



**Identification des sites de prélèvement d'eau souterraine en situation
de filtration sur berge et exploration d'indicateurs de leur
vulnérabilité face aux changements climatiques par un suivi temporel
géochimique et isotopique**

Rapport de projet

Dernière révision : Juin 2022

Québec 

**POLYTECHNIQUE
MONTRÉAL**

LE GÉNIE
EN PREMIÈRE CLASSE



Titre du projet : Identification des sites de prélèvement d'eau souterraine en situation de filtration sur berge et exploration d'indicateurs de leur vulnérabilité face aux changements climatiques par un suivi temporel géochimique et isotopique

Dernière révision : Juin 2022

Financement : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatique (MELCC)

Équipe de réalisation :

Paul Baudron, Département des génies civil, géologique et des mines (Polytechnique Montréal)

Laurence Labelle, Département des génies civil, géologique et des mines (Polytechnique Montréal)

Janie Masse-Dufresne, Département de génie de la construction (École de technologie supérieure)

Remerciements

Les auteurs et autrices tiennent à remercier le Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatique (MELCC) pour le financement accordé à ce projet.

Merci à nos collaborateurs de la Direction de l'eau potable et des eaux souterraines du MELCC pour vos commentaires pertinents et votre générosité tout au long du projet: Marie-Catherine Talbot-Poulin, Donald Ellis, Martin Stapinsky, Mélanie Pettigrew, Asma Chemingui ainsi que l'ensemble de l'équipe.

Merci aux intervenants des 18 municipalités d'avoir accepté de participer au projet et de nous avoir ouvert la porte de vos installations de production d'eau potable.

Merci aux intervenants de l'organisme de bassin versant de la rivière du Nord (ABRINORD) et de l'organisme de concertation pour l'eau du bassin versant de la rivière Nicolet (COPERNIC) pour votre contribution importante à l'échantillonnage des rivières.

Finalement, nous tenons à souligner la contribution du professeur Florent Barbecot et de la chercheuse postdoctorale Karine Lefebvre du Département de la Terre et de l'atmosphère de l'Université du Québec à Montréal (UQAM) pour la relecture du rapport.

Liste des abréviations

CE	Conductivité électrique
DML	Droite météoritique locale
FSB	Filtration sur berge
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MFFP	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec
MNT	Modèle numérique de terrain
PACES	Programme d'acquisition des connaissances sur les eaux souterraines
RPEP	Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection
RQEP	Règlement sur la qualité de l'eau potable
SIG	Système d'information géographique
SIH	Système d'information hydrogéologique

Table des matières

1.	Introduction	1
1.1	La filtration sur berge	1
1.2	Cadre règlementaire des prélèvements d'eau potable	3
1.2.1	Mise en œuvre de la barrière 1	4
1.2.2	Mise en œuvre de la barrière 2	6
1.3	Potentiel des outils géochimiques et isotopiques	6
1.3.1	Les isotopes stables de l'eau.....	8
1.3.2	La conductivité électrique de l'eau.....	9
1.4	Objectifs et étapes de travail	10
2	Méthodologie.....	12
2.1	Acquisition des données	12
2.1.1	Sélection des installations de prélèvements municipaux.....	12
2.1.2	Échantillonnage aux prélèvements municipaux d'eau souterraine	13
2.1.3	Acquisition de données isotopiques sur les précipitations	14
2.1.4	Échantillonnage des eaux de surface.....	14
2.1.5	Transport et conservation	14
2.1.6	Analyse en laboratoire	15
2.2	Caractérisation hydrogéologique sommaire.....	16
3	Résultats.....	17
3.1	Représentation graphique	17
3.2	Eaux de surface	19
3.3	Sites de prélèvement municipaux.....	21

3.3.1	Bassin versant de la rivière du Nord	21
3.3.2	Bassin versant de la rivière Rouge	75
3.3.3	Bassin versant de la rivière des Mille-Îles	91
3.3.4	Bassin versant de la rivière Nicolet	98
4	Discussion.....	134
4.1	Identification géochimique et isotopique des puits en situation de FSB	134
4.1.1	Modèle conceptuel 1 : FSB permanente	134
4.1.2	Modèle conceptuel 2 : FSB saisonnière	135
4.1.3	Modèle conceptuel 3 : Non-FSB	139
4.2	Grille de lecture simplifiée	141
4.2.1	Présentation.....	141
4.2.2	Conditions d'application	142
4.3	Sensibilité des sites de FSB aux changements climatiques.....	143
4.3.1	Critères complémentaires pour l'identification préliminaire des prélèvements FSB 143	
4.3.2	Vulnérabilité des sites de prélèvement en situation de FSB	145
4.3.3	Implications pour la protection des sources d'eau potable en situation de FSB .	146
5	Conclusion et recommandations	148
6	Références	152
7	Annexe I: Échantillons prélevés	155
8	Annexe II: Protocole d'échantillonnage.....	157
9	Annexe III: Caractéristiques des installations de prélèvement – Modèle conceptuel 3	158
10	Annexe IV: Caractéristiques des installations de prélèvement – Sites non retenus	162

Liste des figures

Figure 1-1 Représentation schématique de la FSB	1
Figure 1-2 Distributions de sites de FSB dans le monde, à partir des données de Stefán & Ansems (2018)	3
Figure 1-3 : Illustration schématique de l'évolution temporelle de la signature isotopique ($\delta^2\text{H}$) et de la conductivité électrique (CE) attendue pour une rivière ou un lac (bleu), un prélèvement de FSB (vert) et un puits d'eau souterraine (orange). Le Δt (déphasage des signaux) est lié au temps de résidence de l'eau de surface dans la berge.....	8
Figure 2-1 : Localisation des installations de captage et des rivières. Modifié de (Patenaude et al., 2020)	13
Figure 3-1: Modèles de représentation des données, illustrant : a) écarts-types observés pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique	18
Figure 3-2: Résultats pour les quatre eaux de surface (Rivière Nicolet, rivière du Nord, La Belle Rivière, Rivière Mascouche) représentant a) écarts-types observés pour $\delta^2\text{H}$ et CE; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique	20
Figure 3-3 Localisation du site de prélèvement RDN_P01 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle.....	22
Figure 3-4 Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement de RDN_P01 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique	24
Figure 3-5 Localisation du site de prélèvement RDN_P02 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle.....	25
Figure 3-6 Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P02 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique.....	27
Figure 3-7 Localisation des sites de prélèvement RDN_P03 et RDN_P04 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle	29
Figure 3-8 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P03 a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique.....	31
Figure 3-9 Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P04 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique.....	33
Figure 3-10 Localisation des sites de prélèvement RDN_P05 à RDN_P09 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle	34

Figure 3-11 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P05 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta 2H$ et EC; b) diagramme binaire $\delta 2H$ vs $\delta 18O$; c) évolution temporelle de $\delta 2H$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique 36

Figure 3-12 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P06 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta 2H$ et EC; b) diagramme binaire $\delta 2H$ vs $\delta 18O$; c) évolution temporelle de $\delta 2H$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique 38

Figure 3-13 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P07 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta 2H$ et EC; b) diagramme binaire $\delta 2H$ vs $\delta 18O$; c) évolution temporelle de $\delta 2H$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique 40

Figure 3-14 Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P08 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta 2H$ et EC; b) diagramme binaire $\delta 2H$ vs $\delta 18O$; c) évolution temporelle de $\delta 2H$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique 42

Figure 3-15 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P09 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta 2H$ et EC; b) diagramme binaire $\delta 2H$ vs $\delta 18O$; c) évolution temporelle de $\delta 2H$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique 44

Figure 3-16 Localisation des sites de prélèvement RDN_P10 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle..... 45

Figure 3-17 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P10 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta 2H$ et EC; b) diagramme binaire $\delta 2H$ vs $\delta 18O$; c) évolution temporelle de $\delta 2H$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique 47

Figure 3-18 Localisation des sites de prélèvement RDN_P11 à RDN_P13 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle 48

Figure 3-19 Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P11 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta 2H$ et EC; b) diagramme binaire $\delta 2H$ vs $\delta 18O$; c) évolution temporelle de $\delta 2H$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique 50

Figure 3-20 Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P12 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta 2H$ et EC; b) diagramme binaire $\delta 2H$ vs $\delta 18O$; c) évolution temporelle de $\delta 2H$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique 52

Figure 3-21 Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P13 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta 2H$ et EC; b) diagramme binaire $\delta 2H$ vs $\delta 18O$; c) évolution temporelle de $\delta 2H$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique 54

Figure 3-22 Localisation des sites de prélèvement RDN_P14 et RDN_P15 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle	56
Figure 3-23 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P14 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique	58
Figure 3-24 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P15 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique	60
Figure 3-25 Localisation du site de prélèvement RDN_P16 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle.....	61
Figure 3-26 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P16 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique	63
Figure 3-27 Localisation des sites de prélèvement RDN_P17 et RDN_P18 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle	65
Figure 3-28 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P17 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique	67
Figure 3-29 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P18 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique	69
Figure 3-30 Localisation des sites de prélèvement RDN_P19 et RDN_P20 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle	70
Figure 3-31 Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P19 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique	72
Figure 3-32 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P20 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique	74

Figure 3-33 Localisation des sites de prélèvement ROU_P01 et ROU_P02 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle	76
Figure 3-34 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement ROU_P01 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique	78
Figure 3-35 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement ROU_P02 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique	80
Figure 3-36 Localisation des sites de prélèvement ROU_P03 et ROU_P04 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle	81
Figure 3-37 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement ROU_P03 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique	83
Figure 3-38 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement ROU_P04: a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique	85
Figure 3-39 Localisation des sites de prélèvement ROU_P05 et ROU_P06 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle	86
Figure 3-40 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement ROU_P05 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique	88
Figure 3-41 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement ROU_P06 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique	90
Figure 3-42 Localisation du site de prélèvement MIL_P01 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle.....	92
Figure 3-43 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement MIL_P01 a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique.....	94

Figure 3-44 Localisation du site de prélèvement MIL_P02 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle.....	95
Figure 3-45 Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement MIL_P02 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique	97
Figure 3-46 Localisation du site de prélèvement NIC_P01 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle.....	99
Figure 3-47 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement NIC_P01 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique	101
Figure 3-48 Localisation des sites de prélèvement NIC_P02 à NIC_P04 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle	103
Figure 3-49 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement NIC_P02: a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique	105
Figure 3-50 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement NIC_P03: a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique	107
Figure 3-51 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement NIC_P04: a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique	109
Figure 3-52 Localisation des sites de prélèvement NIC_P05 à NIC_P06 et coupe hydrostratigraphique	110
Figure 3-53 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement NIC_P05 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique	112
Figure 3-54 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement NIC_P06: a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique	114
Figure 3-55 Localisation du site de prélèvement NIC_P07 et coupe hydrostratigraphique	115

Figure 3-56 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement NIC_P07: a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta 2H$ et EC; b) diagramme binaire $\delta 2H$ vs $\delta 18O$; c) évolution temporelle de $\delta 2H$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique	117
Figure 3-57 Localisation du site de prélèvement NIC_P08 et coupe hydrostratigraphique	119
Figure 3-58: Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement NIC_P08 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta 2H$ et EC; b) diagramme binaire $\delta 2H$ vs $\delta 18O$; c) évolution temporelle de $\delta 2H$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique	121
Figure 3-59 Localisation du site de prélèvement NIC_P09 et coupe hydrostratigraphique	122
Figure 3-60 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement NIC_P09 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta 2H$ et EC; b) diagramme binaire $\delta 2H$ vs $\delta 18O$; c) évolution temporelle de $\delta 2H$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique	124
Figure 3-61 Localisation des sites de prélèvement NIC_P10 à NIC_P11 et coupe hydrostratigraphique	126
Figure 3-62 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement NIC_P10 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta 2H$ et EC; b) diagramme binaire $\delta 2H$ vs $\delta 18O$; c) évolution temporelle de $\delta 2H$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique	128
Figure 3-63 Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement NIC_P11: a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta 2H$ et EC; b) diagramme binaire $\delta 2H$ vs $\delta 18O$; c) évolution temporelle de $\delta 2H$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique.....	130
Figure 3-64 Localisation du site de prélèvement NIC_P12 et coupe hydrostratigraphique	131
Figure 3-65 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement NIC_P12 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta 2H$ et EC; b) diagramme binaire $\delta 2H$ vs $\delta 18O$; c) évolution temporelle de $\delta 2H$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique	133
Figure 4-1 Schéma conceptuel; Modèle 1: FSB permanente	134
Figure 4-2 Schéma conceptuel; Modèle 2: FSB saisonnière-Impact de l'augmentation du niveau d'eau de l'eau de surface dans un aquifère granulaire libre	136
Figure 4-3 Schéma conceptuel; Modèle 2: FSB saisonnière-Impact de l'augmentation du niveau d'eau de l'eau de surface dans un aquifère granulaire captif	137

Figure 4-4 Schéma conceptuel; Modèle 2: FSB saisonnière-Impact de l'augmentation du débit de pompage sur les écoulements souterrains.....	138
Figure 4-5 Corrélation entre la variation de la CE et le débit de pompage à l'installation de prélèvement RDN_P01	140
Figure 4-6: Évolution temporelle des traceurs des puits RDN_P11, RDN_P12 et RDN_P13, tous situés à proximité (voir Figure 3-18).....	140
Figure 4-7 : Relation entre les écarts-types sur les séries temporelles de $\delta^2\text{H}$ et CE aux sites de prélèvement.....	142
Figure 4-8 : Conditions d'application de la grille de lecture simplifiée	143
Figure 4-9 : Distribution des puits correspondant aux différents modèles conceptuels en fonction de leur profondeur et de leur distance à l'eau de surface	144
Figure 4-10 Historiques de contamination aux installations NIC_P12 (FSB continue) et RDN_P03 (FSB saisonnière). Les lignes rouges correspondent aux épisodes de contamination à la bactérie E.Coli.	145
Figure 4-11 Méthode graphique d'estimation des temps de transport de l'eau dans les berges pour les prélèvements RDN_P15, NIC_P10, NIC_P11 et NIC_P12	146

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Calendrier de réalisation du projet.....	11
Tableau 4-1 Caractéristiques des installations de prélèvement du modèle conceptuel 1 : FSB permanente	135
Tableau 4-2 Caractéristiques des installations de prélèvement du modèle conceptuel 2 : FSB saisonnière	139
Tableau 7-1 Périodes d'échantillonnage, pas de temps et nombre d'échantillons des sites étudiés	155
Tableau 7-2: Eaux de surface échantillonnées	156

1. Introduction

1.1 La filtration sur berge

Historiquement, au Québec, les eaux souterraines et les eaux de surface sont encadrées et gérées de façon distincte, malgré l'interconnexion de ces ressources. Pour permettre l'alimentation en eau potable, l'eau de surface brute nécessite des traitements relativement coûteux, en plus de devoir faire face aux variations de qualité observées saisonnièrement ou à la suite de contaminations ponctuelles. L'eau souterraine, quant à elle, bénéficie d'une relative protection naturelle face aux contaminants, mais les débits exploitables sont souvent plus limités. La filtration sur berge (FSB) cumule les avantages des prélèvements d'eau de surface et souterraine pour la production d'eau potable. Elle consiste à aménager des installations de prélèvements d'eau souterraine à proximité immédiate de plans d'eau (lac ou réservoir) ou de cours d'eau (rivière) et dans des formations géologiques perméables. L'eau captée est alors un mélange entre l'eau de surface récemment infiltrée et l'eau souterraine. En mettant à profit la capacité naturelle des sédiments à atténuer les contaminants dans les eaux de surface, complétée par une dilution par les eaux souterraines, la FSB permet de réduire les besoins en traitement de potabilisation par rapport à un prélèvement direct en eau de surface, tout en maximisant les quantités d'eau exploitables.

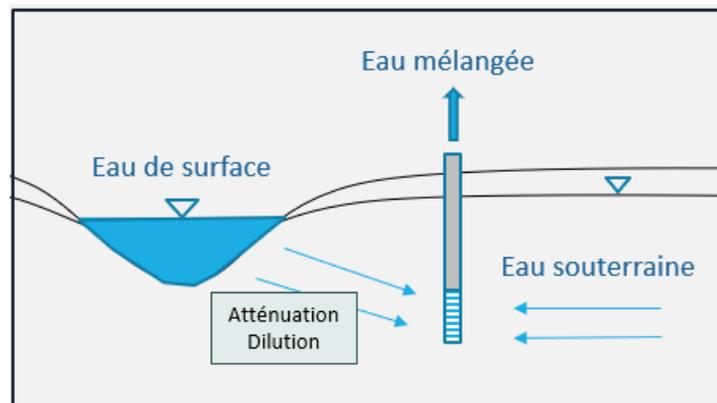


Figure 1-1 Représentation schématique de la FSB

L'utilisation de la FSB a été décrite pour la première fois en 1810 à Glasgow, au Royaume-Uni. Dans le contexte de la révolution industrielle, et pour faire face à la détérioration de la qualité des eaux de surface ainsi qu'à la demande croissante en eau, cette technique a rapidement gagné en popularité en Europe. À ce jour, la FSB est largement utilisée dans certains pays européens, comme en Slovaquie et en Hongrie où respectivement 55% et 50% de l'approvisionnement total en eau repose sur la FSB (Eckert & Irmischer, 2006; Sprenger et al., 2017). Aux États-Unis, la FSB

comme système d'approvisionnement en eau potable est utilisée depuis environ 70 ans, dans plus d'une vingtaine de sites (Ray et al., 2002).

