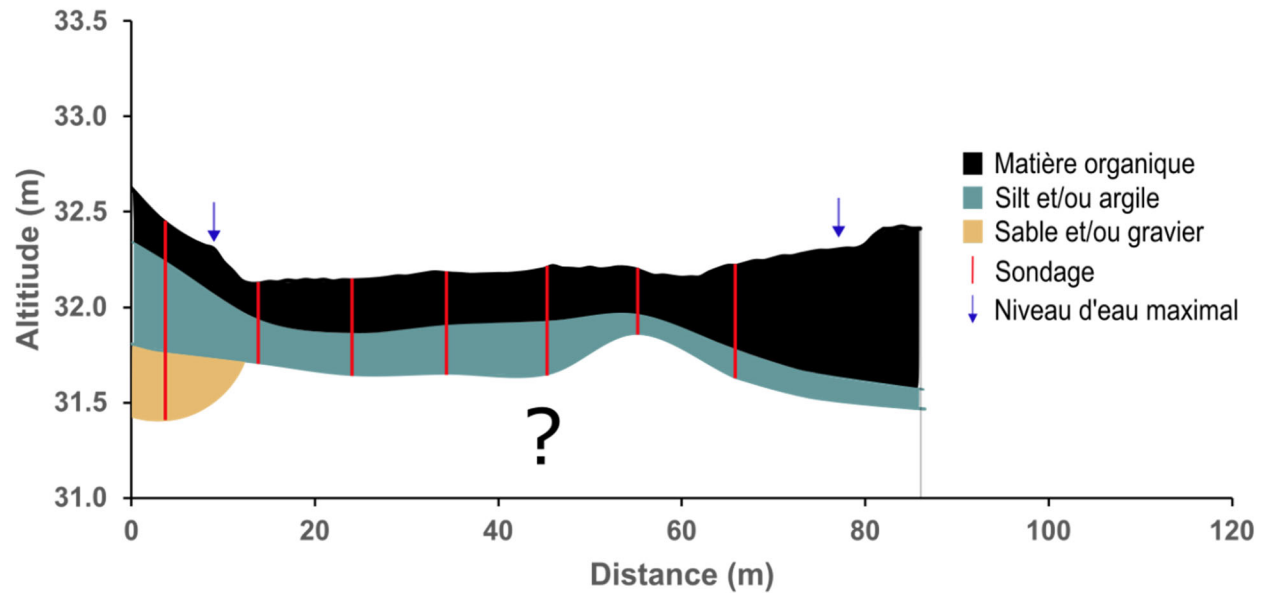


Figure 53 : Coupe stratigraphique du site FUT3

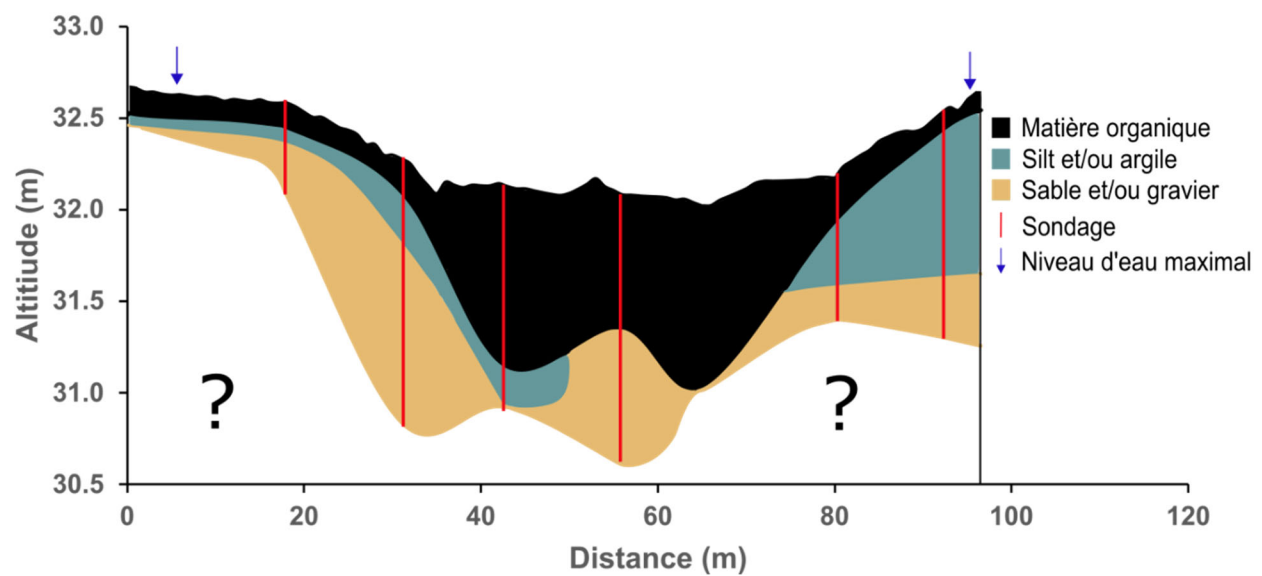


Figure 54 : Coupe stratigraphique du site IP004

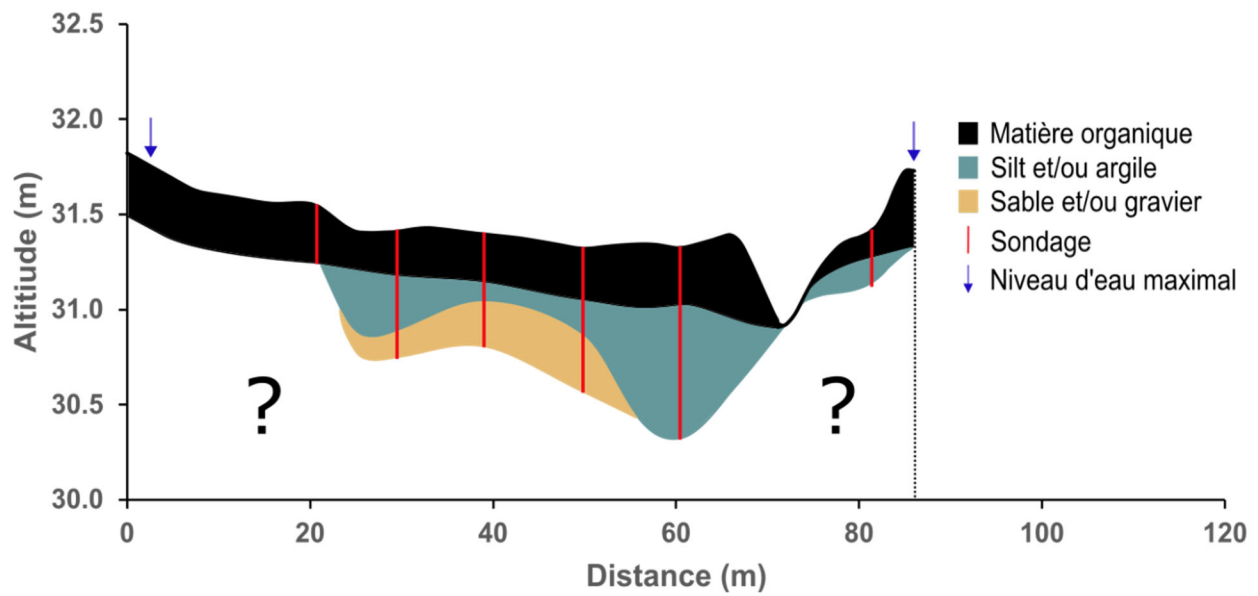


Figure 55 : Coupe stratigraphique du site IP140

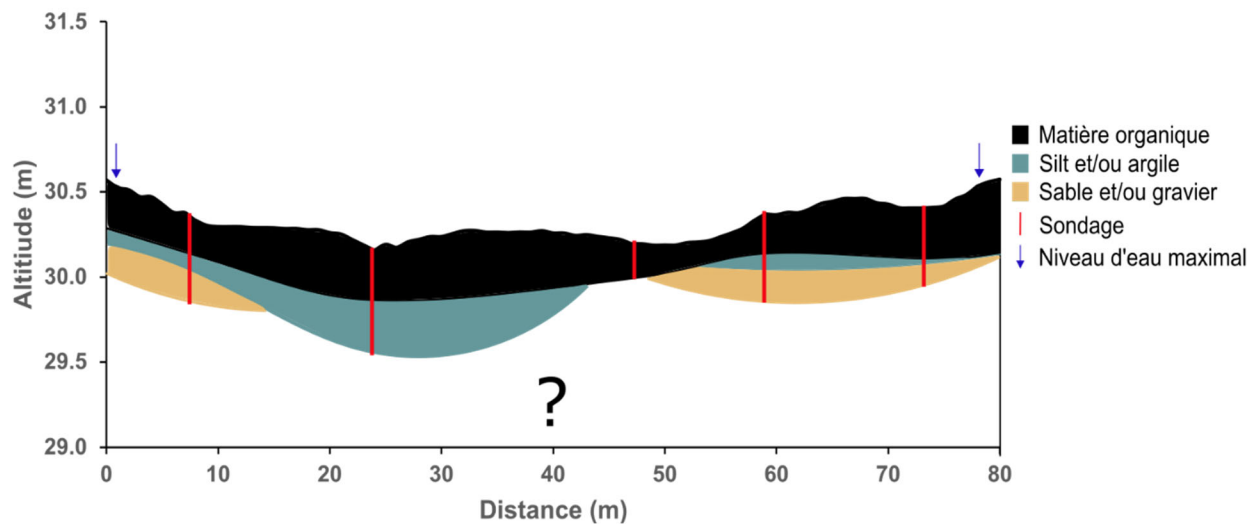


Figure 56 : Coupe stratigraphique du site IP142

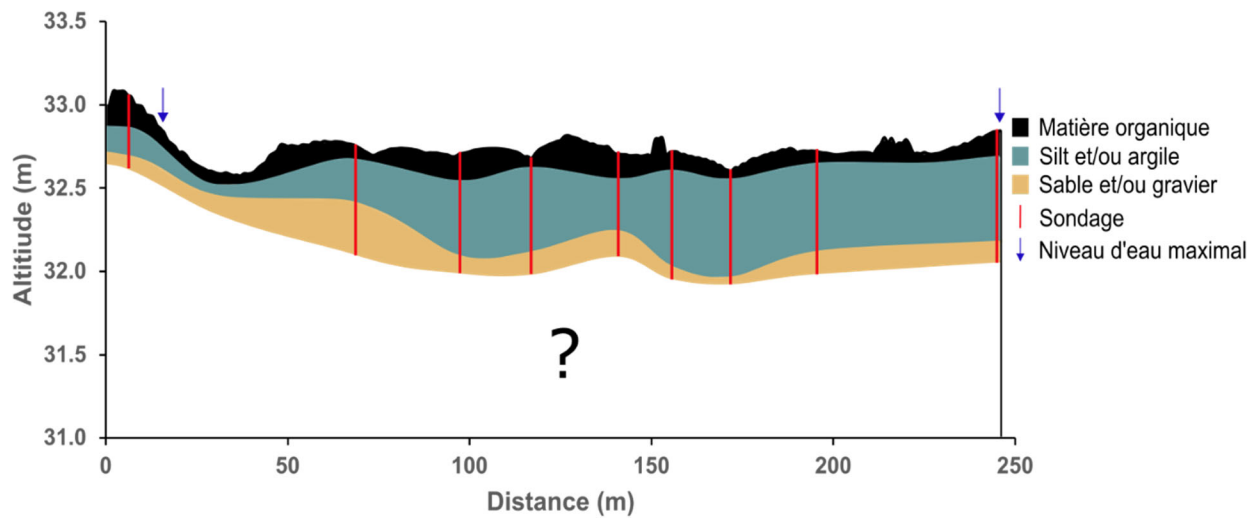


Figure 57 : Coupe stratigraphique du site IP180

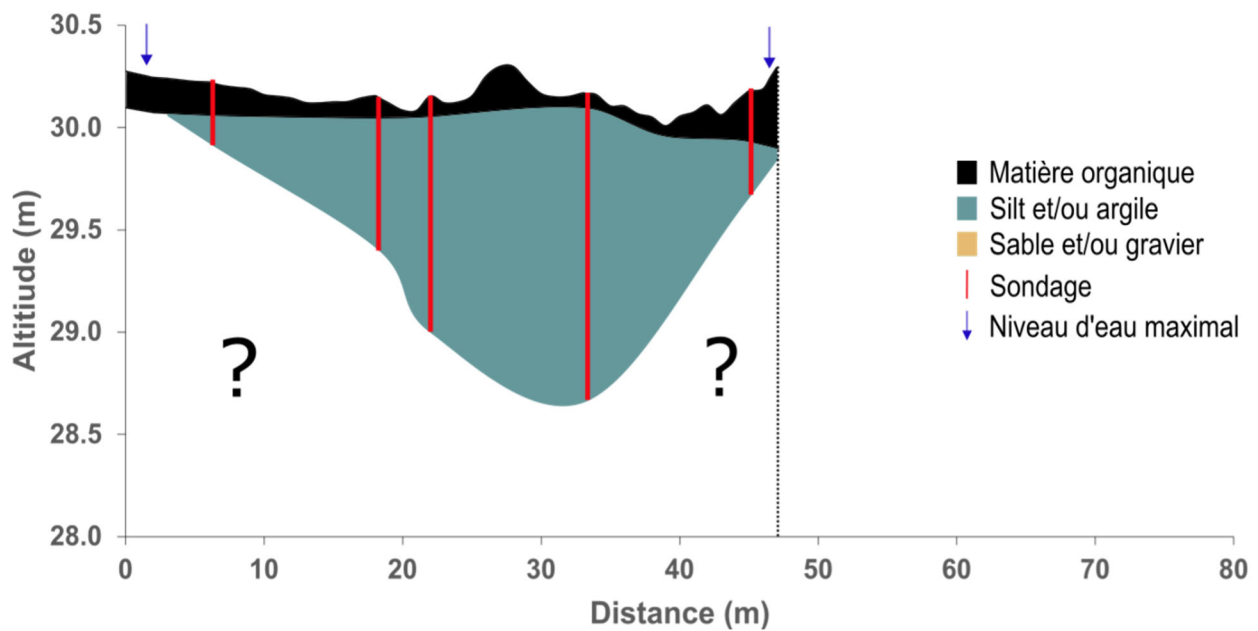


Figure 58 : Coupe stratigraphique du site IP18-02

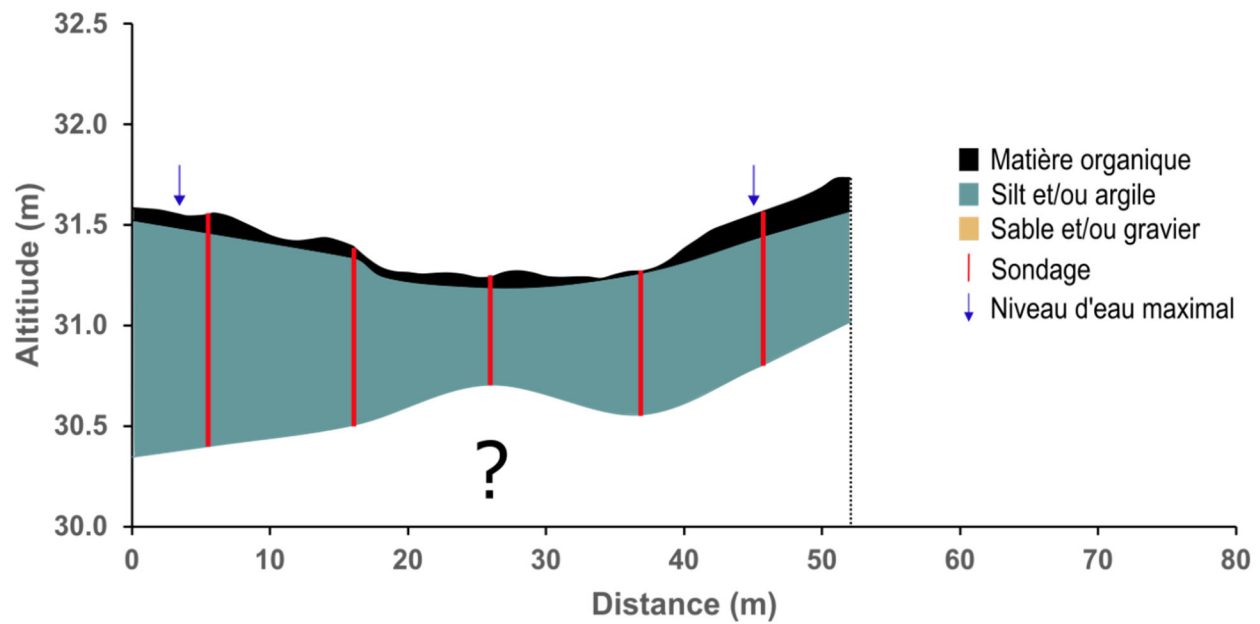


Figure 59 : Coupe stratigraphique du site JM060

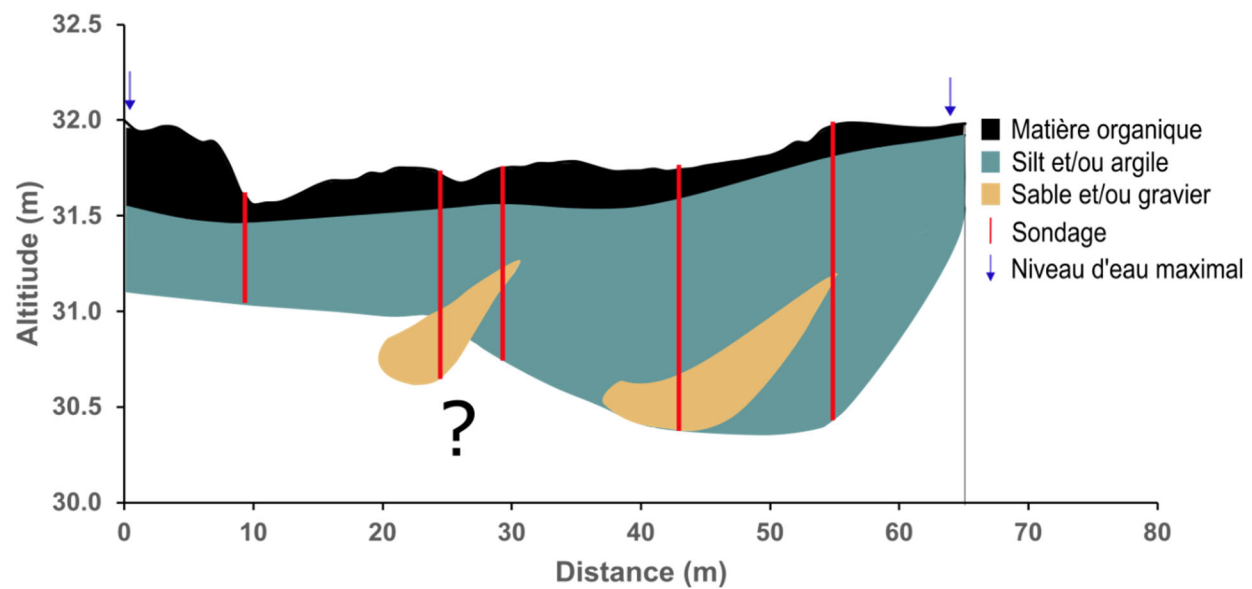


Figure 60 : Coupe stratigraphique du site JM109

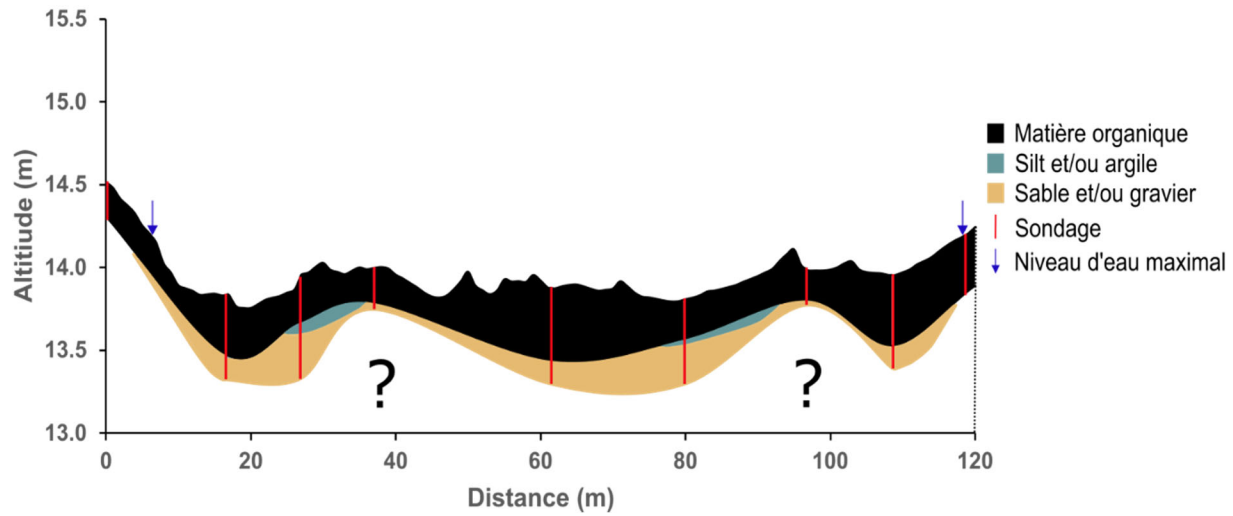


Figure 61 : Coupe stratigraphique du site LP16-08

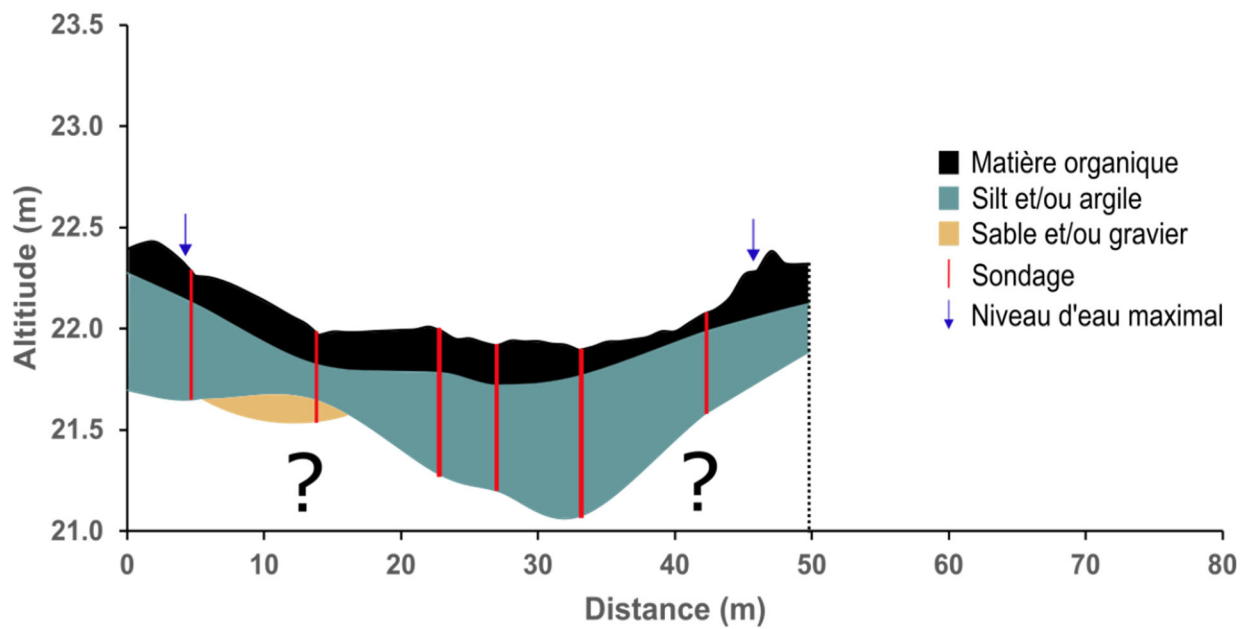


Figure 62 : Coupe stratigraphique du site P5

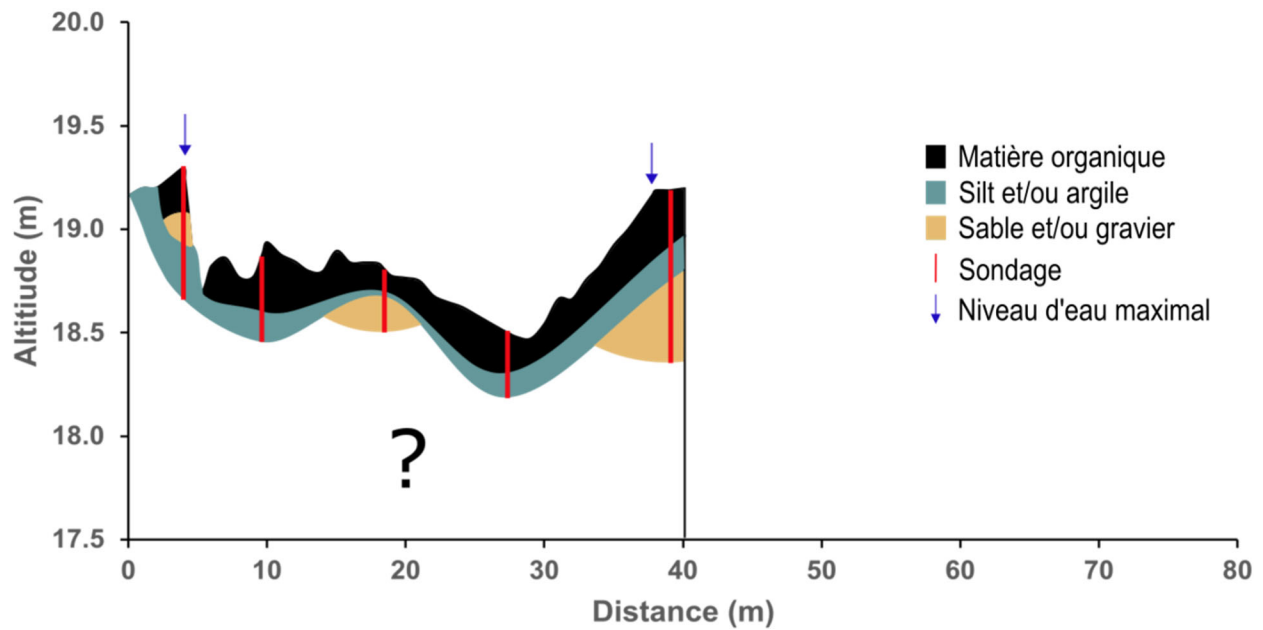


Figure 63 : Coupe stratigraphique du site SH16

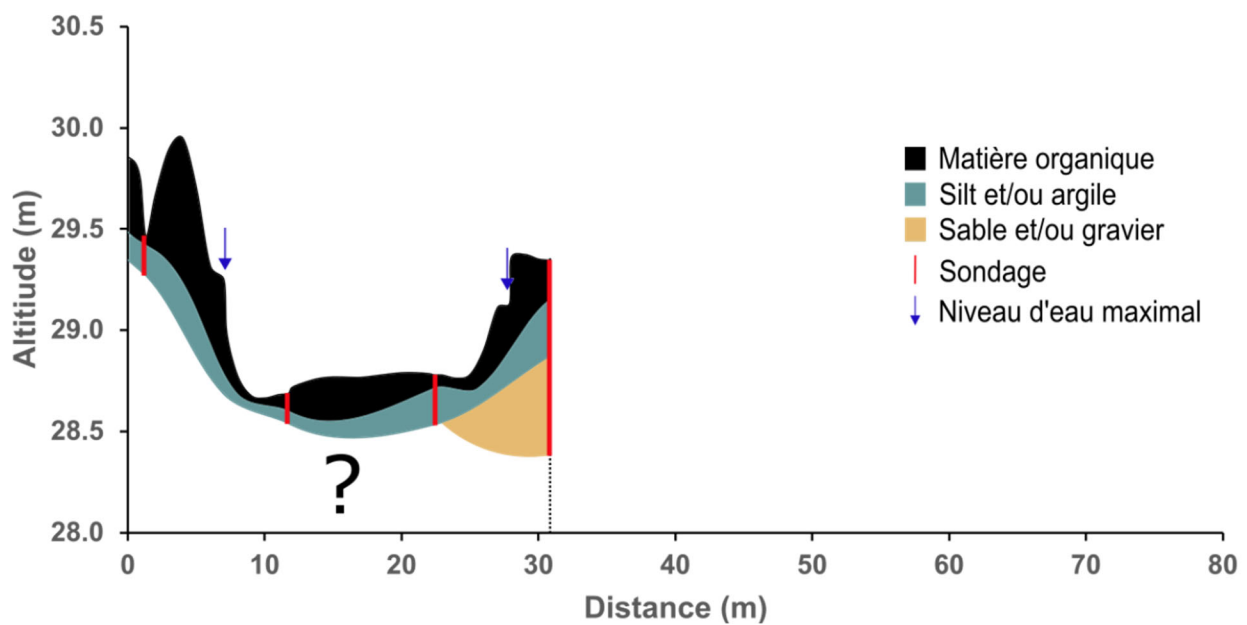


Figure 64 : Coupe stratigraphique du site TM15-01

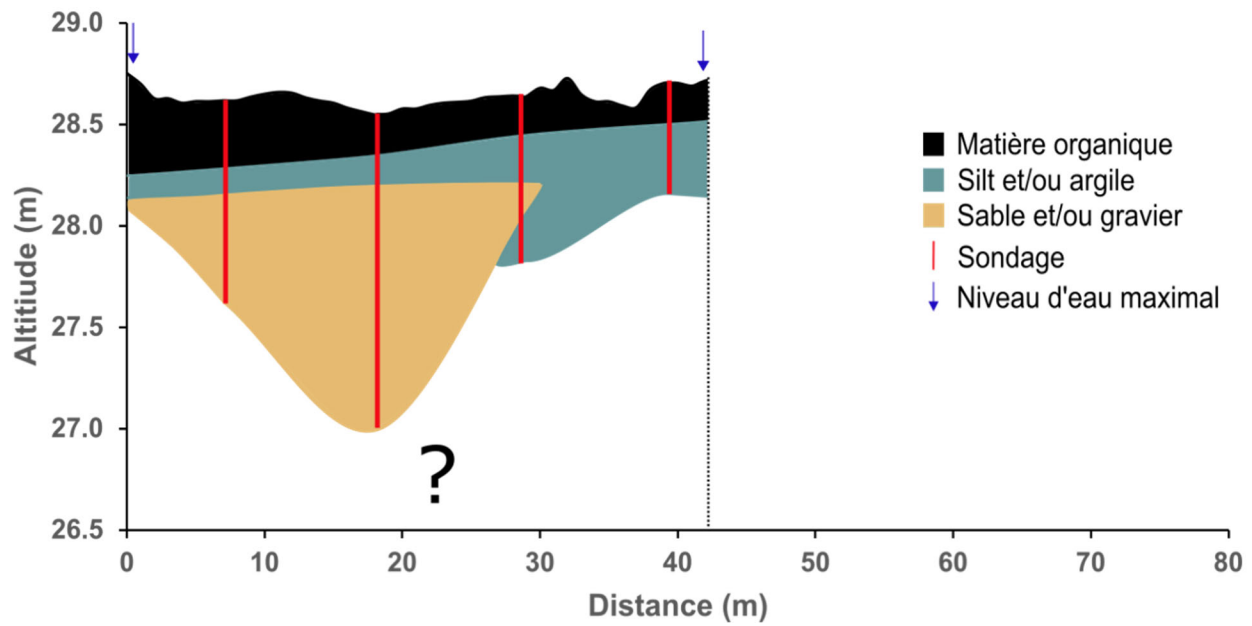


Figure 65 : Coupe stratigraphique du site TM146

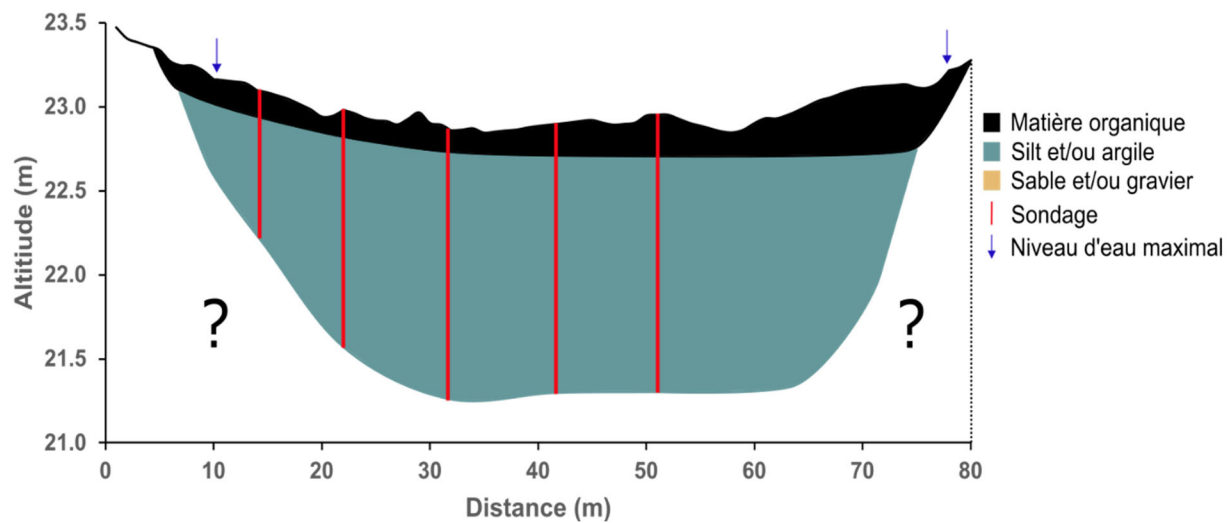


Figure 66 : Coupe stratigraphique du site TMA505

11 ANNEXE E – Protocole d'instrumentation, de caractérisation et de suivi des étangs temporaires



PROTOCOLE

INSTRUMENTATION, CARACTÉRISATION ET
SUIVI DES ÉTANGS TEMPORAIRES

FÉVRIER 2024



ÉQUIPE DE RÉALISATION

Auteurs du rapport

Marie Larocque – Responsable du projet, spécialiste des eaux souterraines, professeure, UQAM

Marjolaine Roux – Agente de recherche, UQAM

Laurence Brunelle – Agente de support à la recherche, UQAM

Référence à citer

Larocque, M., Roux, M., Brunelle, L. (2024). Protocole – Instrumentation, caractérisation et suivi des étangs temporaires. Chaire de recherche Eau et conservation du territoire, Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec, 19 p.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	4
INTRODUCTION	5
1. INSTRUMENTATION	6
1.1 Installation des piézomètres	6
1.2 Évolution du couvert nival.....	10
2. CARACTÉRISATION	12
2.1 Relevés topographiques	12
2.2 Stratigraphie	13