À travers le monde, de nouveaux systèmes de FSB sont implantés comme alternative économiquement avantageuse à des infrastructures de potabilisation d'eau de surface vieillissantes et coûteuses. Pour autant, il est difficile d'anticiper la capacité des systèmes de FSB à maintenir une qualité d'eau potable adéquate face à l'évolution des contraintes anthropiques et climatiques. Les variations saisonnières de niveau dans les eaux de surface, ainsi que celles des conditions d'exploitation des installations de captage, induisent des écoulements en régime transitoire qui jouent un rôle majeur dans le transport réactif des contaminants. À ces contraintes hydrodynamiques s'ajoutent des variations de température, de composition chimique ou de charge de contaminants dans l'eau de surface, qui soutiennent des processus biogéochimiques complexes. C'est particulièrement le cas dans les conditions météorologiques et hydrologiques contrastées du Canada, où à l'interruption de la recharge en hiver s'ajoutent des crues printanières marquées (Masse-Dufresne et al., 2019; Masse-Dufresne et al., 2021). Pour assurer le maintien de production d'une eau potable de grande qualité, il est indispensable d'identifier les installations de prélèvement qui sont en situation de FSB et d'établir des éléments de caractérisation de la vulnérabilité spécifique à ces prélèvements hybrides.

Il existe depuis 2018 un inventaire collaboratif des sites de FSB à l'échelle mondiale, basé sur des ajouts volontaires par des scientifiques ou gestionnaires de sites. Non exhaustif, il présente cependant l'avantage de couvrir plusieurs contextes hydrogéologiques différents (Stefán & Ansems, 2018). La Figure 1-2 présente la distribution des distances séparant les puits de FSB recensés et l'eau de surface la plus proche. Un seuil à 500 mètres, incluant près de 90% de l'ensemble des sites, apparaît comme une première approximation acceptable pour localiser les captages d'eau souterraine ayant le plus fort potentiel de FSB parmi des bases de données plus larges.

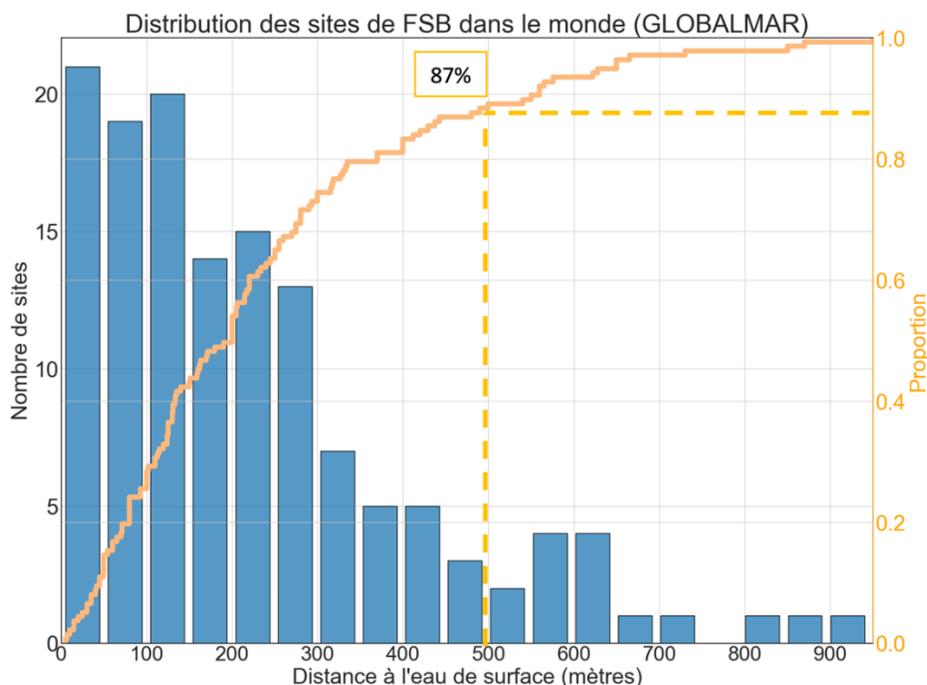


Figure 1-2 Distributions de sites de FSB dans le monde, à partir des données de Stefán & Ansems (2018)

Au Canada, aucun site n'est inclus dans cet inventaire, malgré le fait que des sites de FSB soient présents sur le territoire (Masse-Dufresne et al., 2019). Dans le cadre de travaux préliminaires antérieurs au présent mandat, un travail d'identification des sites potentiellement en situation de FSB au Québec a été réalisé (Patenaude et al., 2020). En combinant les coordonnées géographiques des sites de prélèvements municipaux avec la localisation des rivières et lacs du Québec, il a été possible de déterminer la distance la plus courte entre chaque puits de pompage municipal et les eaux de surface. Ces travaux ont révélé que 74% de la population québécoise alimentée en eau potable par de l'eau souterraine obtient cette ressource de puits situés à moins de 500 mètres d'une eau de surface. C'est d'autant plus le cas pour les puits situés à moins de 100 mètres, qui alimentent 33% de la population québécoise dépendante d'installations de production d'eaux souterraines (Patenaude et al., 2020). Ces sites d'approvisionnement en eau potable sont donc potentiellement en situation de FSB, sans que les opérateurs aient forcément conscience des enjeux particuliers en termes de vulnérabilité ni des bénéfices dus aux processus naturels d'atténuation des contaminants. Ce premier inventaire, bien que basé uniquement sur un critère spatial, permet de réaliser l'importance potentielle de la FSB pour la société québécoise.

1.2 Cadre réglementaire des prélèvements d'eau potable

Au Québec, l'approche à barrières multiples est utilisée pour identifier les menaces et assurer la qualité de l'eau du réseau d'approvisionnement, de la source au robinet (CCME, 2004). La

première barrière, soit la protection des sources d'eau, est encadrée par le *Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection* (RPEP). Elle est mise en place grâce à l'analyse de vulnérabilité de la source et l'élaboration du plan de protection. La deuxième barrière, le traitement de l'eau, encadré par le *Règlement sur la qualité de l'eau potable* (RQEP), permet de s'assurer que les traitements effectués sur l'eau brute à l'usine de production soient adaptés pour faire face à la variabilité de la qualité associée à l'origine de l'eau pompée. La troisième barrière est centrée sur le réseau de distribution de l'eau et ne sera pas abordée dans ce rapport. Si une de ces barrières fait défaut, les deux autres permettront malgré tout d'assurer la qualité de l'eau potable.

1.2.1 Mise en œuvre de la barrière 1

Dans le RPEP, la protection des sources d'eau potable est assurée en encadrant l'aménagement des installations de prélèvement d'eau ainsi que certaines activités susceptibles de porter atteinte à la qualité de l'eau. Plus précisément, le règlement vise à prescrire des normes pour l'aménagement des installations de prélèvement d'eau et à délimiter leurs aires de protection. Trois catégories de prélèvement (applicables à la fois aux eaux souterraines et aux eaux de surface) sont définies (art. 51 RPEP):

- Catégorie 1 :
 - o Système d'aqueduc d'une municipalité alimentant plus de 500 personnes et au moins une résidence
- Catégorie 2 :
 - o Système d'aqueduc d'une municipalité alimentant de 21 à 500 personnes
 - o Autre système d'aqueduc alimentant 21 personnes et plus et au moins
 - Une résidence
 - Un établissement d'enseignement, de détention ou de santé/services sociaux
- Catégorie 3 :
 - o Établissement à des fins de transformation alimentaire
 - o Entreprises ou établissement touristique (saisonnier ou non)
 - o Tout autre système desservant 20 personnes et moins (incluant les résidences isolées).

Le *Guide de détermination des aires de protection des prélèvements d'eau souterraine et des indices de vulnérabilité DRASTIC* (MELCC, 2019) et le *Guide de réalisation des analyses de vulnérabilité des sources destinées à l'alimentation en eau potable au Québec* (MELCC, 2018), sont des outils de mise en œuvre du RPEP, dans lequel les deux types de sources d'eau sont traités séparément (eaux souterraines: articles 53 à 68; eaux de surface : articles 69 à 75).

Aires de protection

Quatre aires de protections sont définies autour d'un prélèvement d'eau souterraine, soit l'aire de protection immédiate, l'aire de protection intermédiaire bactériologique, l'aire de protection intermédiaire virologique et l'aire de protection éloignée. Les aires de protection immédiates sont délimitées selon un cercle autour du puits, dont le rayon dépend de la catégorie de prélèvement. Les limites des aires de protection intermédiaires (virologiques et bactériologiques), sont définies selon la catégorie de prélèvement, soit par le temps de migration de l'eau souterraine (catégorie 1), soit par une distance donnée par rapport au puits (catégories 2 et 3). La limite des aires de protection éloignées consiste en l'ensemble de l'aire d'alimentation du puits pour les puits de catégorie 1 et à 2km en amont hydraulique pour les puits de catégorie 2. La détermination de l'aire de protection éloignée n'est pas requise pour les puits de catégorie 3.

Dans le cas des eaux de surface, les aires de protection sont délimitées uniquement pour les prélèvements de catégorie 1 et 2 et dépendent du milieu où est situé le prélèvement (lac, cours d'eau, fleuve avec inversion de courant et fleuve sans inversion de courant). Les aires de protection immédiate et intermédiaire comprennent la surface des cours d'eau et des plans d'eau se trouvant à une distance donnée (ou différente en amont et en aval) de la prise d'eau et incluent une bande de terre à partir de la ligne des hautes eaux. L'aire de protection éloignée, délimitée uniquement pour les prélèvements de catégorie 1, correspond au bassin versant en amont du site de prélèvement, incluant la partie aval de l'aire intermédiaire.

Vulnérabilité

Pour les prélèvements d'eau souterraine de catégorie 1, la vulnérabilité intrinsèque est quantifiée par la méthode DRASTIC basée sur des paramètres géologiques et hydrogéologiques, qui permet d'évaluer la sensibilité naturelle de la ressource à la contamination. Des niveaux de vulnérabilité pour chacune des aires sont déterminés à partir des cotes DRASTIC.

Pour les prélèvements d'eau de surface de catégorie 1, le niveau de vulnérabilité (faible, moyen, élevé) est basé sur six indicateurs et repose sur des données historiques de qualité de l'eau, sur des registres d'événements, sur l'occupation du territoire ou sur le jugement d'un professionnel.

Pour tous ces prélèvements de catégorie 1, il y a une obligation supplémentaire pour le responsable du prélèvement : produire un rapport d'analyse de vulnérabilité qui met en lumière les faiblesses, les problèmes et les menaces qui affectent la source d'alimentation en eau potable dont il a la responsabilité.

Prélèvements hybrides

Les prélèvements hybrides de filtration sur berge prélèvent un mélange d'eau de surface récemment infiltrée dans la berge et d'eau souterraine provenant de l'aquifère en amont. À ce jour, en vertu du RPEP, ces prélèvements sont considérés comme des prélèvements d'eau souterraine uniquement. La détermination des aires de protection et de la vulnérabilité doit suivre le protocole applicable à l'eau souterraine et ne considère pas le caractère hybride de ces prélèvements. La barrière 1 pourrait donc ne pas être adéquate si utilisée seule. Heureusement, la seconde barrière de protection tient compte de cette particularité.

1.2.2 Mise en œuvre de la barrière 2

Le RQEP établit des objectifs de traitements à l'eau brute applicables à toute installation de production d'eau destinée à la consommation. Ce règlement prescrit, entre autres, que la désinfection et la filtration de l'eau soient nécessaires si elle provient d'une eau de surface, d'une eau souterraine qui démontre une contamination, ou d'une eau souterraine sous influence directe d'une eau de surface (ESSIDES). Dans ce dernier cas, la définition du terme « eau de surface » n'est pas dédiée aux lacs et rivières, qu'elle n'englobe pas nécessairement, mais réfère à toute eau apportant une contamination suite à une infiltration rapide depuis la surface... Les critères utilisés dans le protocole ESSIDES réfèrent principalement à la qualité bactériologique de l'eau brute et, dans une moindre mesure, à des facteurs morphologiques comme les contextes hydrogéologiques, la distance entre l'eau de surface et l'installation de prélèvement, l'état et la conception de l'installation. Par exemple, un puits en mauvais état permettant à l'eau de pluie de s'infiltrer directement le long du tubage ou un captage de drains très peu profonds pourraient être classés ESSIDES si l'eau s'infiltrant est contaminée par des sources de pollutions locales comme les fosses septiques, activités agricoles, rejets d'usines ou autres. Malgré que les prélèvements hybrides soient difficiles à classer en ce qui a trait à la protection de la source (RPEP et outils afférents), la caractérisation de l'eau brute captée permet d'appliquer un traitement adéquat selon la nature et la quantité des contaminants répertoriés (RQEP et outils afférents).

1.3 Potentiel des outils géochimiques et isotopiques

De par la complexité des écoulements souterrains aux sites de FSB, les méthodes classiques utilisées en hydrogéologie pour la détermination des aires de protection et pour l'évaluation de la vulnérabilité de ces prélèvements hybrides montrent certaines limitations. La caractérisation d'un mélange entre les eaux de surface récemment infiltrées et les eaux souterraines est généralement effectuée à partir de modèles hydrodynamiques. Du fait de simplifications, les modèles ne sont généralement pas en mesure de rendre compte de la forte variabilité spatio-temporelle des écoulements. Des travaux récents basés sur l'utilisation de traceurs géochimiques

et isotopiques (Masse-Dufresne et al., 2019, 2021a, 2021b) ont pourtant démontré comment l'effet combiné des variations des niveaux d'eau de surface et des débits de pompage cause des variations des taux de mélange entre différentes masses d'eau. Les auteurs ont démontré, sur un site de FSB au Québec, une variabilité allant de 0 à 100%, à la fois temporellement (pour un même puits de pompage) et spatialement (au sein d'un même champ captant). Cette variabilité est exacerbée par les changements climatiques en cours, entraînant des épisodes de crues et d'étiages plus sévères qui affectent les sites de FSB (Sprenger et al., 2011).

La caractérisation d'un ouvrage de captage de FSB devrait également s'appuyer sur une description de la distribution des temps de séjour des eaux de surface au sein des berges. Ce paramètre clé gouverne l'efficacité des processus naturels d'atténuation et d'élimination des contaminants de l'eau de surface durant la FSB. Le régime hautement transitoire des écoulements (différentes échelles spatio-temporelles, inversions des flux) révèle ici aussi les limites des valeurs moyennes obtenues par les calculs hydrodynamiques. Le développement d'approches simples basées sur la géochimie, complémentaires aux outils hydrodynamiques et permettant de représenter le régime transitoire d'écoulement des écoulements souterrains, renforce considérablement la connaissance de ces milieux hybrides.

Dans les dernières années, la recherche en hydrogéologie a fait d'importants progrès pour appréhender la dynamique des écoulements au sein d'aquifères complexes, notamment grâce au développement d'approches basées sur le traçage de masses d'eaux. Les traceurs environnementaux correspondent à des éléments ou composés géogéniques (naturels) ou dérivés d'activités anthropiques (artificiels) présentes dans l'environnement et dont les concentrations varient au sein du cycle de l'eau. Dans le cas des études en contexte de FSB, la signature isotopique de l'eau ($\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$) et la conductivité électrique (CE) sont utilisées pour déduire des informations tant sur l'origine et le mélange des masses d'eau (Moeck et al., 2017; Sprenger, 2016) que sur les temps de séjour (Kármán et al., 2014; Massmann et al., 2008; Vogt et al., 2010).

Les eaux de surface et les eaux souterraines sont en effet caractérisées par des signaux isotopiques et géochimiques distincts (Figure 1-3) dus à une saisonnalité marquée dans l'eau de surface, alors que le signal isotopique et géochimique de l'eau souterraine est typiquement beaucoup plus stable. Dans les puits de FSB, la propagation du signal de l'eau de surface, atténué et déphasé par les processus de mélange et de dispersion, permet d'identifier la contribution des eaux d'un lac ou d'une rivière. **Le déphasage (Δt)**, lié à la propagation du signal de l'eau de surface vers le puits de FSB, est le reflet du temps de séjour de l'eau de surface dans les berges, tandis que **l'atténuation du signal** reflète le mélange avec l'eau souterraine (puits non-FSB).