2.3 Ouverture de la canopée	14
2.4 Épaisseur et densité de la neige	15
3. SUIVI	17
RÉFÉRENCES	18
ANNEXE 1. FICHE DESCRIPTIVE	19

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation des instruments sur un étang temporaire 1) piézomètre de surface, 2) piézomètre dans la nappe, 3) règle limnimétrique et 4) appareil photo de chasse	6
Figure 2. Schéma explicatif d'un piézomètre pour mesurer le niveau de l'eau dans l'étang	8
Figure 3. Mesure de la longueur entre le bouchon du piézomètre et le capteur de pression de la sonde	9
Figure 4. Valve à clapet	9
Figure 5. Schéma explicatif d'un piézomètre pour mesurer le niveau de l'eau dans la nappe	10
Figure 6. Positionnement de l'appareil photo de chasse et du panneau solaire	11
Figure 7. Vue générale de l'appareil photo de chasse avec 1) le piézomètre dans l'étang, 2) la règle limnimétrique et 3) la surface de l'étang	11
Figure 8. Exemple de positionnement des relevés topographiques dans l'étang et autour de l'étang ...	13
Figure 9. Exemple de positionnement des instruments, des sondages stratigraphiques et des mesures d'ouverture de la canopée dans l'étang et autour de l'étang	14
Figure 10. Exemple de matériaux récupérés lors d'un sondage stratigraphique manuel	14
Figure 11. Extrémité du tube d'échantillonnage de la neige	15
Figure 12. Mesure de l'épaisseur de la neige	16

INTRODUCTION

Les étangs temporaires sont des milieux humides de petite taille qui se retrouvent dans des positions diverses dans le paysage. En climat nordique, ils sont généralement actifs au printemps et s'assèchent au début de l'été. Bien qu'ils semblent isolés des réseaux hydrographiques voisins, les étangs temporaires sont souvent alimentés par le ruissellement et par l'eau souterraine (Roux et al., 2023) et sont des habitats pour la reproduction de plusieurs espèces d'amphibiens et d'insectes. Leur hydrologie est toutefois encore très peu étudiée et mal comprise et, malgré leur importance pour la biodiversité, ils sont peu protégés. Des travaux récents menés par la Chaire de recherche *Eau et conservation du territoire* (chaire-eau.uqam.ca) ont toutefois permis de faire avancer les connaissances et d'élaborer un protocole pour faciliter leur suivi hydrologique.

L'instrumentation et la caractérisation détaillée des étangs temporaires permettent de mesurer les variations de niveaux d'eau dans les étangs et dans la nappe phréatique, de suivre l'épaisseur de neige au sol et d'observer le moment de la fonte et le moment de l'assèchement complet, de mesurer l'ouverture de la canopée, d'établir la bathymétrie de l'étang et de décrire la géologie locale. Ce protocole propose une démarche permettant d'uniformiser l'instrumentation, la caractérisation et le suivi des étangs temporaires naturels qui permettra d'obtenir des données comparables d'un site à l'autre. Il découle des travaux de Roux et al. (2023) portant sur les étangs temporaires forestiers (2023) et sur les travaux de Larocque et Roux (2023) portant sur les étangs temporaires en zone périurbaine et périagricole.



*Œufs d'amphibiens dans un étang temporaire de Montérégie
(crédit photo: Laurence Brunelle)*

Ce protocole permet de mieux planifier le suivi hydrologique des étangs temporaires pour comprendre la dynamique de ces milieux humides. Il est également très important pour orienter les suivis hydrologiques réalisés à l'étape de la planification des projets de développement (urbain, agricole, industriel) pour limiter les impacts sur les étangs temporaires et favoriser leur protection. Le TCRA (2016) recommande d'ailleurs la mise en place d'un programme de surveillance hydrologique de 1 à 3 ans avant le développement.

Le protocole détaille 1) l'instrumentation des sites, 2) la caractérisation des étangs temporaires ainsi que 3) les étapes à suivre pour le suivi hydrologique, incluant la description du matériel nécessaire, la préparation en laboratoire et le travail de terrain. Le protocole est rédigé sans cibler de marques commerciales pour le matériel et seules les spécifications générales sont fournies.

1. INSTRUMENTATION

L'instrumentation des étangs temporaires se fait après la fonte printanière ou à l'automne lorsque l'étang est inondé. Elle peut aussi se faire lorsque l'étang est sec si la bathymétrie de l'étang est connue (voir section 2. Caractérisation, p.12). Chaque site est instrumenté d'un piézomètre dans l'étang, d'un piézomètre dans la nappe, d'une règle à neige et d'un appareil photo (**Figure 1**).

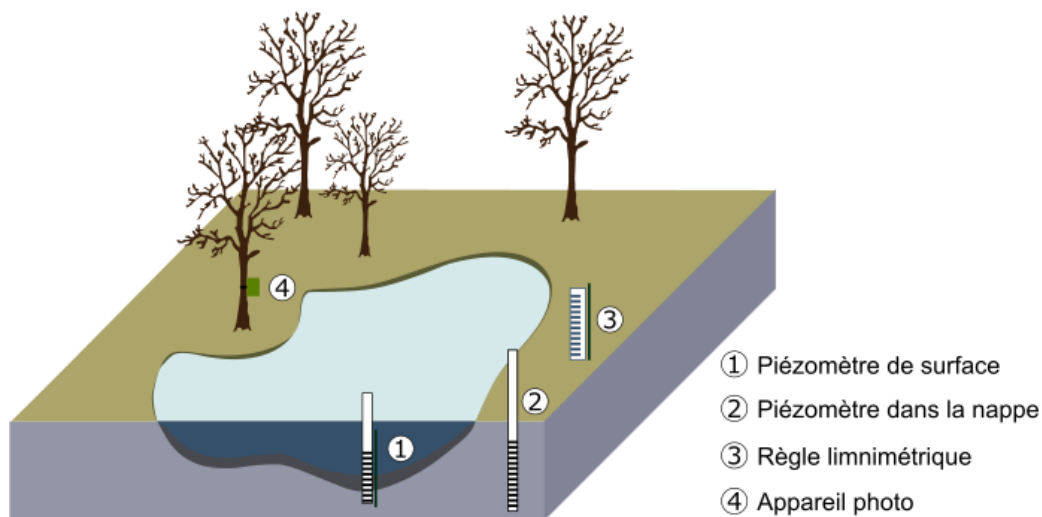


Figure 1. Localisation des instruments sur un étang temporaire 1) piézomètre de surface, 2) piézomètre dans la nappe, 3) règle limnimétrique et 4) appareil photo de chasse

1.1 INSTALLATION DES PIÉZOMÈTRES

L'installation des piézomètres sert à suivre les niveaux d'eau de l'étang et de la nappe phréatique sous-jacente. L'emplacement et la configuration de ces piézomètres sont donc des paramètres importants. Les longueurs de tubage pour la confection des piézomètres de surface et de nappe seront différentes selon le type de piézomètre installé et peuvent également varier selon le site instrumenté.

1.1.1 MATÉRIEL NÉCESSAIRE POUR CHAQUE ÉTANG

PIÉZOMÈTRES

- Tubes de polychlorure de vinyle (PVC) de diamètre extérieur 5 cm Sch 80 filetés ayant un embout mâle (M) et un embout femelle (F). Un PVC de type Sch 80 est suffisamment épais pour limiter les bris lors de l'installation et pendant le suivi. Ces tubes peuvent être pleins ou munis d'ouvertures à la base (crépines). Voir la section 1.1.2, Étape 2: Préparation des piézomètres (p. 7), pour les longueurs de tubes nécessaires.
- Un raccord de tuyau F/F non fileté d'un diamètre intérieur de 5 cm. Le raccord est utilisé seulement si un bris de tubage survient ou si les sections filetées sont endommagées et doivent être sciées.
- Deux bouchons de type « J plug » de 5 cm de diamètre et deux cadenas à clé.
- Deux pointes coniques. La pointe est en PVC et possède un embout M non fileté de 5 cm de diamètre.

- Une tige d'acier en T de 1 m et deux collets de serrage en acier inoxydable de 7,6 cm de diamètre.
- Granules d'argile colloïdale (bentonite). Une fois humidifiées sur place, les granules forment un bouchon dans la cavité autour du piézomètre dans les sédiments.
- Sable de silice d'une granulométrie plus grande que les sédiments en place.
- Une valve à clapet antiretour (Waterra foot valve) de diamètre extérieur de 2,5 cm munie d'un tuyau rigide de 2,50 m. Cette valve sert à purger le piézomètre dans le but de nettoyer l'intérieur et la crépine où des sédiments peuvent avoir colmaté les ouvertures lors de l'insertion du tubage dans le sol.

SONDES

- Deux sondes de pression permettant d'enregistrer une pression d'eau correspondant à une colonne d'eau maximale de 4 m avec une précision de 0,01 m et ayant un diamètre suffisamment petit pour permettre l'insertion dans les tubes de PVC. Des sondes non compensées ou compensées pour la pression atmosphérique peuvent être utilisées.
- Un baromètre. Nécessaire si des sondes non compensées sont utilisées.
- Ficelle de nylon ou d'un autre matériel qui ne conserve pas les plis.
- Sonde piézométrique manuelle. Outil servant à mesurer le niveau d'eau manuellement.

AUTRES

- Tarière manuelle d'une longueur de plus de 1,50 m dotée d'une cuillère de 7,6 cm de diamètre de modèle Dutch Auger
- Niveau à bulle portatif
- GPS

1.1.2 ÉTAPES PRÉPARATOIRES

ÉTAPE 1 : PRÉPARATION DES PIÉZOMÈTRES

- Scier les tubages. Vérifier que les bouts filetés des tubages concordent. Noter la longueur réelle du tubage et de la crépine.
- Préparer le piézomètre de surface en reliant un tube plein de 0,50 m et un tube crépiné de 0,75 m (longueur totale 1,25 m).
- Préparer le piézomètre qui se trouvera dans la nappe en reliant un tube plein de 1,50 m et une crépine de 0,75 m (longueur totale 2,25 m). Perforer un petit trou près du sommet du piézomètre pour ventiler l'intérieur du tubage.
- Visser les sections des piézomètres et installer les pointes coniques aux extrémités des crépines.
- Scier la tige d'acier à 1 m de longueur.

ÉTAPE 2 : PROGRAMMATION DES SONDES

- À partir de l'ordinateur, programmer les sondes pour la prise de mesures horaires, idéalement à partir de l'heure juste, suivant l'instrumentation à l'aide du démarrage ultérieur. Dans les paramètres de la sonde, indiquer le nom du site où elle sera installée.
- Faire une lecture à l'air libre et s'assurer que toutes les sondes donnent la même valeur +/- 2 cm.

1.1.3 SUR LE TERRAIN : PIÉZOMÈTRE DE SURFACE (EAU DE SURFACE)

Un exemple de *Fiche descriptive* se trouve en annexe et comprend toutes les informations reliées au travail effectué sur le terrain qui devraient être notées. Cette fiche peut être utilisée pour toutes les sections du protocole concernant le travail de terrain.

LOCALISATION DU POINT LE PLUS PROFOND

- Se déplacer dans l'étang avec un ruban à mesurer au moment où l'étang est inondé et identifier le point le plus profond. Le point le plus profond ne se situe pas nécessairement au centre (**Figure 1**). Cette étape doit être réalisée après la fonte de la neige et de la glace, et avant l'assèchement de l'étang.
- Localiser le point le plus profond à l'aide du GPS.