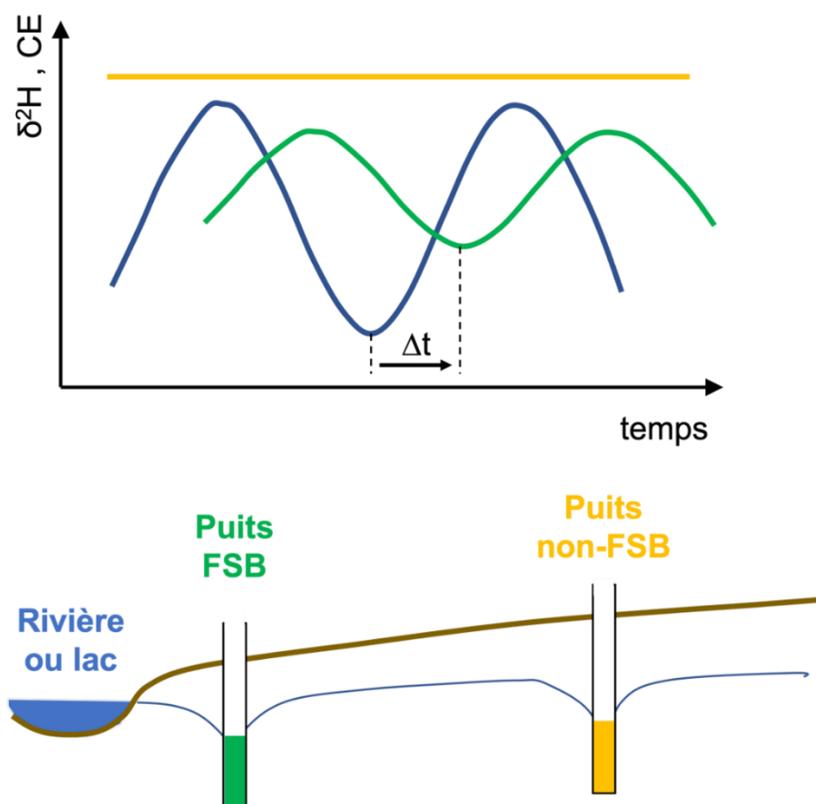


Figure 1-3 : Illustration schématique de l'évolution temporelle de la signature isotopique ($\delta^2\text{H}$) et de la conductivité électrique (CE) attendue pour une rivière ou un lac (bleu), un prélèvement de FSB (vert) et un puits d'eau souterraine (orange). Le Δt (déphasage des signaux) est lié au temps de résidence de l'eau de surface dans la berge.

1.3.1 Les isotopes stables de l'eau

L'eau est composée de deux atomes hydrogène (H) et d'un atome d'oxygène (O) et chacun de ces atomes existe en différents isotopes stables. L'isotope d'oxygène le plus abondant possède 8 protons et 8 neutrons, lui donnant une masse atomique de 16 (^{16}O). Deux isotopes plus rares de l'oxygène possèdent un ou deux neutrons additionnels (^{17}O et ^{18}O). Similairement, l'isotope d'hydrogène le plus abondant possède 1 proton et a une masse atomique de 1 (^1H), alors que le deutérium (D ou ^2H) n'existe qu'en faible proportion. Bien que les isotopes d'un même atome aient le même comportement chimique, leur différence de poids implique que la vitesse à laquelle ils participent aux réactions n'est pas la même. Par conséquent, la composition isotopique (le ratio entre isotopes rares et abondants) varie entre les différents réservoirs dans l'environnement (Clark, 2015).

La distribution des isotopologues (c.-à.-d. molécules composées de différents isotopes) de la molécule d'eau varie au fil du cycle de l'eau via les processus d'évaporation, de condensation et de précipitation. L'abondance relative des isotopes ^{18}O et ^2H peut alors être utilisée comme

traceur pour distinguer différentes masses d'eau et identifier les zones de recharge. La composition isotopique d'une eau est exprimée par la différence entre le ratio des isotopes rares et abondants d'un échantillon et d'un standard de référence, tel que :

$$\delta^{18}O_{\text{échantillon}} = \left(\frac{(^{18}O/^{16}O)_{\text{échantillon}} - (^{18}O/^{16}O)_{\text{référence}}}{(^{18}O/^{16}O)_{\text{référence}}} \right) \times 1000 \text{ ‰ VSMOW}$$

où VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) est le standard de référence et ‰ est la notation « pour mille » (1/1000). Les valeurs δ positives sont dites enrichies en ^{18}O par rapport au standard de référence, alors que les valeurs δ négatives sont dites appauvries.

La composition isotopique des précipitations est largement contrôlée par la température. En effet, le fractionnement isotopique de ^{18}O et 2H sous des températures variables mène à une cyclicité de la composition isotopique des précipitations, les précipitations d'été étant les plus enrichies et celles d'hiver les plus appauvries. Pour un secteur géographique donné, l'ensemble des données des précipitations s'aligne le long de la droite météoritique locale (DML). Cette saisonnalité du signal isotopique est généralement retrouvée dans les eaux de surface.

Parallèlement à la saisonnalité des précipitations, le processus d'évaporation affecte la composition isotopique des eaux de surface. Les molécules d'eau légères (1H , 1H , ^{16}O) vont s'évaporer préférentiellement d'une masse d'eau, menant à un appauvrissement relatif en isotopes légers dans la phase vapeur et à un enrichissement relatif en isotopes lourds dans l'eau résiduelle (phase liquide). Une eau ayant subi de l'évaporation, comme l'eau d'un lac ou une eau de surface en été, présentera un enrichissement typique de ce processus (Arnoux, Gibert-Brunet, et al., 2017; Gibson et al., 2017). Les processus qui impactent la composition isotopique d'un échantillon d'eau de surface sont contrôlés par la composition isotopique des précipitations, la recharge, la température, la fonte des neiges et le couvert de glace, ainsi que par l'impact combiné de l'évaporation et des taux de mélanges. Il est donc attendu de retrouver des variations annuelles de composition différentes selon les rivières.

1.3.2 La conductivité électrique de l'eau

La CE est une mesure de la facilité avec laquelle un courant électrique circule dans l'eau. Une eau pure est faiblement conductrice, alors qu'une eau contenant des sels dissous et autres composés inorganiques laisse plus facilement passer le courant. La conductivité électrique est alors un indicateur de la minéralisation totale ou de la salinité d'une eau. De façon générale, les eaux de surface sont peu minéralisées, avec une conductivité électrique autour de 150 $\mu S/cm$. Les eaux souterraines, plus minéralisées, sont typiquement caractérisées par une conductivité électrique $> 300 \mu S/cm$. L'eau de mer, encore plus minéralisée, présente une CE de l'ordre de 50,000 $\mu S/cm$.

La minéralisation des eaux est le résultat de l'interaction avec les roches (dissolution/altération de minéraux, échanges cationiques), de mélanges entre masses d'eau, de pollutions anthropiques (sels de déglacage des routes) et d'évaporation (concentration). La CE des rivières étant contrôlée par les différentes sources d'alimentation (débit de base via les eaux souterraines, ruissellement de surface, apports anthropiques), il est attendu qu'elle varie au cours du temps et selon le cours d'eau.

La CE peut donc servir de traceur environnemental pour identifier les interactions entre les eaux de surface et souterraines, en lien avec l'infiltration des eaux de surface. Surtout, la mesure de la CE est robuste, les échantillons ne requièrent pas de conditions particulièrement complexes de prélèvement et de conservation avant l'analyse et il est facile de mettre en place des systèmes de mesure en continu (Sheets et al., 2002).

1.4 Objectifs et étapes de travail

Le MELCC a confié à Polytechnique Montréal un mandat incluant un projet pilote dont l'objectif principal était d'établir des éléments de typologie de la vulnérabilité des sites de FSB au Québec face aux changements climatiques. L'approche développée dans le présent projet se base sur un suivi temporel de la conductivité électrique (CE) et de la composition isotopique de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) pour identifier les sites de prélèvement d'eau souterraine en situation de FSB. L'hypothèse sous-jacente est que le signal temporel isotopique et géochimique de l'eau de surface se propage avec l'infiltration de celle-ci dans l'aquifère et se retrouve au puits de pompage, bien qu'atténué et déphasé. Ainsi, il apparaît pertinent de s'intéresser à l'évolution des signaux géochimiques et isotopiques pour explorer la possibilité d'identifier les sites de prélèvements municipaux en situation de FSB.

Pour répondre au mandat, quatre objectifs spécifiques (OS) ont été identifiés :

- OS1 : Acquérir des séries temporelles simultanées de la CE et des isotopes stables de l'eau à l'eau brute de plusieurs dizaines de puits de pompage municipaux et dans les rivières adjacentes;
- OS2 : Réaliser une caractérisation hydrogéologique sommaire de chacun des sites de prélèvement à partir d'une révision des données existantes;
- OS3 : Analyser les données hebdomadaires à mensuelles obtenues durant 1 an à 1,5 an et provenant de deux régions hydrogéomorphologiques distinctes;
- OS4 : Discuter de la portée de l'approche géochimique et isotopique à grande échelle pour identifier les sites de FSB et évaluer leur vulnérabilité aux changements climatiques.

Les étapes de réalisation du projet, réalisées entre septembre 2019 et novembre 2021 (Tableau 1-1), sont détaillées dans la section *Méthodologie*.

Tableau 1-1 : Calendrier de réalisation du projet

Étapes		2019	2020				2021			
		A	H	P	E	A	H	P	E	A
1	OS1. Sélection des sites de prélèvement									
2	OS1. Échantillonnage des eaux souterraines et de surface									
3	OS1. Analyse des échantillons en laboratoire									
4	OS2. Caractérisation hydrogéomorphologique									
5	OS3. Analyse combinée des données									
6	OS4. Élaboration de critères d'identification de FSB									

2 Méthodologie

2.1 Acquisition des données

2.1.1 *Sélection des installations de prélèvements municipaux*

Pour acquérir des chroniques mensuelles à l'eau brute, des installations de prélèvements municipaux ont été identifiées comme étant des sites potentiels de filtration sur berge. Les critères utilisés pour identifier ces sites, inspirés des travaux préliminaires de (Patenaude et al., 2020), furent les suivants :

- a) Distance des puits à une eau de surface inférieure à 500 m.;
- b) Distribution spatiale des sites permettant de représenter une gamme variée de contextes de connexion surface-souterrain en lien avec la géomorphologie et de distances puits-eau de surface;
- c) Situation géographique permettant à l'équipe d'aller travailler sur les sites en une journée à partir de Polytechnique Montréal.

Les deux régions administratives sélectionnées correspondent à des contextes géologiques relativement distincts (Figure 2-1). Les Laurentides sont formées des roches de la Province de Grenville, tandis que dans la région de Nicolet-Rivière-Saint-François on retrouve des roches des Appalaches et des Basses Terres du Saint-Laurent. Un total de 36 municipalités furent approchées pour participer au projet et 19 furent retenues. Les sites de prélèvement de la région des Laurentides sont situés dans trois bassins versants différents: rivière du Nord, rivière Rouge et rivière des Mille-Îles. Les sites de prélèvement de la région de Nicolet-Rivière-Saint-François, abrégée Nicolet dans ce rapport, sont tous situés dans le bassin versant de la rivière du même nom. Certains chercheurs ayant participé au Programme d'acquisition des connaissances (PACES) de la région de Nicolet-Rivière-Saint-François (Gagné et al., 2013) furent sollicités pour contribuer à identifier des sites ayant déjà été identifiés comme ayant des connexions à l'eau de surface.

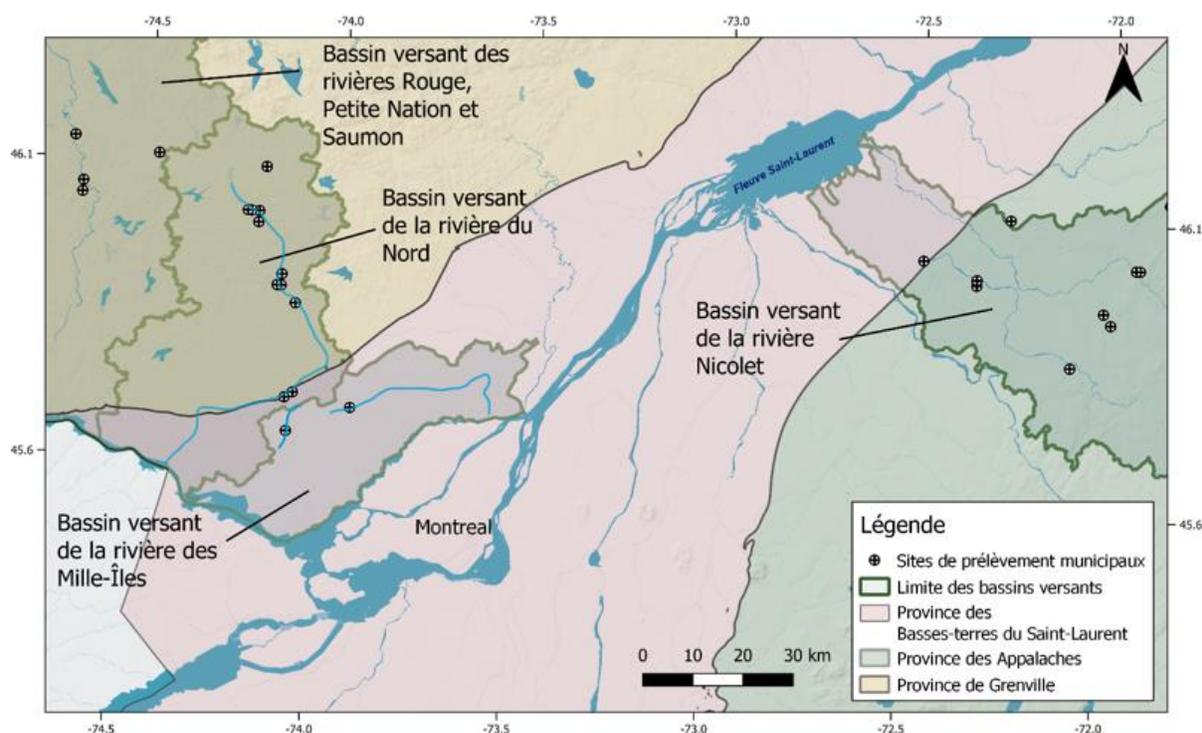


Figure 2-1 : Localisation des installations de captage et des rivières. Modifié de (Patenaude et al., 2020)

2.1.2 Échantillonnage aux prélèvements municipaux d'eau souterraine

Entre octobre 2019 et janvier 2020, l'équipe de recherche a rencontré chacune des municipalités participantes. Des ententes ont été signées pour mettre en place des campagnes d'échantillonnage à un pas de temps régulier sur un total de 40 puits de prélèvement municipaux, identifiés à grande échelle dans la Figure 2-1. Les employés des sites de prélèvements ont ensuite été formés pour échantillonner l'eau brute des puits selon un protocole simple établi pour homogénéiser les méthodes et diminuer les risques de contamination (disponible à Annexe II: Protocole d'échantillonnage). Le pas de temps d'échantillonnage minimal demandé à chaque municipalité partenaire était mensuel. Un grand nombre de municipalités a de plus accepté d'intensifier ce pas de temps à bimensuel ou hebdomadaire. En complément, certaines ont accepté d'échantillonner une fois par jour lors d'événements particuliers comme les crues automnales, durant lesquelles un changement de dynamique des eaux souterraines pouvait aider à anticiper le caractère extrême des régimes hydroclimatiques. La date et l'heure exacte de prélèvement étaient laissées à la discrétion des partenaires. Les périodes d'échantillonnage, pas de temps et nombre d'échantillons sont reportées en détail dans le Tableau 7-1 à l'Annexe I: Échantillons prélevés.

2.1.3 Acquisition de données isotopiques sur les précipitations

Afin de contextualiser le signal isotopique de la recharge des eaux souterraines, les données de campagnes de suivi de l'équipe Hydro-Sciences UQAM ont été utilisées. L'estimation de la droite météoritique locale (DML) a été réalisée selon la méthode de régression des moindres carrés pondérés par les précipitations, proposée par (Hughes & Crawford, 2012), à partir des données isotopiques des précipitations de la base de données de l'Infrastructure de recherche sur la recharge des eaux souterraines (IRRES) de la station de Saint-Bruno ($n = 27$; de décembre 2015 à juin 2017) (Barbecot et al, 2019). Ce point de mesure unique est considéré comme représentatif régionalement pour les besoins de ce projet. Cette approximation a été discutée précédemment dans un contexte québécois (Arnoux et al., 2017).

2.1.4 Échantillonnage des eaux de surface

L'échantillonnage des eaux de surface a visé à établir, pour chaque bassin versant, une série temporelle continue et résolue temporellement qui permette de comparer les signaux temporels des traceurs dans l'eau de surface avec les signaux provenant des sites de prélèvements. Pour ce faire, des partenariats ont été établis avec trois municipalités. Les périodes d'échantillonnage, pas de temps et nombre d'échantillons sont reportées en détail dans le Tableau 7-1 à l'Annexe I: Échantillons prélevés.

Les points d'échantillonnage en eau de surface ont été sélectionnés pour des raisons de logistique, en visant l'obtention de séries temporelles les plus complètes et représentatives possible.

Dans la région de Nicolet, l'eau de la rivière Nicolet a été échantillonnée à un pas de temps hebdomadaire à même la prise d'eau de surface (eau brute) d'une municipalité partenaire. Dans le bassin versant de la rivière du Nord, une municipalité a pris en charge l'échantillonnage à pas de temps hebdomadaire des eaux de surface de la rivière du Nord. Cette même municipalité a pris en charge l'échantillonnage de la rivière Mascouche et de la Belle Rivière situées dans le bassin versant de la rivière des Mille-Îles.

2.1.5 Transport et conservation

Le transport des échantillons depuis les municipalités partenaires jusqu'à Polytechnique Montréal a été réalisé via un système d'envoi simple par la poste, avec jusqu'à 160 échantillons d'eau recueillis par mois provenant de deux régions distinctes. Les municipalités et organismes partenaires recevaient à intervalle régulier une boîte contenant des ensembles de trois contenants de 50 mL ou 60 mL, un aide-mémoire du protocole d'échantillonnage ainsi qu'une feuille de données et un bordereau d'envoi prépayé. Le protocole d'échantillonnage est présenté

à l'Annexe II: Protocole d'échantillonnage. Deux de ces contenants étaient des tubes coniques en polypropylène d'une capacité de 50 mL de la marque *Fisherbrand*, et le troisième était un contenant en polyéthylène haute densité de marque *Nalgène* d'une capacité de 60 mL. Les contenants devaient être remplis à ras bord, sans bulles d'air visible, et les bouchons devaient être bien fermés pour éviter l'évaporation de l'eau. Une fois les échantillonnages réalisés à un pas de temps déterminé, les partenaires retournaient la boîte remplie au laboratoire à Polytechnique Montréal. L'hiver, les boîtes étaient isolées thermiquement pour éviter le gel. Les partenaires étaient sensibilisés à l'importance de ne pas laisser les contenants au soleil ni dans un endroit soumis à des températures extrêmes.