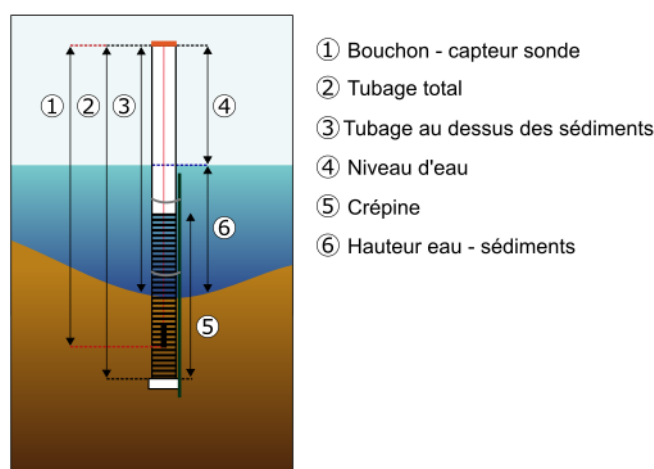


Figure 2. Schéma explicatif d'un piézomètre permettant de mesurer le niveau de l'eau dans l'étang

INSTALLATION ET INSTRUMENTATION

- Positionner un piézomètre crépiné à la base de l'étang, à l'emplacement le plus profond (**Figure 2**).
- Insérer manuellement la tige d'acier en T dans les sédiments à l'aide de la masse et vérifier sa verticalité avec le niveau.
- Positionner le tubage contre la tige d'acier en insérant la crépine dans les sédiments à l'aide de la masse. Protéger le sommet du tubage à l'aide d'un objet rigide avant d'utiliser la masse, car les coups le déformeront. Limiter la descente à 0,25 m sous l'interface sédiments-eau pour éviter que le tube crépiné ne soit colmaté par les sédiments.
- Fixer le tubage à la tige d'acier à l'aide de deux collets de serrage et revérifier la verticalité.
- Attacher la sonde au bouchon « J-Plug » au moyen de la ficelle, mesurer la longueur bouchon-capturateur sonde (**Figure 3**) puis descendre la sonde 10 cm sous l'interface sédiment-eau afin qu'elle puisse être laissée en place pendant l'hiver. Il est important de laisser un espace de quelques centimètres entre le fond du tubage et la sonde puisque des sédiments peuvent s'y accumuler et modifier la position de la sonde une fois réinsérée.

- Mesurer et noter la longueur du tubage au-dessus des sédiments, la hauteur eau-sédiments et le niveau de l'eau dans le tubage (**Figure 2**).
- Installer le bouchon « J-Plug » sur l'ouverture supérieure du tubage et positionner le cadenas.
- Installer une sonde de niveau à l'air libre (baromètre) sur un arbre à proximité pour enregistrer la pression atmosphérique. Cette donnée permet de retirer l'effet de la pression atmosphérique des niveaux d'eau enregistrés. Un baromètre peut être utilisé pour plusieurs étangs à condition qu'il soit situé dans un rayon d'une quinzaine de kilomètres.



Figure 3. Mesure de la longueur entre le bouchon du piézomètre et le capteur de pression de la sonde

1.1.3 SUR LE TERRAIN : PIÉZOMÈTRE DANS LA NAPPE (EAU SOUTERRAINE)

- Suivre la méthodologie de la section 2.2 Stratigraphie (p.13) pour détailler les sédiments rencontrés lors de l'installation du piézomètre.
- Creuser un trou à la tarière à une distance minimale de 3 m et une distance maximale de 5 m de l'étang. La longueur du tubage proposée est prévue pour un piézomètre allant à une profondeur de 1,50 m dans le sol. Il est toutefois possible que cette profondeur doive être différente si les dépôts ou le roc ne permettent pas une insertion plus profonde ou si la nappe se trouve à une plus grande profondeur. En général, la base du tubage devrait se situer au moins 0,50 m en dessous du point le plus bas de l'étang.

INSTALLATION ET INSTRUMENTATION

- Insérer le piézomètre en situant la base de la crépine dans le sol à une profondeur de 1,50 m. Un tubage plein de 0,75 m sous la surface du sol permet de limiter la connexion entre la crépine et la surface. Assurer une protection du tubage si l'utilisation d'une masse est nécessaire.
- Remplir de sable la cavité autour du piézomètre. Ce sable sert de massif filtrant autour de la crépine.
- Comblir les 30 derniers centimètres sous la surface du sol de granules d'argile pour limiter l'infiltration d'eau dans le piézomètre à partir de la surface. S'assurer que les granules d'argile ne sont pas déposés au niveau de la crépine.
- Nettoyer le piézomètre après son installation en purgeant l'eau à l'aide du tuyau muni d'une valve à clapet (**Figure 4**). Il se pourrait que le piézomètre doive être purgé occasionnellement par la suite s'il y a accumulation de sédiments au fond du tubage.



Figure 4. Valve à clapet

- Attacher la sonde au bouchon au moyen d'une ficelle, mesurer la longueur bouchon-capteur sonde et descendre la sonde jusqu'à une profondeur de 1,40 m, soit 10 cm au-dessus du fond du piézomètre.
- Mesurer et noter la longueur du tubage dans les sédiments, la longueur du tubage hors-sol et le niveau de l'eau dans le tubage (**Figure 5**).
- Installer le bouchon « J-Plug » sur l'ouverture supérieure du tubage et positionner le cadenas.

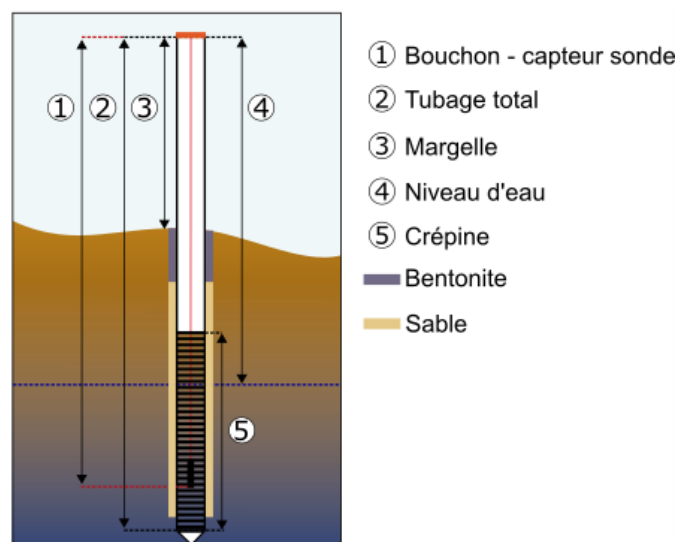
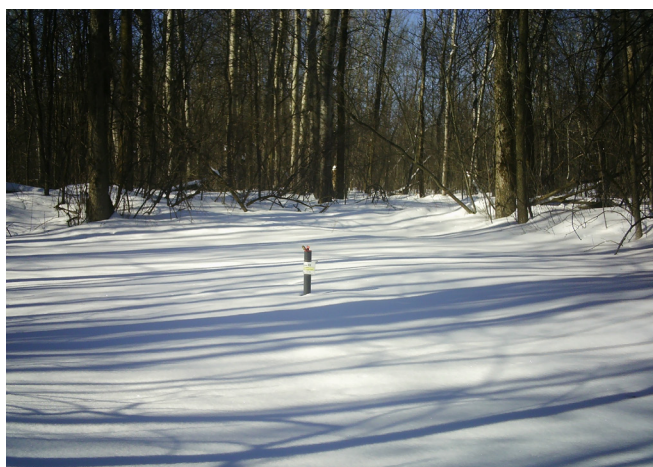


Figure 5. Schéma explicatif d'un piézomètre pour mesurer le niveau de l'eau dans la nappe

1.2 ÉVOLUTION DU COUVERT NIVAL

Un suivi journalier de l'évolution du couvert nival et de la fonte complète de la neige et de la glace sur l'étang est réalisé par la prise de photos. Cette donnée permet de déterminer le début de la période d'activité hydrologique de l'étang ou hydropériode. En période hors gel, les photos journalières permettent de confirmer la date de l'assèchement printanier et le retour de l'eau dans l'étang pendant l'été et l'automne. Les photos servent aussi à confirmer ces dates qui sont également déterminées par l'analyse des données météorologiques et des données de niveaux d'eau de surface.



Étang temporaire de Montérégie en hiver (crédit photo : caméra de chasse UQAM)

1.2.1 MATÉRIEL NÉCESSAIRE

- Appareil photo de chasse
- Panneau solaire et batterie au lithium x4
- Boîte de protection et câble de 2 m
- Carte-mémoire de 32 Go
- Attache-câbles résistants au froid
- Règle limnimétrique centimétrique de 1 m en acier. Cette règle permet d'évaluer visuellement la hauteur de neige au sol.
- Tige d'acier en T de 1,25 m
- Niveau portatif

1.2.2 SUR LE TERRAIN

POSITIONNEMENT DE L'APPAREIL PHOTO DE CHASSE

- Localiser un arbre qui permet de positionner l'appareil photo. Utiliser une tige en T s'il n'y a pas d'arbres.
- Fixer l'appareil photo de manière à voir adéquatement le piézomètre situé dans l'étang, la règle limnimétrique et la surface de l'eau (Figure 1 et Figure 7).
- Installer le panneau solaire sur l'arbre au-dessus de l'appareil photo pour que celui-ci soit légèrement incliné vers le haut et orienté vers le sud (Figure 6). Ajuster les réglages de l'appareil photo.



Figure 6. Positionnement de l'appareil photo de chasse et du panneau solaire

INSTRUMENTATION POUR LE SUIVI DE LA HAUTEUR DE LA NEIGE

- Enfoncer la tige d'acier de 0,25 m avec la masse en s'assurant que la section plane de la tige soit face à l'appareil photo. Vérifier la verticalité de la tige d'acier.
- Attacher la règle à la tige et s'assurer que la base de la règle soit au niveau du sol.