Les ensembles d'échantillons reçus par la poste étaient clairement identifiés au laboratoire par l'équipe. Les bouteilles étaient ensuite conservées à température ambiante à l'abri de la lumière jusqu'au moment des analyses. Un premier échantillon était conservé au laboratoire de Polytechnique Montréal pour la mesure de la conductivité électrique, un deuxième était envoyé au laboratoire de géochimie des isotopes stables légers du Geotop pour l'analyse isotopique et le dernier était utilisé comme échantillon supplémentaire de sauvegarde et conservé au laboratoire à l'abri de la lumière et des changements de température.

2.1.6 Analyse en laboratoire

La conductivité électrique a été mesurée en laboratoire par l'équipe au fur et à mesure que les échantillons arrivaient au laboratoire avec une sonde *Orion™ Versa Star Pro™* de la marque *Thermo Scientific™* au laboratoire de géochimie de Polytechnique Montréal. Pour calibrer la sonde, des standards de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ont été utilisés chaque jour de mesure, comme recommandé par la compagnie. Pour la conductivité électrique, l'incertitude analytique est établie à 25 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Les signatures isotopiques de la molécule de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) ont été mesurées à l'aide d'un spectromètre de masse de type « *Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy (OA-ICOS)* » de marque LGR (Los Gatos Research), modèle T-LWIA-45-EP au laboratoire de géochimie des isotopes stables légers du Geotop (Montréal, Québec). Pour calibrer les résultats sur l'échelle VSMOW-SLAP, trois eaux de références internes ($\delta^{18}\text{O}=0,23\pm 0,06\text{‰}$, $-13,74\pm 0,07\text{‰}$ & $-20,35\pm 0,10\text{‰}$; $\delta^2\text{H}=1,28\pm 0,27\text{‰}$, $-98,89\pm 1,12\text{‰}$ & $-155,66\pm 0,69\text{‰}$) ont été utilisés. L'incertitude analytique totale (1σ) est meilleure que $\pm 0,1\text{‰}$ pour le $\delta^{18}\text{O}$ et $\pm 1,0\text{‰}$ pour le $\delta^2\text{H}$.

En date de février 2022, 90% des échantillons recueillis avaient pu être analysés, malgré les contraintes entraînées par la situation sanitaire.

2.2 Caractérisation hydrogéologique sommaire

Une caractérisation hydrogéologique et géomorphologique succincte a été réalisée pour chaque puits de pompage, afin de pouvoir mettre en contexte les données géochimiques et isotopiques. Les informations utilisées couvraient les deux régions à l'étude (Laurentides et Nicolet) d'une manière inégale et provenaient de diverses sources. Tout d'abord, la topographie des deux régions a été extraite des modèles numériques de terrain (MNT) dérivés des données brutes du LiDAR et rendus disponibles par le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). La résolution spatiale de ces données est de 1 mètre. Des coupes topographiques ont ainsi été effectuées à l'aide du logiciel QGIS en y ajoutant un niveau de référence dans le cours d'eau. Ensuite, des données concernant la profondeur du sommet des crêpines, les débits de pompage moyens ainsi que la stratigraphie au droit des puits ont été acquises à partir de rapports hydrogéologiques fournis par les partenaires, d'informations provenant des PACES de la zone de Nicolet-Rivière-Saint-François, ou de discussions informelles avec les employés sur les sites de prélèvement. Ces données hydrogéologiques ont été couplées avec les coupes topographiques pour avoir un aperçu des contextes géologiques.

3 Résultats

3.1 Représentation graphique

Pour chacun des puits étudiés, les résultats géochimiques des trois traceurs analysés (conductivité électrique, $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) sont représentés sous la forme de quatre graphiques différents, chacun nous permettant d'obtenir une information différente sur le lien hydraulique avec l'eau de surface. La Figure 3-1 en est un exemple. En a), elle présente un diagramme binaire qui présente la relation entre les écarts-types sur les données de conductivité électrique et de $\delta^2\text{H}$. En b), elle présente la corrélation entre les résultats des deux traceurs isotopiques ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$). Les précipitations locales sont également représentées, sous la forme de la DML (décrite dans la section 2.1.3). Une eau ayant subi très peu d'évaporation, ou n'ayant pas été mélangée avec une eau l'ayant subie, se retrouvera directement sur cette droite. Une eau affectée par un mélange avec une eau l'ayant subie, ou ayant subi elle-même un processus d'évaporation, se trouvera en dessous de la DML. Les figures c) et d) nous donnent des indications sur la variation temporelle des traceurs. Ces graphiques permettent d'identifier les corrélations entre la variabilité temporelle du signal des eaux souterraines et de l'eau de surface, et de discuter d'un possible lien hydraulique entre les deux masses d'eau.

VICT_VIC

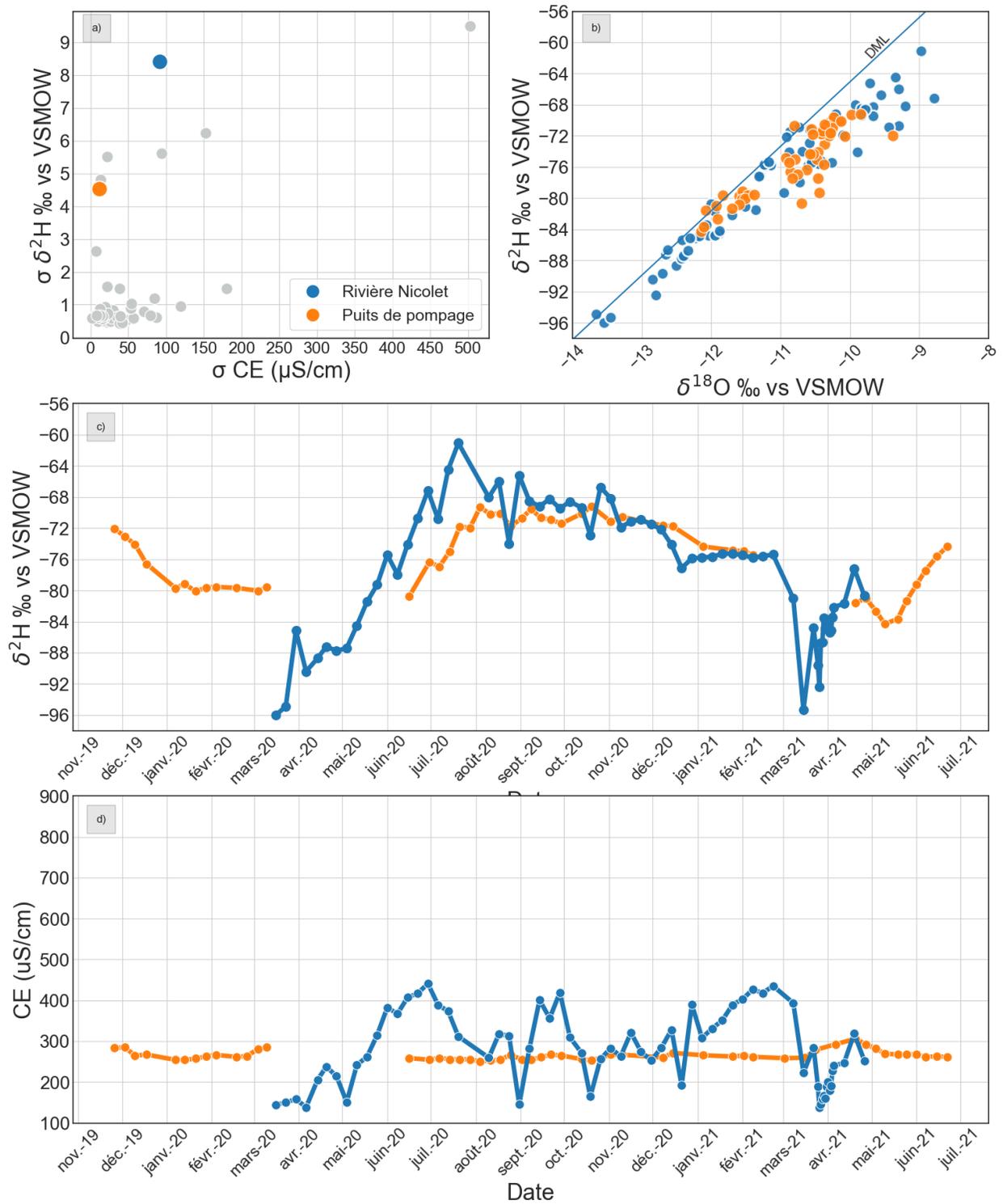


Figure 3-1: Modèles de représentation des données, illustrant : a) écarts-types observés pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

3.2 Eaux de surface

La Figure 3-2 présente l'ensemble des résultats des quatre eaux de surface choisies comme représentatives de leur bassin versant. Mentionner que dans la suite du document, les résultats des sites de prélèvement seront toujours comparés à l'eau de surface de leur bassin versant. Aussi, dans la suite du document, les eaux de surface seront représentées par la couleur bleue, à la différence de la Figure 3-2 où les couleurs visent à simplifier la distinction entre séries.

La Figure 3-2a montre des écarts-types cohérents avec notre schéma théorique, avec une distribution en $\delta^2\text{H}$ systématiquement plus étalée dans les eaux de surface que dans les eaux souterraines, bien que ce soit moins marqué pour la conductivité électrique. Ces distributions sont relativement similaires pour la rivière du Nord (RDN), La Belle Rivière (LBR) et la rivière Nicolet (NICO), où les écarts-types se retrouvent entre 90 et 140 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour CE et entre 5,7 et 8,5 vs V-SMOW pour $\delta^2\text{H}$. La Rivière Mascouche (MAS) se distingue par un écart-type largement supérieur pour la CE (500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et légèrement supérieur pour $\delta^2\text{H}$ (9.5 ‰ vs V-SMOW).

La Figure 3-2b montre que toutes les rivières sont progressivement marquées par de l'évaporation, qui affecte surtout les eaux les plus enrichies, observées en été. Cette observation est également cohérente avec notre schéma théorique. L'évaporation est cependant moins marquée pour la MAS.

La Figure 3-2c présente une même tendance évolutive pour toutes les rivières, avec un plateau en hiver, un appauvrissement rapide au printemps, un enrichissement durant l'été, un appauvrissement progressif durant l'automne et finalement, un appauvrissement rapide au printemps suivant. Le plateau est semblable pour tous les cours d'eau à l'hiver (autour de -76‰ vs V-SMOW) et à l'été (autour de -70‰ vs V-SMOW). Cependant, la temporalité de l'appauvrissement dû à la fonte des neiges au printemps 2020 est différente : mars pour LBL, MAS et NIC alors que début mai pour RDN. Aussi, les trois premières atteignent -102 à -93‰, tandis que la RDN n'atteint que -89‰. Enfin, la rivière NICO semble présenter deux périodes marquées de dégel, la deuxième étant synchrone avec la RDN (mai).

La Figure 3-2d révèle que les grands bassins versants sont nettement moins minéralisés que les plus petits, avec des moyennes approximatives de 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour NICO et RDN contre 800 et 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour LBR et MAS, respectivement. Les valeurs les plus faibles pour NICO et RDN sont mesurées en mars et avril-mai respectivement, donc apparemment synchrones avec leur signal isotopique le plus appauvri, tandis que pour LBL et MAS, valeur la plus faible de CE s'observe quelques semaines après le signal isotopique le plus appauvri. Il serait intéressant d'identifier dans un futur projet si les valeurs très élevées de la CE en mars 2020 et mars 2021 dans la rivière Mascouche impliquent une origine anthropique (p. ex. sel de déglacage).

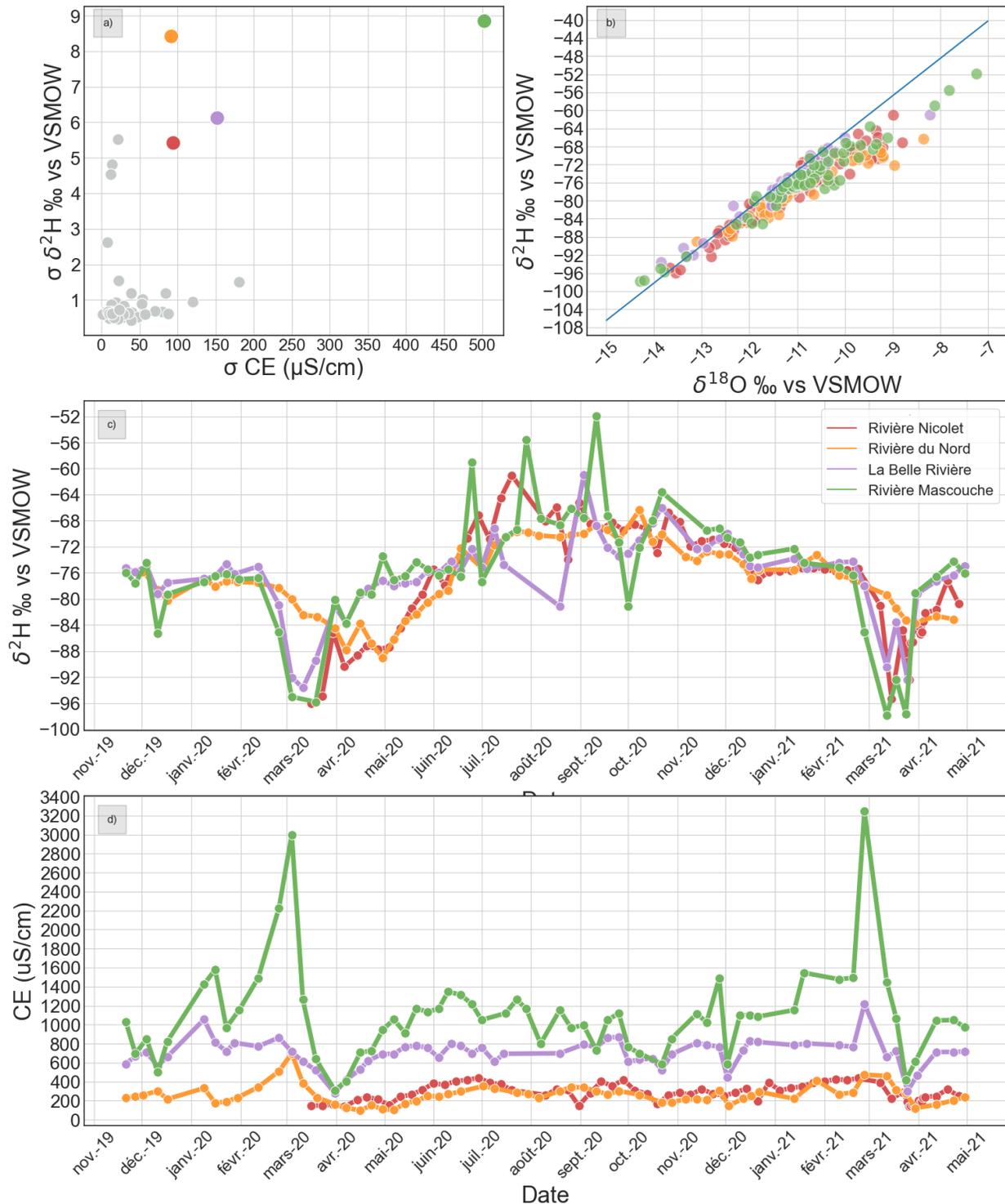


Figure 3-2: Résultats pour les quatre eaux de surface (Rivière Nicolet, rivière du Nord, La Belle Rivière, Rivière Mascouche) représentant a) écarts-types observés pour $\delta^2\text{H}$ et CE; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

3.3 Sites de prélèvement municipaux

3.3.1 Bassin versant de la rivière du Nord

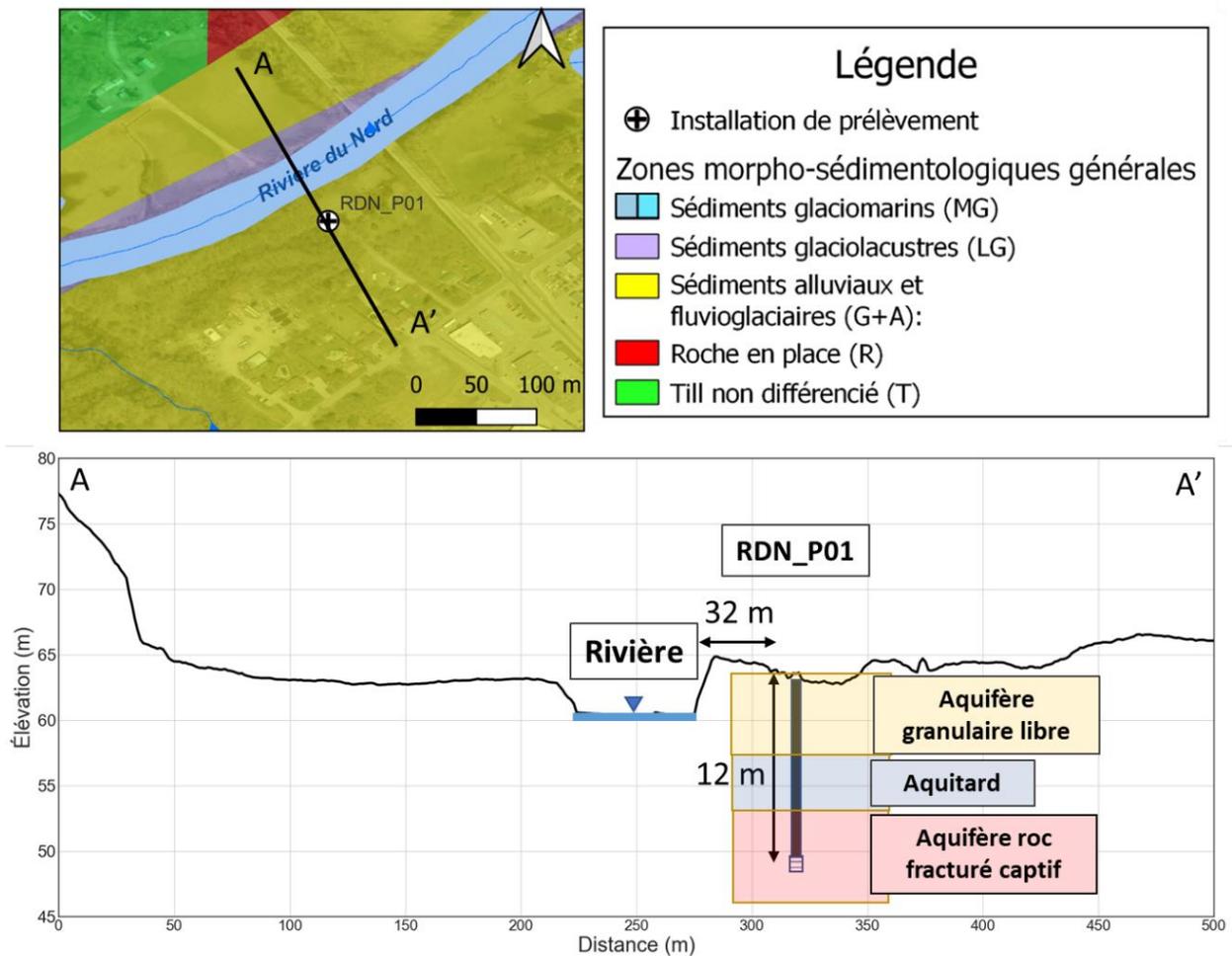
Un total de 21 puits regroupés dans 9 municipalités différentes sont présents dans le bassin versant de la rivière du Nord. Les puits sont présentés de l'aval à l'amont de la rivière.