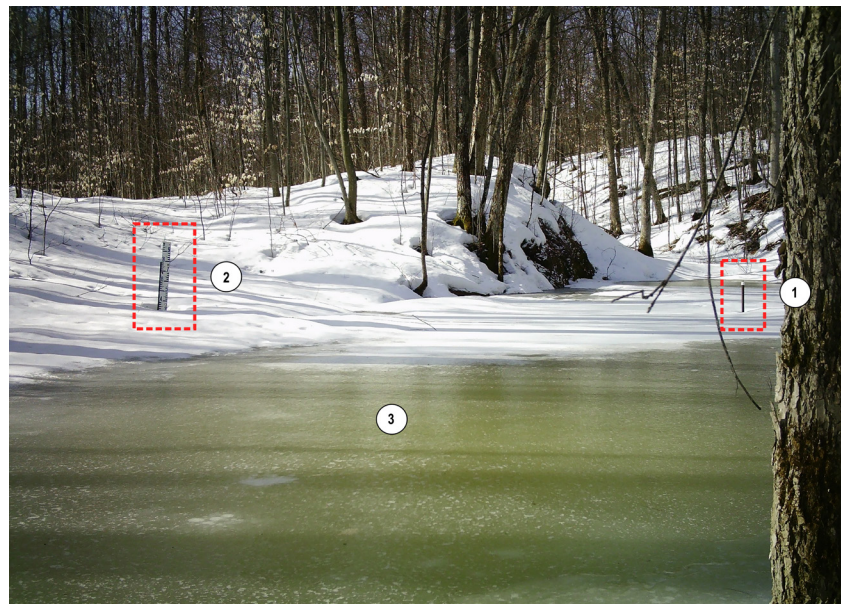


Figure 7. Vue générale de l'appareil photo de chasse avec 1) le piézomètre dans l'étang, 2) la règle limnimétrique et 3) la surface de l'étang

2. CARACTÉRISATION

La caractérisation des étangs temporaires doit être réalisée au début du suivi hydrologique. Elle permet d'établir la bathymétrie, la géologie et l'ouverture de la canopée. Plusieurs journées de terrain peuvent être nécessaires selon les dimensions du site, la période de l'année ou les conditions météorologiques.



Étang temporaire de Montérégie (crédit photo: Camil Vachon-Laberge)

2.1 RELEVÉS TOPOGRAPHIQUES ¹

Les relevés topographiques servent à déterminer la bathymétrie des étangs et la topographie des environs de l'étang.

2.1.1 MATÉRIEL NÉCESSAIRE

- Instrument permettant de faire un relevé topographique à une résolution de 1 cm ou moins (p.ex.: GPS différentiel ou station totale).
- Ruban à mesurer
- Ruban de balisage

2.1.2 SUR LE TERRAIN

- Identifier des traverses perpendiculaires à l'axe principal qui est le plus long de l'étang, espacées de 5 m (**Figure 8**).
- Localiser les sections importantes telles que le trop-plein, les apports en eau (fossés) ou les bordures de la cuvette qui doivent être caractérisées de manière plus détaillée.
- Prendre plusieurs points de mesure altimétrique le long des traverses et particulièrement en bordure

¹ Il est plus facile de procéder aux relevés topographiques avant ou après la feuillaison et lorsque l'étang est sec. Également, lorsque les relevés topographiques précèdent l'instrumentation du site, il est plus facile de déterminer le point le plus bas de l'étang où sera installé le piézomètre de surface.

de l'étang, c.-à-d. des mesures au haut et au bas de la pente. Prendre également des mesures au trop-plein de l'étang et aux secteurs surélevés à l'intérieur de la zone inondée. Les traverses doivent couvrir le secteur jusqu'à une distance de 5 m à l'extérieur de la limite de la surface maximale de l'étang.

- Prendre des mesures altimétriques à l'emplacement des piézomètres ainsi qu'aux endroits où sont effectués les sondages stratigraphiques et les mesures d'ouverture de la canopée.

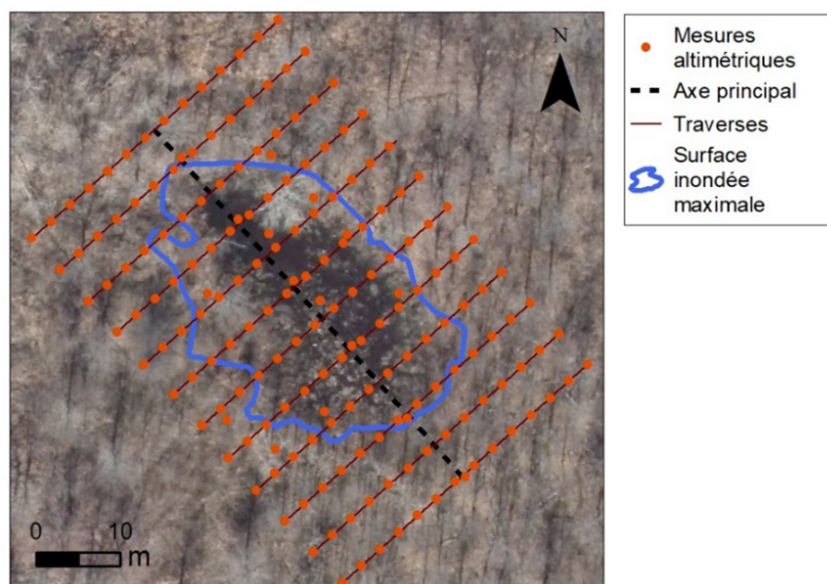


Figure 8. Exemple de positionnement des relevés topographiques dans l'étang et autour de l'étang

2.2 STRATIGRAPHIE ²

La caractérisation de la stratigraphie sert à déterminer la nature des matériaux géologiques sous les étangs et autour des étangs. Cette information est nécessaire pour comprendre la capacité du sol à laisser s'infiltrer l'eau.

2.2.1 MATÉRIEL NÉCESSAIRE

- *Tarière manuelle de plus de 1,50 m dotée d'une cuillère de 2,5 ou 5 cm de diamètre*
- *Ruban à mesurer*
- *Sacs d'échantillonnage refermables en plastique avec glissière*
- *Ruban de balisage*

2.2.2 SUR LE TERRAIN

- Localiser l'axe principal (le plus long) et l'axe secondaire (le plus court) de l'étang (**Figure 9**).
- Positionner des repères à tous les 10 m sur ces axes, en commençant et terminant à l'extérieur des limites de la surface inondée maximale (**Figure 9**). La description des sédiments sous-jacents aux piézomètres doit être réalisée lors de leur installation.

² Il est préférable de réaliser les sondages stratigraphiques lorsque l'étang est sec.

- Sonder par intervalles de 30-50 cm afin d'obtenir une bonne résolution verticale des types de sédiments. Entre chaque intervalle, tourner la tarière trois fois dans le sens antihoraire, noter la profondeur avec votre main et remonter la tarière afin d'analyser les sédiments qui sont retenus dans la cuillère de la tarière. Mesurer la distance entre la main et le bout de la cuillère (**Figure 10**).
- Le contenu de la cuillère peut être conservé dans un sac de plastique identifié et ramené au laboratoire en vue d'une analyse granulométrique.
- Répéter les étapes précédentes jusqu'à une profondeur de 1,50 m ou un arrêt au roc/bloc.

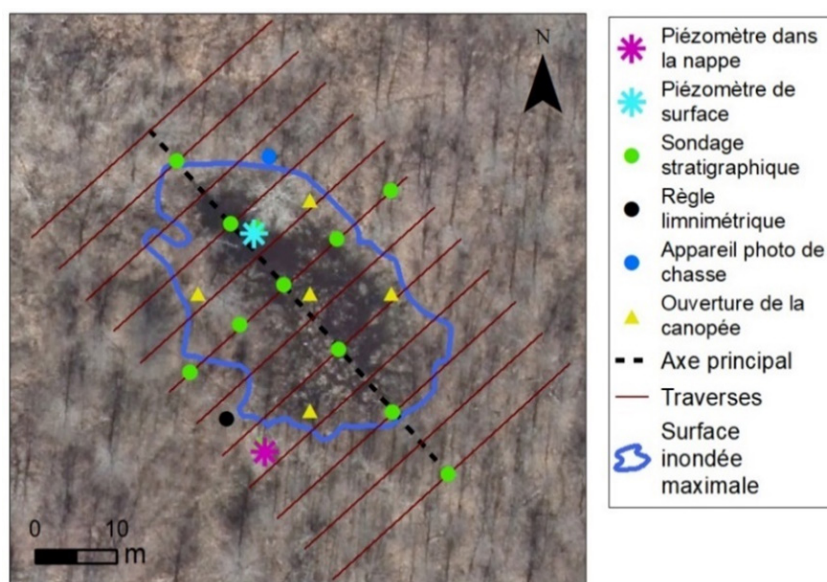


Figure 9. Exemple de positionnement des instruments, des sondages stratigraphiques et des mesures d'ouverture de la canopée dans l'étang et autour de l'étang

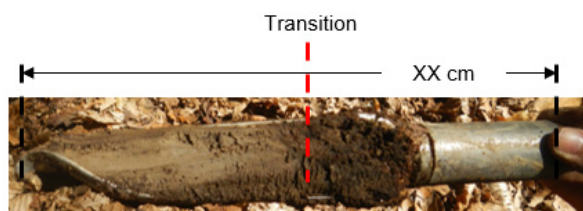


Figure 10. Exemple de matériaux récupérés lors d'un sondage stratigraphique manuel

2.3 OUVERTURE DE LA CANOPÉE ³

La mesure de l'ouverture de la canopée permet d'évaluer si la présence d'arbres a une influence sur l'hydrologie du site. Les arbres font de l'ombre (réduisent l'évapotranspiration de la surface de l'étang) et pompent de l'eau dans le sol et la nappe (rabaissent les niveaux de nappe).

³ L'ouverture de la canopée est mesurée en été lors de la feuillaison complète et est répétée deux ans plus tard durant la même période.

2.3.1 MATÉRIEL NÉCESSAIRE

- Densiomètre sphérique concave
- GPS ou boussole
- Ruban de balisage

2.3.2 SUR LE TERRAIN

- Localiser cinq points où les mesures sont réalisées à l'intérieur de la surface maximale de l'étang. Le premier est au centre et les quatre autres sont positionnés en fonction des points cardinaux en marchant du centre jusqu'à une distance de 2 m de la limite de l'étang (**Figure 9**).
- À chaque point de mesure, il faut prendre quatre lectures de l'ouverture de la canopée en faisant face à chacun des points cardinaux, en suivant les instructions du guide d'utilisation du densiomètre sphérique. Le densiomètre sphérique doit rester au niveau tout au long de la mesure.

2.4 ÉPAISSEUR ET DENSITÉ DE LA NEIGE ⁴

La mesure de l'épaisseur et de la densité de la neige à la fin de l'hiver permet de déterminer le volume d'eau qui deviendra disponible pour le ruissellement et l'infiltration au moment de la fonte.

2.4.1 MATÉRIEL NÉCESSAIRE

- Tube plein ABS de 5 cm de diamètre
- Deux capuchons pour tube shelby de 5 cm par échantillonnage
- Balance avec une précision de 0,01 kg
- Chiffons secs
- Pelle à neige
- Large spatule ou étroite planche en plastique mince.
- Sac de plastique 4 L
- GPS
- Scie ou lime en triangle
- Appareil photo

2.4.2 PRÉPARATION EN LABORATOIRE

- Couper différentes longueurs de tuyau selon les conditions d'enneigement de la région d'étude. La longueur doit être suffisamment longue pour carotter la hauteur de neige complète. S'assurer que le bout du tuyau est coupé carré et non en angle.
- Limer une extrémité du tube en formant des dents (**Figure 11**) ou seulement limer.
- Identifier et peser les sacs.



Figure 11. Extrémité du tube d'échantillonnage de la neige

⁴ La mesure doit être faite au mois de mars, avant le début de la fonte du printemps.

2.4.3 SUR LE TERRAIN

- Noter la mesure de l'épaisseur de la neige à la règle limnimétrique (m). Ne pas perturber le couvert nival.
- Identifier un endroit plat avec peu de couverture forestière et creuser avec la pelle pour faire une coupe verticale.
- Mesurer l'épaisseur de la neige avec le ruban à mesurer et prendre une photo.
- Insérer le tube dans la neige près de la coupe (**Figure 12**).
- Mesurer la différence entre le sommet du tube et la neige à l'intérieur du tube.
- Ajouter un capuchon au sommet du tube et glisser la spatule à la base du tube. Sortir doucement le tube en le glissant horizontalement. Verser la neige dans le sac en plastique en poussant avec un outil si nécessaire. Éviter d'incorporer des débris.
- Noter la hauteur de neige à cet endroit et le sac utilisé.
- Prendre les coordonnées GPS.
- Si un deuxième échantillon est prélevé, assécher avec un chiffon sec l'intérieur du tube.
- Au laboratoire, peser les sacs pleins, soustraire le poids du sac et calculer le poids de la neige échantillonnée (kg).
- Calculer le volume de la neige échantillonnée dans le tube (m^3) et calculer la densité de la neige échantillonnée (kg/m^3) en divisant le poids de l'échantillon par son volume.
- Calculer la hauteur d'eau disponible pour la fonte sur le site (m) en multipliant l'épaisseur de neige mesurée à l'échelle limnimétrique par la densité de la neige.



Figure 12. Mesure de l'épaisseur de la neige

3. SUIVI

Les visites de terrain ont lieu au printemps et à l'automne dans le but de télécharger les données, de vérifier l'état du matériel et de s'assurer que l'enregistrement de la donnée a été correctement réalisé.

3.1 MATÉRIEL NÉCESSAIRE

- *Sonde de pression permettant d'enregistrer une pression d'eau correspondant à une colonne d'eau maximale de 4 m avec une précision de 0,01 m.*
- *Sonde piézométrique manuelle*
- *Ordinateur portable et câble connecteur*
- *GPS*
- *Niveau*
- *Valve à clapet de diamètre extérieur de 2,5 cm munie d'un tuyau rigide*

3.2 SUR LE TERRAIN

- Lors de la première visite, faire le tour de l'étang et le décrire en détaillant les dimensions de l'étang, sa forme, la présence d'un trop-plein, l'apport en eau de surface, la présence de drains ou d'autres modifications et la végétation dans la zone inondée et à son pourtour.
- Mesurer le niveau d'eau à l'aide d'une sonde piézométrique manuelle.
- Sortir la sonde et télécharger les données. Vérifier que la mémoire de la sonde n'est pas pleine et vérifier que la batterie de la sonde est encore chargée.
- Suivre les mêmes étapes lors du téléchargement de la sonde enregistrant la pression atmosphérique.
- Pour fin de validation, mesurer la longueur entre le bouchon et le capteur de la sonde, la hauteur du tube hors-sol et la profondeur de l'eau dans le tube.
- Vérifier l'état général du piézomètre. Si une accumulation trop grande de sédiments est présente au fond du piézomètre, nettoyer avec le tube muni d'une valve à clapet.
- Télécharger les photos de l'appareil photo de chasse et vider la carte-mémoire. Vérifier l'angle de l'appareil photo et la qualité des photos.

REMERCIEMENTS

Ce protocole a été développé avec le soutien financier du Ministère de l'Environnement, de la Lutte aux changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP), du CRSNG (CRDPJ 506241) et de l'organisme *Sustainable Forest Initiative*. Les auteures remercient également Kenauk Nature, Conservation de la nature Canada ainsi que les municipalités et les propriétaires privés de la Montérégie qui ont permis d'accéder aux étangs temporaires pour les étudier.

RÉFÉRENCES

CocoRaHS (Community collaboratives rain, hail & snow network) (2021). *Méthodes alternatives pour mesurer le contenu en eau de la neige pour CoCoRaHS*. Page web consultée en février 2021. www.cocorahs.org

Larocque, M., Roux, M. (2023). *Dynamique hydrique des habitats de reproduction de la rainette faux-grillon de l'Ouest – Rapport annuel 2023-02-28*. Rapport déposé au ministère de la Forêt, de la Faune et des Parcs. Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec. 51 p.

Roux, M., Larocque, M., Nolet, P., Bizhanimanzar, M. (2023). Geomorphological and meteorological drivers of ephemeral pond hydrology in the Canadian Shield forest. *Hydrological Processes*. DOI: [10.1002/hyp.15009](https://doi.org/10.1002/hyp.15009)

TRCA (Toronto and Region Conservation Authority) (2016). Wetland water balance Monitoring protocol. Page web consultée en janvier 2024. <https://trcaca.s3.ca-central-1.amazonaws.com/app/uploads/2016/08/17180016/TRCA-Wetland-Water-Balance-Monitoring-Protocol.pdf>

ANNEXE 1. FICHE DESCRIPTIVE

Date	Année-mois-jour	Nom du site	Heure d'arrivée								
Nom et prénom des opérateurs	Prénom, nom UQAM/MFFP/autres										
Conditions météorologiques	Ensoleillé/Nuageux, Pluie/Neige, Sol humide/Neige au sol/Sol sec										
Végétation	Décrire la végétation dans la zone inondée et à son pourtour. Arbres dans l'étang? Couvert forestier couvre tout l'étang? Plante envahissante (p. ex. Phragmite)?										
Description du site	Détailier les dimensions de l'étang, sa forme, la présence d'un trop-plein, l'apport en eau de surface, la présence de drains ou de d'autres modifications.										
But de la visite	Instrumentation/téléchargement des données/sondages stratigraphiques/bathymétrie										
Préciser en m ou cm	Bouchon-captur (1)	Margelle ou tubage surface (3)	Niveau eau (4)	Hauteur eau sédi. (6)	Numéro de série	Télécharge ment	Vérif. données	État batterie	Synchro. sonde	Nettoyage piézo.	Modif. Instrum.
Piezomètre nappe SITE-P							O/N	O/N	O/N	O/N	O/N
Piezomètre surface SITE-E							O/N	O/N	O/N	O/N	O/N
Baromètre							O/N	O/N	O/N		O/N
Appareil photo chasse	Télécharge ment	Vider mémoire	État batterie	Vérif. réglages	Heure départ	Modif. réglages	Réglages base			date:AAAA/MM/JJ, laps:8h, 24MP, rafale:3, sensibilité PIR:OFF, recycler stockage:OFF	
Bris de matériel											
Modification prochaine visite	Ce qui doit être modifié/ajouté/remplacé lors de la prochaine visite.										
	Modif. Instrum. + Comment.										
	Modifié durant la visite : changement de sonde/tubage. Le propriétaire préfère que l'équipe le contacte avant la visite.										