3.3.1.1 RDN_P01

Caractérisation hydrogéologique

- Le puits RDN_P01 est aménagé dans le roc fracturé à **12 mètres de profondeur** (valeur approximative) et localisé à **32 mètres de la rivière du Nord**. Les dépôts associés à la géologie de surface au droit du puits sont de type alluvionnaire (sable, gravier), mais la coupe stratigraphique au droit du puits a permis d'identifier la présence d'une couche d'argile de plusieurs mètres entre la surface et le roc. Ce puits est donc considéré comme étant dans un **aquifère au roc captif**. Par contre, étant donné la faible profondeur du puits et l'hétérogénéité spatiale typique de ce type de dépôt, un lien hydraulique avec la rivière reste possible.

RDN_P01



Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données disponibles pour l'eau souterraine couvrent la période de novembre 2019 à mai 2021 (Figure 3-4). On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,7 ‰ vs V-SMOW (N=40) et sur les valeurs de conductivité électrique de 115 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N = 62) (Figure 3-4a).
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans la Figure 3-4b, forme un nuage de points de 3 ‰ et 1‰ vs V-SMOW d'amplitude respective, centrée autour d'une valeur moyenne à [-73‰; -10,7‰ vs V-SMOW].
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est essentiellement stable, avec une moyenne à -73‰ vs V-SMOW, c.-à-d. enrichie par rapport à la moyenne des eaux de surface qui se trouve à -75‰ vs V-SMOW.
- Les valeurs de conductivité électrique de l'eau souterraine sont élevées et supérieures à celles des eaux de surface, avec des moyennes respectives autour de 1030 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figure 3-4d). Une augmentation marquée de la conductivité électrique est observée en mars 2020. Les valeurs semblent conserver un plateau autour de 1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avant de redescendre en décembre 2021. La période de ce plateau est synchrone avec une augmentation du débit de pompage, qui avait triplé pendant cette période.
- Les données disponibles pour l'eau souterraine couvrent la période de novembre 2019 à mai 2021 (Figure 3-4). On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,7 ‰ vs V-SMOW (N=40) et sur les valeurs de conductivité électrique de 115 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N =62) (Figure 3-4a).

RDN_P01

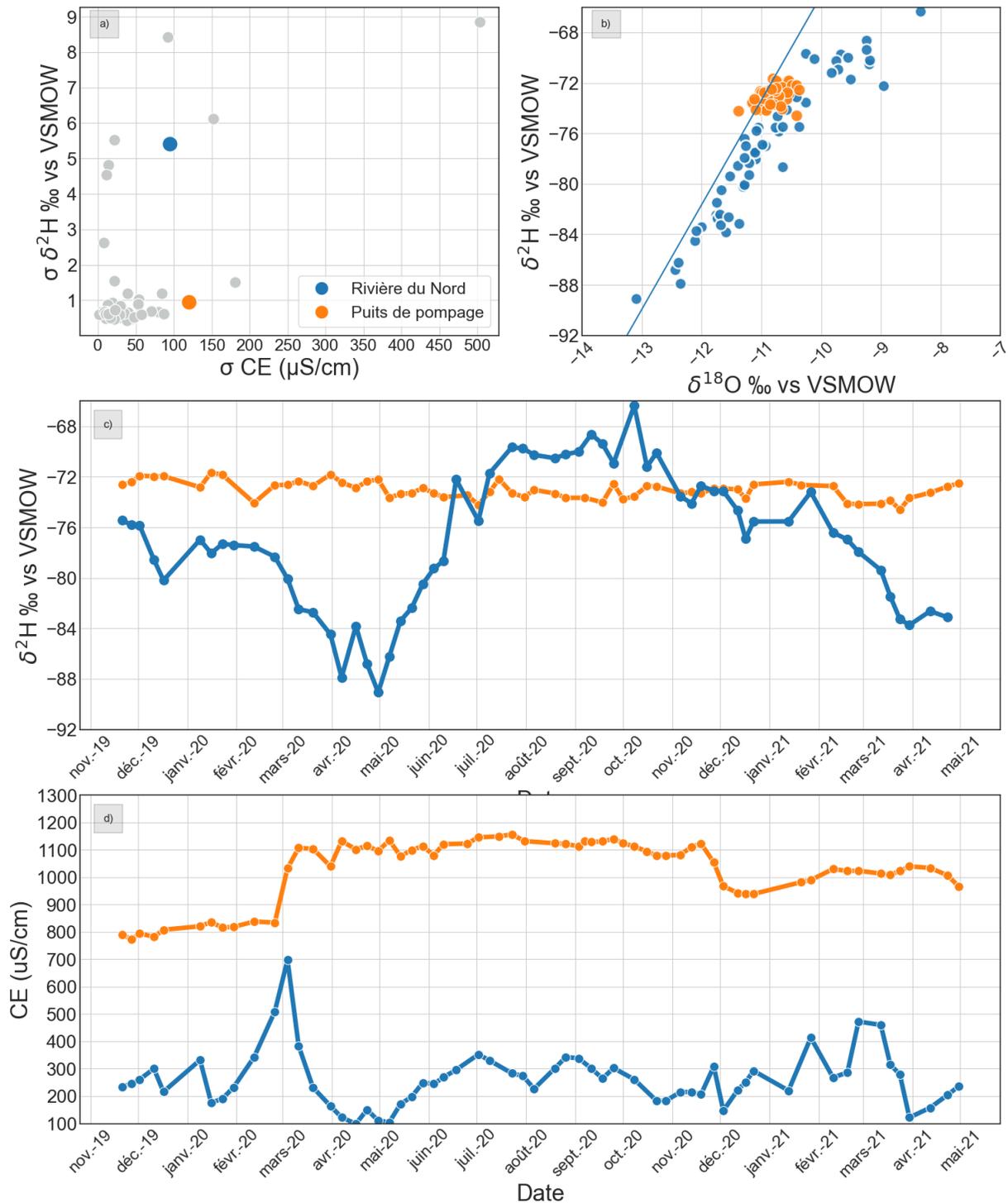


Figure 3-4 Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement de RDN_P01 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

3.3.1.2 RDN_P02

Caractérisation hydrogéologique

- Le puits RDN_P02 est aménagé dans le roc fracturé à **33 mètres de profondeur** à une distance de **389 mètres de la rivière du Nord**. La coupe stratigraphique du puits a permis d'identifier une couche d'environ 4 mètres de dépôts argileux entre la surface et le roc dans lequel est aménagé le puits. Cette installation est donc considérée comme étant dans un **aquifère au roc captif**.

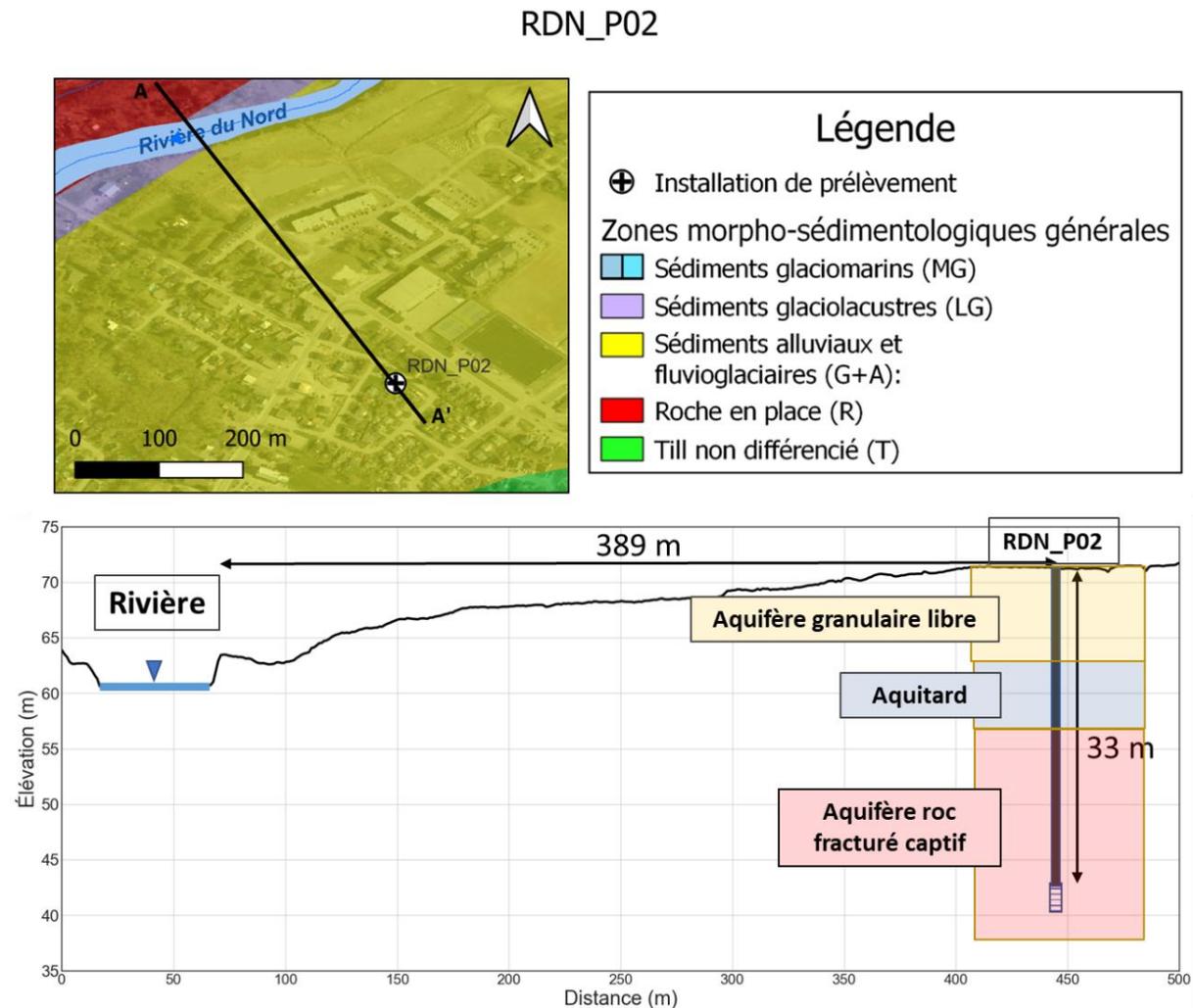


Figure 3-5 Localisation du site de prélèvement RDN_P02 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données disponibles pour l'eau souterraine couvrent la période de décembre 2019 à mai 2021 (Figure 3-6). On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,5 ‰ vs V-SMOW (N=40) et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 26 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=62) (Figure 3-6a).
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans la Figure 3-6b, forme un nuage de points compact, centré autour d'une valeur moyenne à [-77‰; -11,5‰ vs V-SMOW].
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est essentiellement stable.
- Les valeurs de conductivité électrique de l'eau souterraine sont très élevées et supérieures à celles des eaux de surface, avec des moyennes respectives de 1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figure 3-6d). Une augmentation progressive de 75 à 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ est observée durant toute la période étudiée.

RDN_P02

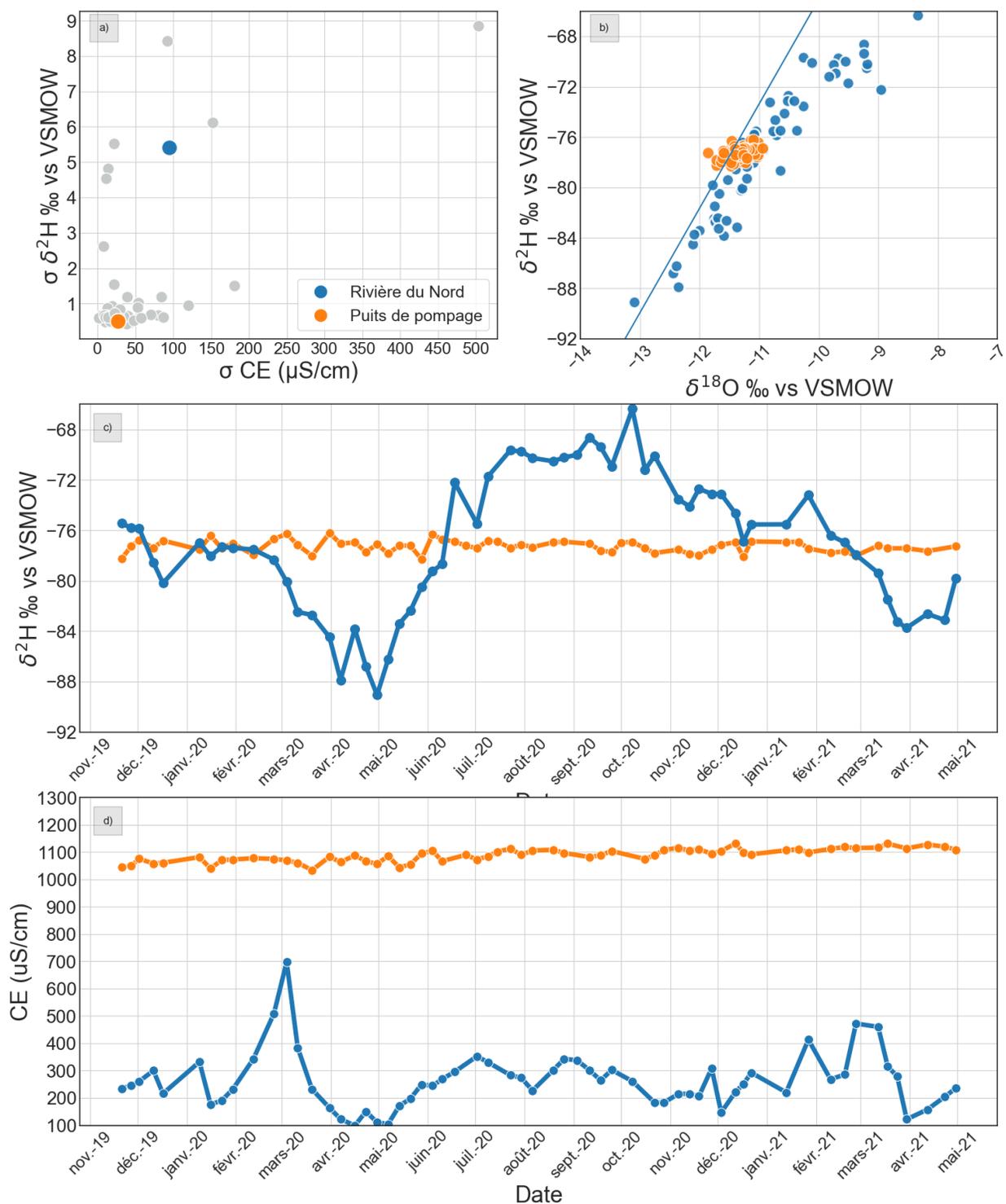


Figure 3-6 Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P02 : a) écarts-types observés dans le projet pour δ²H et EC; b) diagramme binaire δ²H vs δ¹⁸O; c) évolution temporelle de δ²H; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

3.3.1.3 RDN_P03 et RDN_P04

Caractérisation hydrogéologique

- Les puits RDN_P03 (RDN_P04) sont installés à **21 (18) mètres de profondeur** dans un aquifère granulaire, localisés à **117 mètres de la rivière du Nord**. Le puits RDN_P04 est installé à une dizaine de mètres latéralement du puits RDN_P03. La coupe stratigraphique au droit du puits a permis d'identifier une fine couche de dépôts silteux et argileux au sommet de l'aquifère granulaire où sont situées les deux crépines. Les deux puits sont donc considérés comme étant dans des **aquifères granulaires captifs**, même si leur position au creux d'un méandre et l'hétérogénéité spatiale des couches de dépôts argileux ne permet pas de statuer sur l'absence de lien hydraulique avec la rivière du Nord.

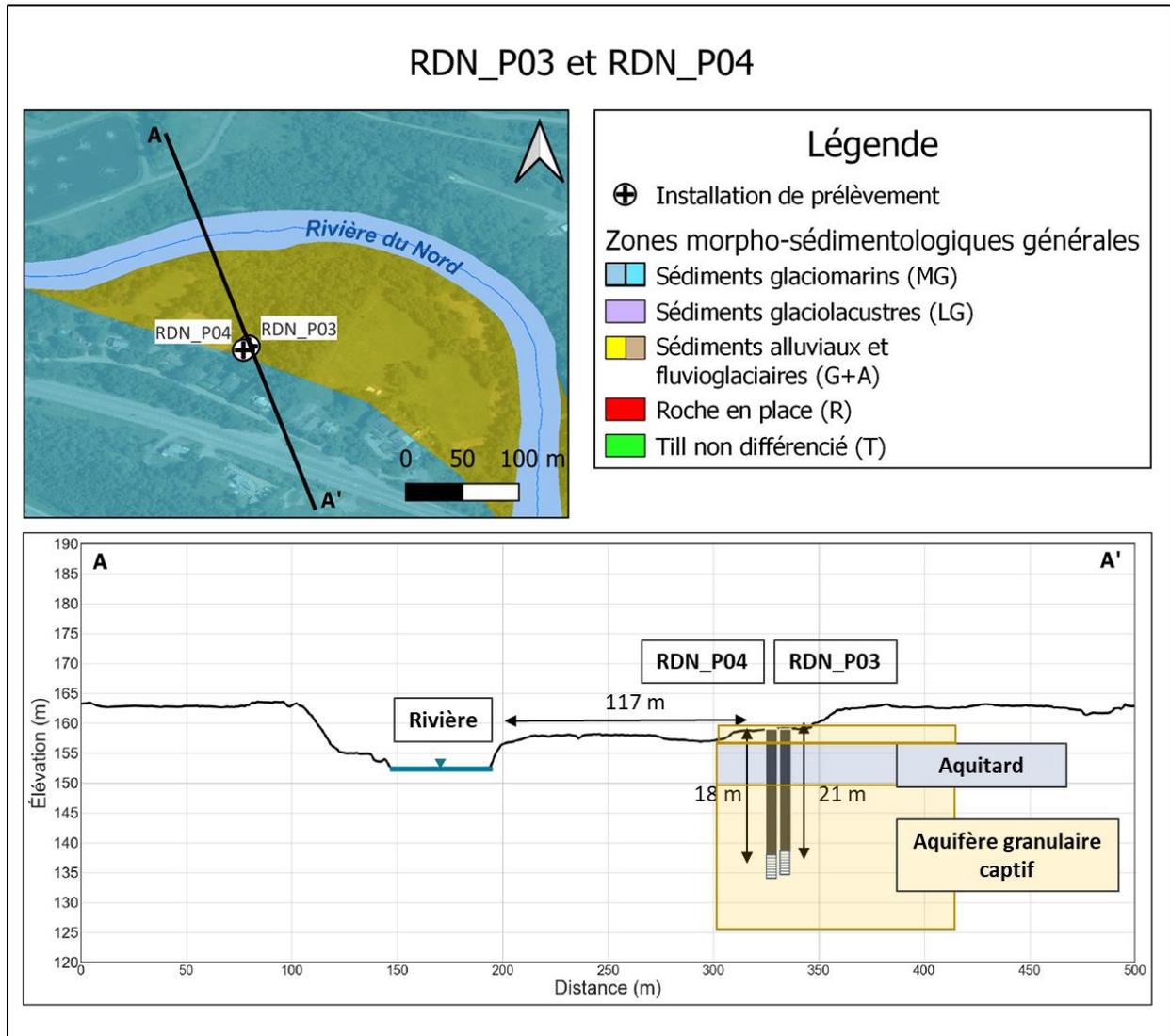


Figure 3-7 Localisation des sites de prélèvement RDN_P03 et RDN_P04 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données isotopiques et de conductivité électrique disponibles pour l'eau souterraine du puits **RDN_P03** couvrent la période de décembre 2019 à mai 2021 (Figure 3-8). On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 1,19 ‰ vs V-SMOW et de 39 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sur les valeurs de conductivité électrique (Figure 3-8a).
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans la Figure 3-8b, forme un nuage de points de 7‰ et 1.5‰ vs V-SMOW d'amplitude respective, centré autour d'une valeur moyenne à [-73‰; -11.5‰ vs V-SMOW]. Si certaines des valeurs sont

dans la gamme caractéristique des eaux de la rivière du Nord, adjacente, un certain nombre est situé le long de la droite météoritique locale, proche de la valeur moyenne.

- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est essentiellement marquée par un appauvrissement progressif (7‰ vs V-SMOW) au cours de l'hiver 2020, suivi d'un enrichissement rapide à l'été 2020 (Figure 3-8c). Cette tendance est fortement corrélée avec celle des eaux de surface, en particulier pendant la période de dégel, soit entre les mois d'avril à juin 2020.
- Les valeurs de conductivité électrique de l'eau souterraine sont nettement supérieures à celles des eaux de surface, avec des moyennes respectives de 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-8d). Des diminutions importantes (200 $\mu\text{S}/\text{cm}$) sont observées au printemps 2020 et au printemps 2021, synchrones avec le même phénomène dans les eaux de surface et surtout, synchrones avec les appauvrissements en $\delta^2\text{H}$ (printemps 2020 et 2021).

RDN_P03

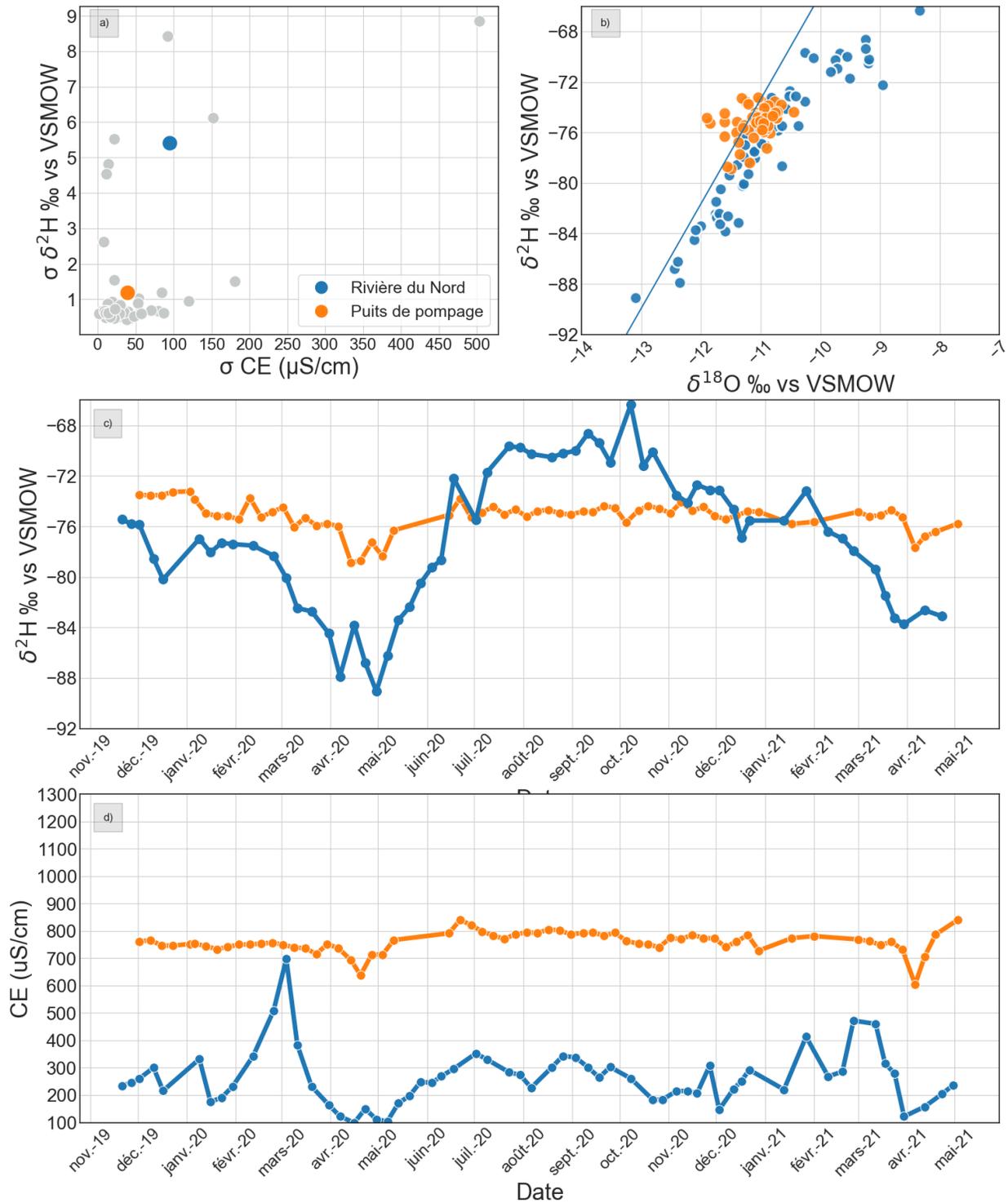


Figure 3-8 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P03 a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données isotopiques et de conductivité électrique disponibles pour l'eau souterraine du puits **RDN_P04** couvrent la période de décembre 2019 à mai 2021 (Figure 3-9). On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,8 ‰ vs V-SMOW (N=30) et sur les valeurs de conductivité électrique de 70 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=63) (Figure 3-9a).
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans Figure 3-9b, est centrée autour d'une valeur moyenne à [-76‰; -11‰ vs V-SMOW].
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est stable, avec une succession de périodes légèrement plus appauvries suivies d'un enrichissement, qui coïncide avec celles de la rivière du Nord entre les mois de mars 2020 et de juillet 2020 (Figure 3-9c).
- Les valeurs de conductivité électrique de l'eau souterraine sont supérieures à celles des eaux de surface, avec des moyennes respectives de 820 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-9d). La diminution de la conductivité électrique au puits en mars 2020, suivie de l'augmentation en juillet est corrélée avec le signal de l'eau de surface pendant la période de dégel.

RDN_P04

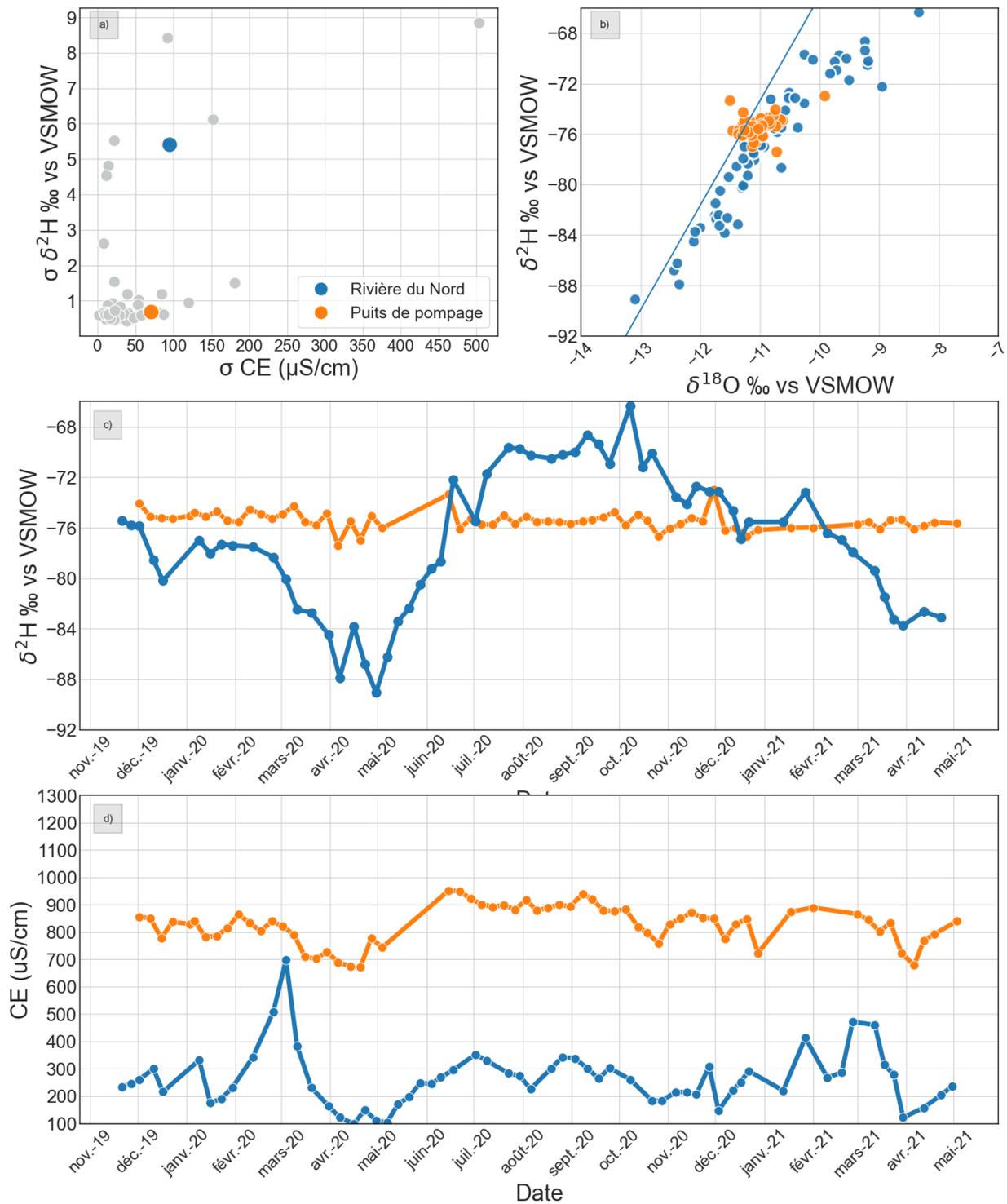


Figure 3-9 Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P04 : a) écarts-types observés dans le projet pour δ²H et EC; b) diagramme binaire δ²H vs δ¹⁸O; c) évolution temporelle de δ²H; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

3.3.1.4 RDN_P05, RDN_P06, RDN_P07, RDN_P08 et RDN_P09

Caractérisation hydrogéologique

- Les puits RDN_P05, RDN_P06, RDN_P07, RDN_P08 et RDN_P09 sont aménagés dans le même aquifère granulaire à des **profondeurs de 25 à 30 mètres**. Les puits sont à des **distances de 24 à 85 mètres** de la rivière du Nord. Pour des raisons de lisibilité, les distances n'ont pas été reproduites sur la coupe schématique. Les puits RDN_P05 à RDN_P08 sont situés dans des **aquifères granulaires libres** au droit du puits. Due à une couche d'argile au droit du puits RDN_P09, cette installation est considérée comme étant dans un aquifère granulaire captif.

RDN_P05 à RDN_P09

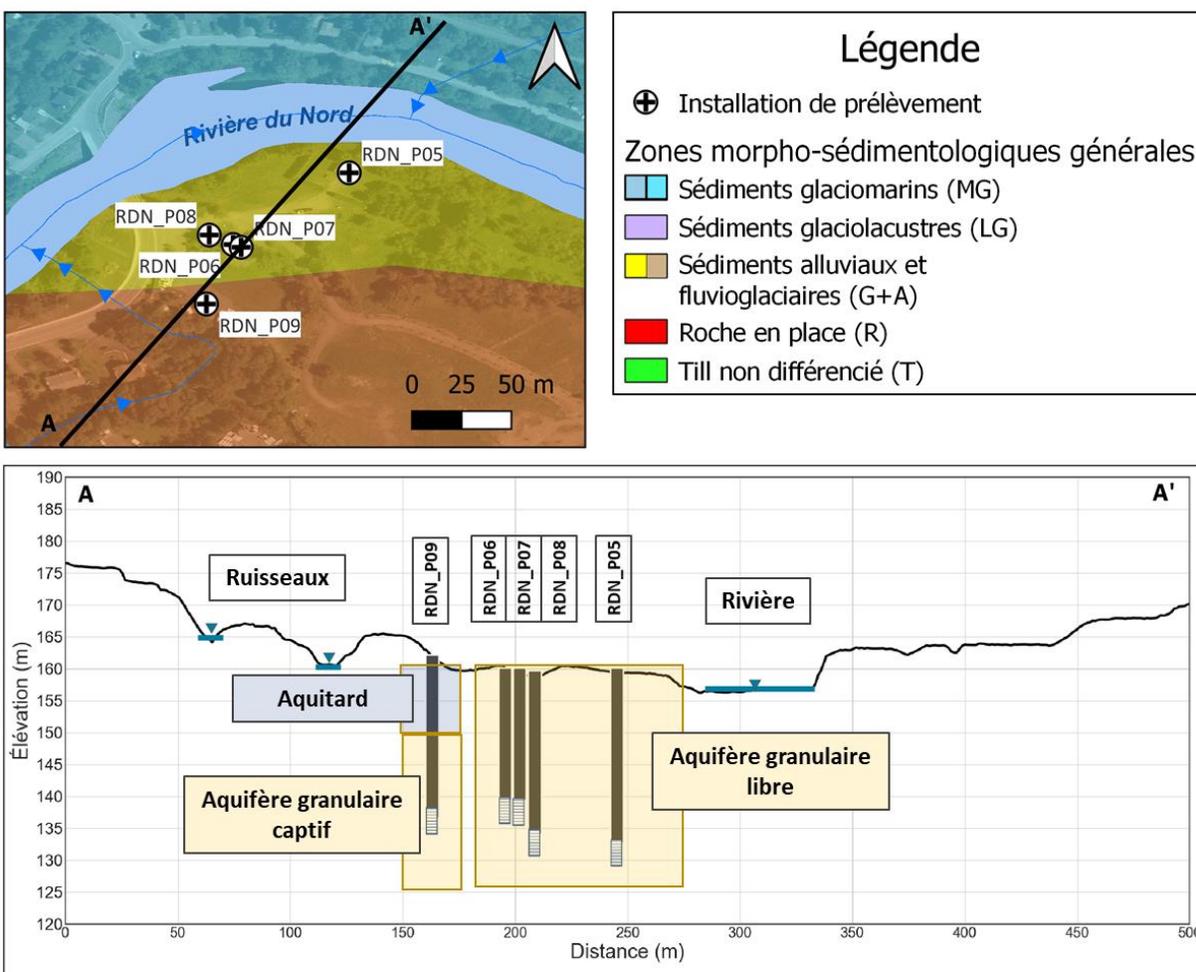


Figure 3-10 Localisation des sites de prélèvement RDN_P05 à RDN_P09 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- L'installation **RDN_P05** a été hors service pour nettoyage entre les mois d'août et octobre 2020. Les données de la conductivité électrique disponibles pour l'eau souterraine couvrent la période d'octobre 2019 à avril 2021 (Figure 3-11), et celles des isotopes couvrent la période d'octobre 2019 à décembre. On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,4 ‰ vs V-SMOW (N=24) et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 38 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=44) (Figure 3-11a).
- Les ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans la Figure 3-11b, est centrée autour d'une valeur moyenne à [-74‰; -10,9‰ vs V-SMOW].
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est stable, avec une moyenne semblable à celle de l'eau de surface (-74‰; -74,5‰ vs V-SMOW) (Figure 3-11c). Pendant que le puits était hors service, les trois autres puits du site ont vu leur signal isotopique s'appauvrir. Il aurait été intéressant d'identifier si cet appauvrissement est dû à cet arrêt de service ou à un effet saisonnier.
- La moyenne de la conductivité électrique est plus élevée que celle des eaux de surface, respectivement de 460 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-11d).

RDN_P05

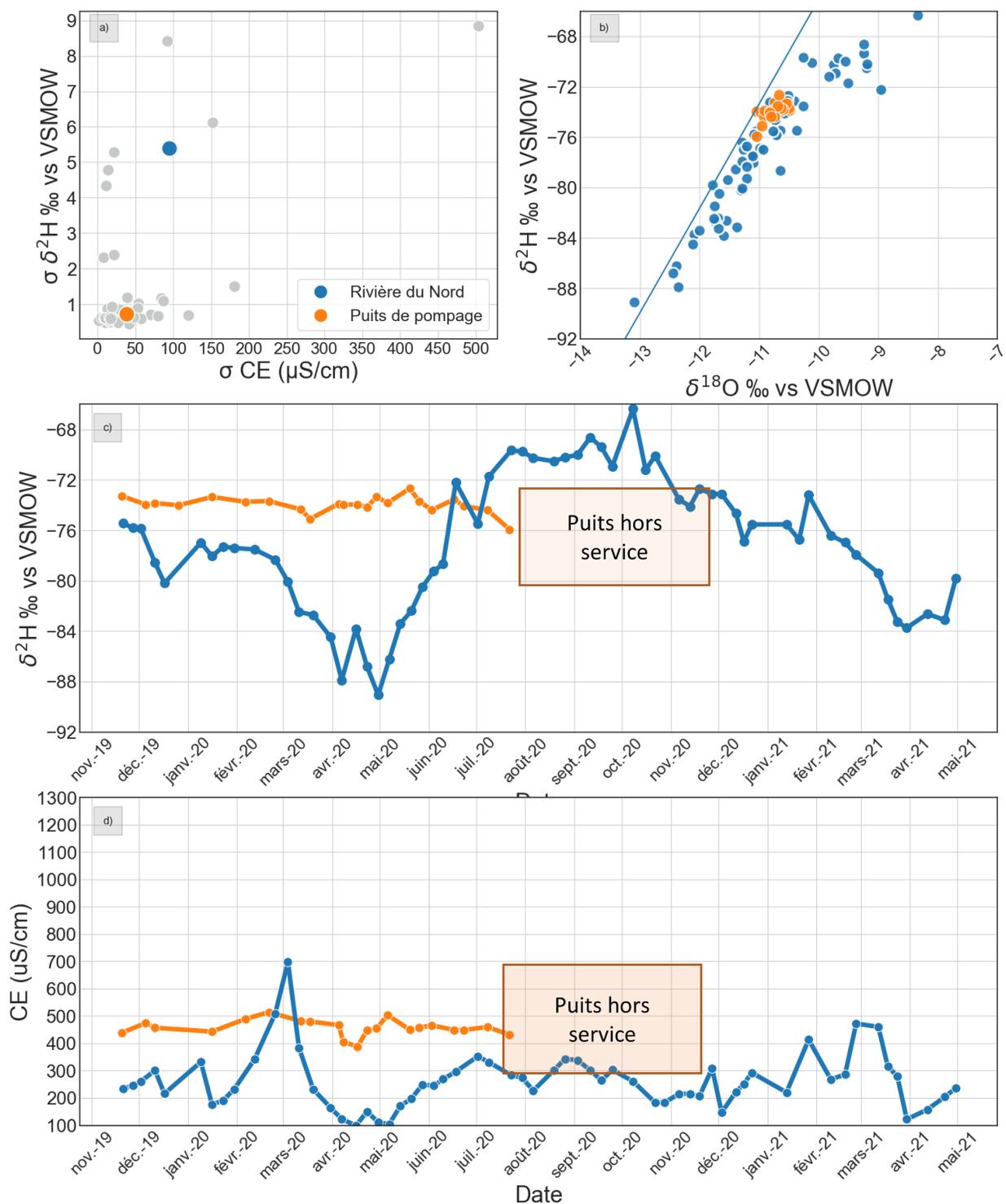


Figure 3-11 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P05 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données de la conductivité électrique disponibles pour l'eau souterraine de l'installation **RDN_P06** couvrent la période d'octobre 2019 à avril 2021 (Figure 3-12), et celles des isotopes couvrent la période d'octobre 2019 à décembre. On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,9 ‰ vs V-SMOW (N=42) et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 53 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=46) (Figure 3-12a).
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans la Figure 3-12b, forme un nuage de points de 4 ‰ et 1,5 ‰ vs V-SMOW d'amplitude respective, centrée autour d'une valeur moyenne à [-74,1 ‰; -10,9 ‰ vs V-SMOW].
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est stable, avec une moyenne semblable à celle de l'eau de surface (-74,1 ‰; -74,5 ‰ vs V-SMOW) (Figure 3-12c). On remarque un appauvrissement des valeurs en août 2020, 3 mois après les plus basses valeurs de l'eau de surface.
- La moyenne de la conductivité électrique est plus élevée que celle des eaux de surface, respectivement de 475 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-12d).

RDN_P06

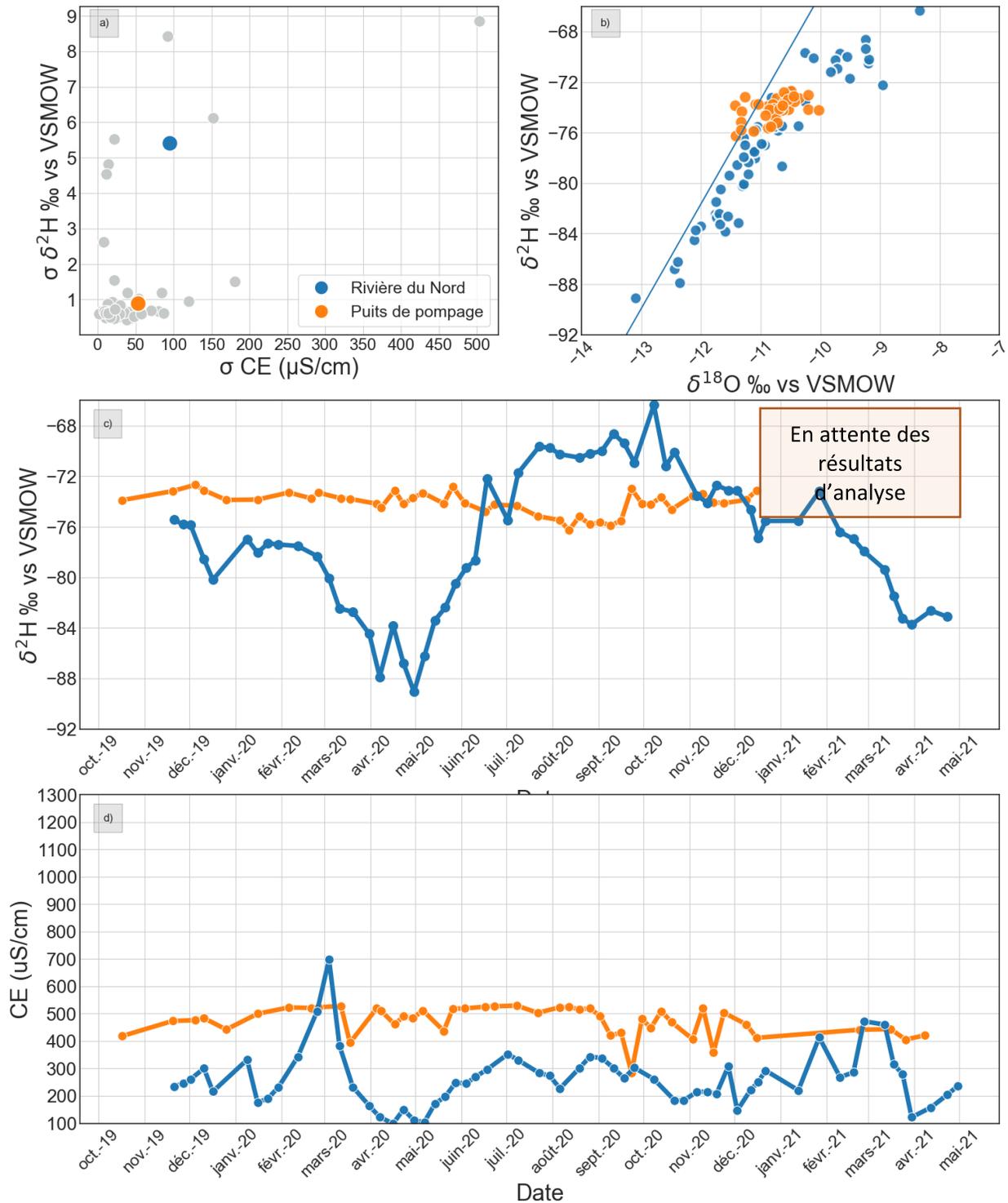


Figure 3-12 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P06 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données de la conductivité électrique disponibles pour l'eau souterraine de l'installation **RDN_P07** couvrent la période d'octobre 2019 à avril 2021 (Figure 3-13), et celles des isotopes couvrent la période d'octobre 2019 à décembre. On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,7 ‰ vs V-SMOW (N=42) et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 13 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=46) (Figure 3-13a).
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans la Figure 3-13b, est centré autour de valeur moyenne à [-74,2‰; -11‰ vs V-SMOW].
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est stable, avec une moyenne semblable à celle de l'eau de surface (-74,2‰; -74,5‰ vs V-SMOW] (Figure 3-13c)
- L'évolution temporelle de la conductivité électrique est stable, et la moyenne est plus élevée que celle des eaux de surface, respectivement de 530 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 260 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-13d).

RDN_P07

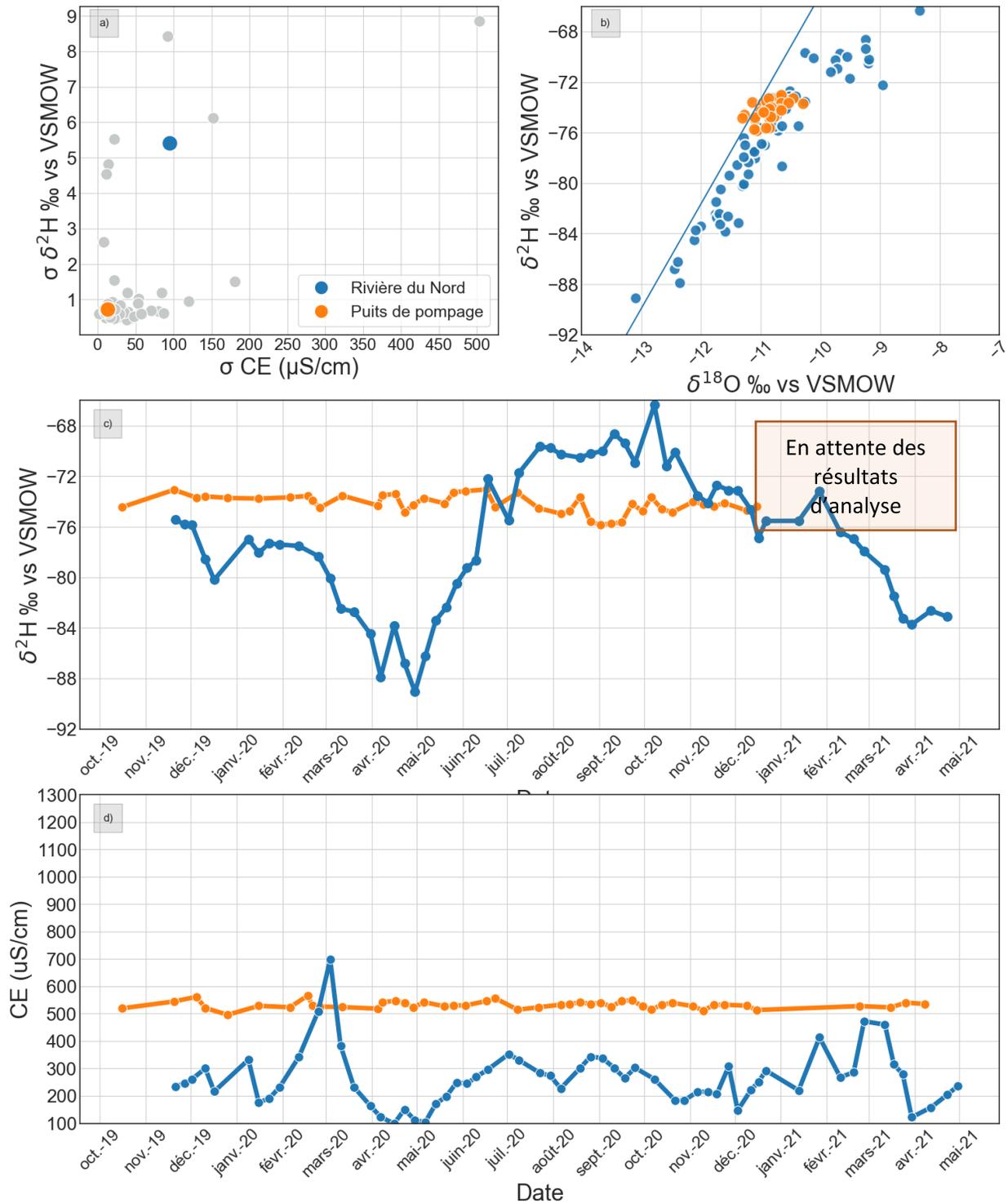


Figure 3-13 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P07 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données de la conductivité électrique disponibles pour l'eau souterraine de l'installation **RDN_P08** couvrent la période d'octobre 2019 à avril 2021 (Figure 3-14), et celles des isotopes couvrent la période d'octobre 2019 à décembre. On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,6 ‰ vs V-SMOW (N=42) et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 35 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=46) (Figure 3-14a).
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans la Figure 3-14b, forme un nuage de points de 4 ‰ et 1 ‰ vs V-SMOW d'amplitude respective, centrée autour d'une valeur moyenne à [-74,4 ‰; -11 ‰ vs V-SMOW].
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est stable, avec une moyenne semblable à celle de l'eau de surface (-74,4 ‰; -74,5 ‰ vs V-SMOW) (Figure 3-14c).
- La moyenne de la conductivité électrique est plus élevée que celle des eaux de surface, respectivement de 610 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-14d). Une augmentation de la CE à la mi-mars 2020 est corrélée avec l'augmentation dans les eaux de surface du mois de mars 2020.

RDN_P08

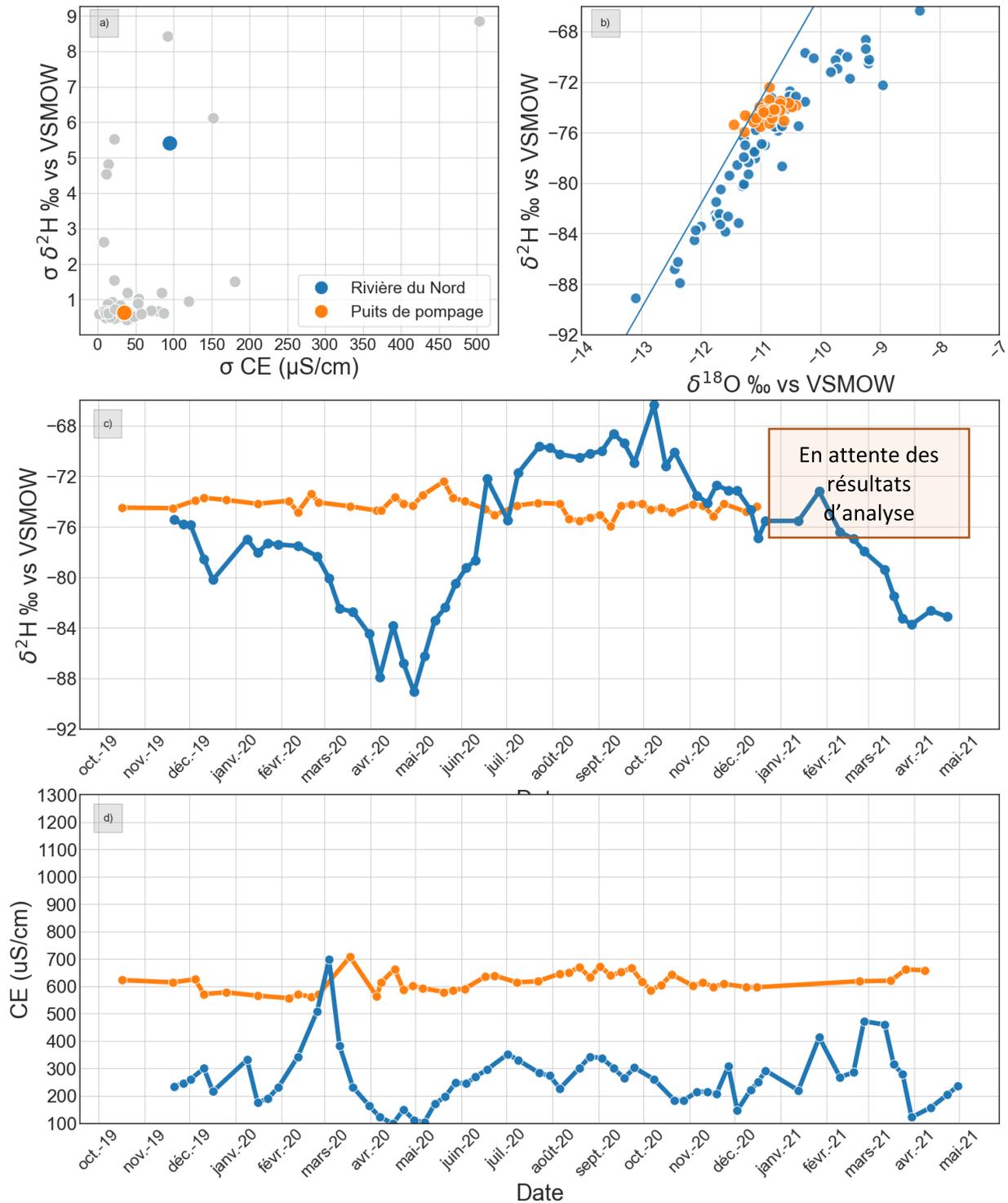


Figure 3-14 Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P08 : a) écarts-types observés dans le projet pour δ²H et EC; b) diagramme binaire δ²H vs δ¹⁸O; c) évolution temporelle de δ²H; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données isotopiques et celles de la conductivité électrique de l'installation **RDN_P09** disponibles pour l'eau souterraine couvrent la période de novembre 2019 à janvier 2021 (Figure 3-15), avec une interruption entre les mois de mai et novembre 2020. On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,9 ‰ vs V-SMOW (N=10) et sur les valeurs de conductivité électrique de 13 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=8) (Figure 3-15). Figure 3-15 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P09 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique).
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans la Figure 3-15b, est centrée autour de valeur moyenne à [-74‰; -10,5‰ vs V-SMOW].
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est stable, avec une moyenne semblable à celle de l'eau de surface [-73,9‰; -74,5‰ vs V-SMOW] (Figure 3-15c)
- L'évolution temporelle de la conductivité électrique est stable, et la moyenne est plus élevée que celle des eaux de surface, respectivement de 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 260 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-15d).

RDN_P09

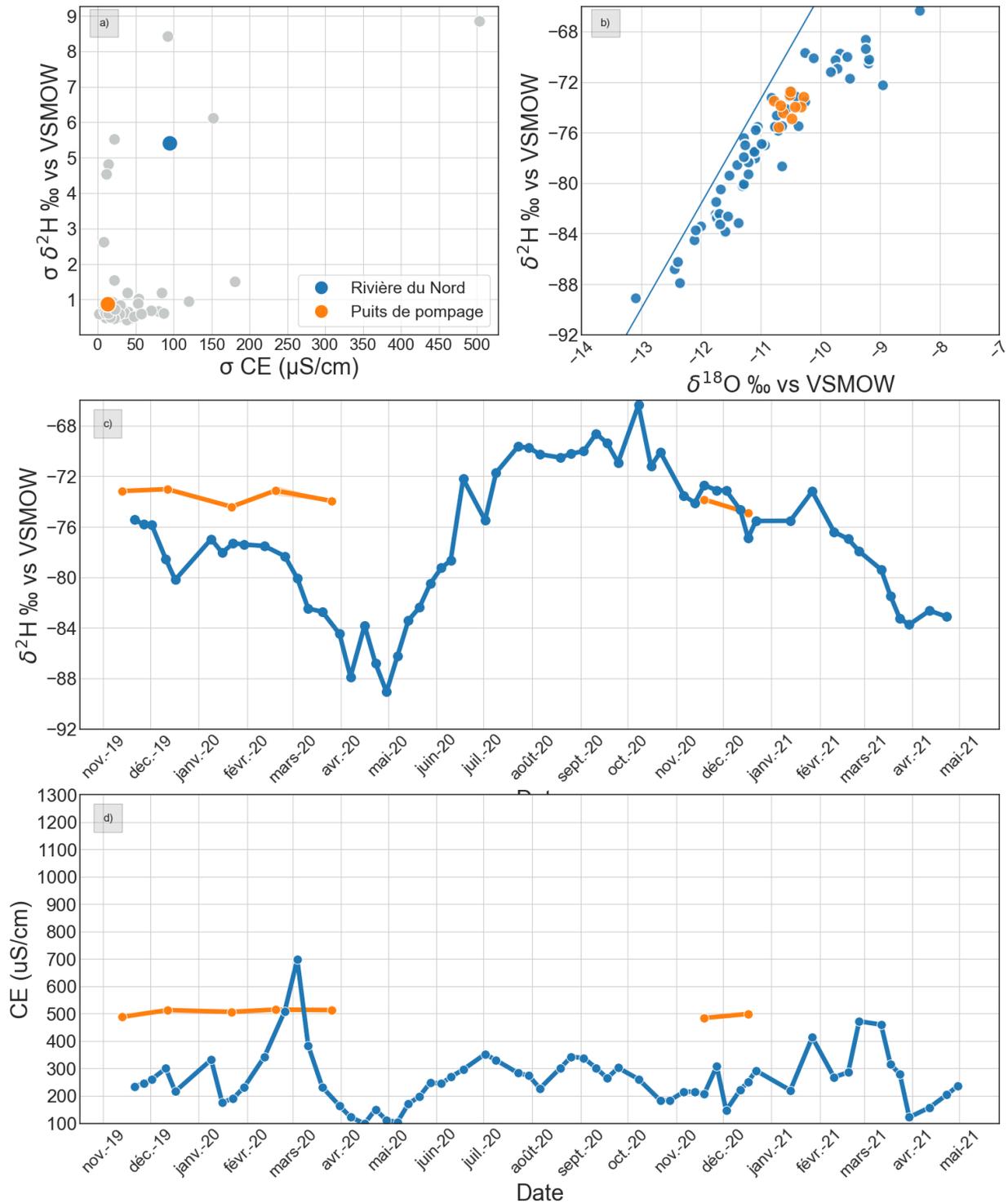


Figure 3-15 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P09 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

3.3.1.5 RDN_P10

Caractérisation hydrogéologique

- Le puits RDN_P10 est aménagé à une **profondeur de 46 mètres** dans un aquifère granulaire, à **97 mètres de distance** de la rivière du Nord. Les coupes stratigraphiques au droit du puits ont permis de constater la présence d'une couche d'argile en surface, ce puits est donc considéré comme étant dans un **aquifère granulaire à nappe captive**.

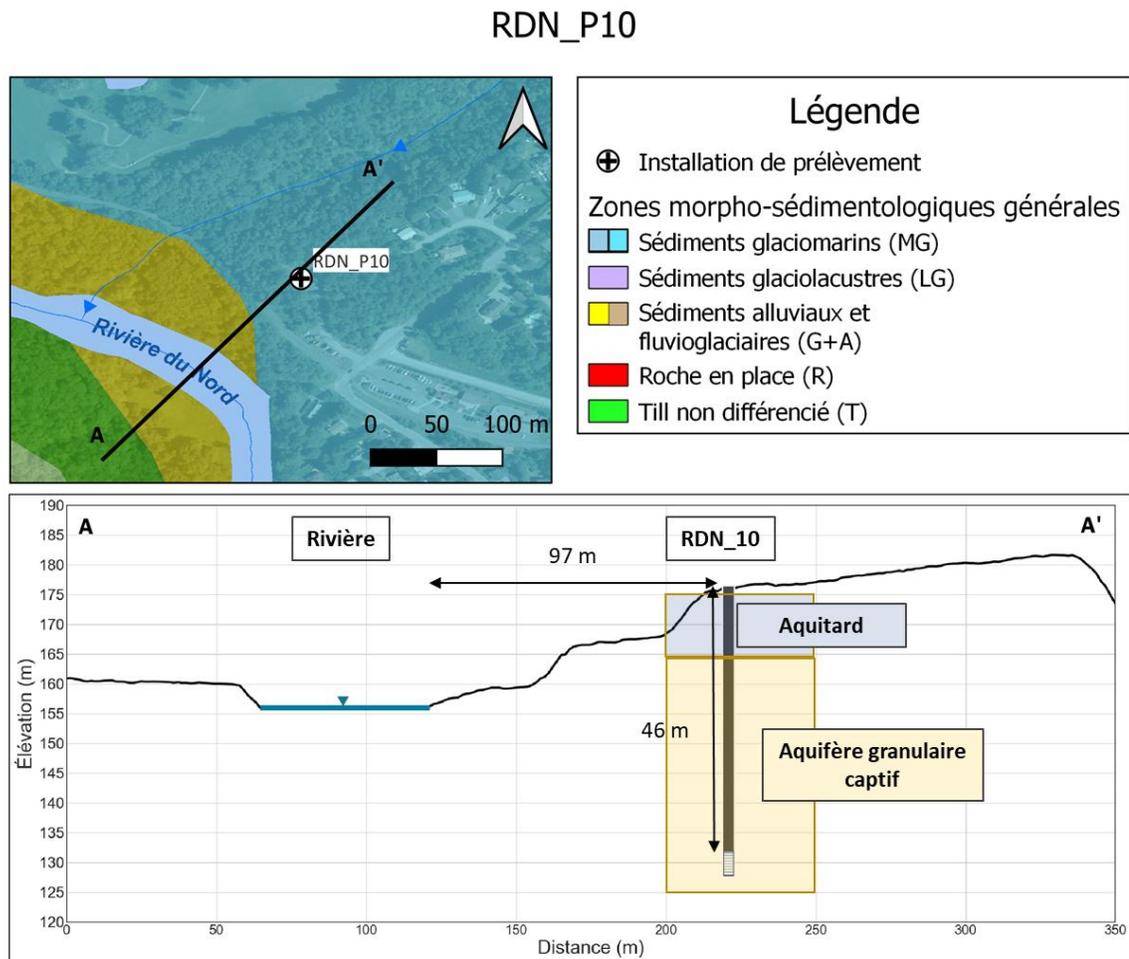


Figure 3-16 Localisation des sites de prélèvement RDN_P10 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données isotopiques et celles de la conductivité électrique disponibles pour l'eau souterraine couvrent la période de novembre 2019 à janvier 2021 (Figure 3-17), avec une interruption entre les mois de mai et novembre 2020. On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,6 ‰ vs V-SMOW (N=9) et sur les valeurs de conductivité électrique de 15 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=8) (Figure 3-17a).
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans la Figure 3-17b, est centrée autour d'une valeur moyenne à [-75‰; -11‰ vs V-SMOW].
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est stable, avec une moyenne semblable à celle de l'eau de surface (-75‰; -74,5‰ vs V-SMOW) (Figure 3-17c)
- L'évolution temporelle de la conductivité électrique est stable, et la moyenne est plus élevée que celle des eaux de surface, respectivement de 550 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 260 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-17d).

RDN_P10

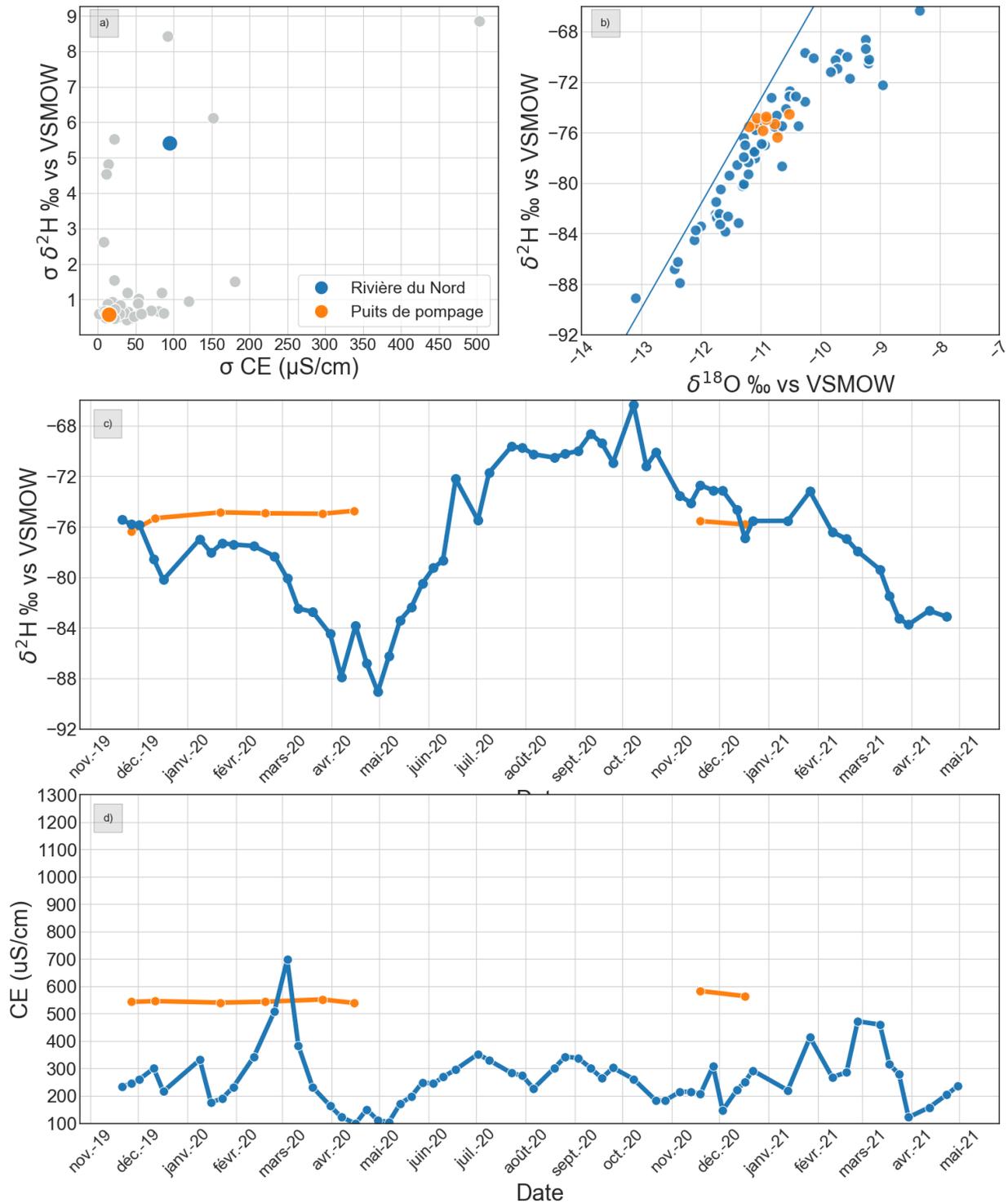


Figure 3-17 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P10 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

3.3.1.6 RDN_P11, RDN_P12 et RDN_P13

Caractérisation hydrogéologique

- Les puits RDN_P11, RDN_P12 et RDN_P13 appartiennent tous à la même installation de captage d'eau souterraine situé dans un même aquifère granulaire. Les puits RDN_P11 et RDN_P13 sont installés respectivement à **36 mètres** et **30 mètres de profondeur** et localisés à **31 mètres de distance** de la rivière du Nord. Le puits RDN_P12 est installé à une **profondeur de 30 mètres**, et à une **distance de 73 mètres** de la rivière du Nord. Les coupes stratigraphiques permettent de constater la présence d'une couche d'argile au droit des puits RDN_P11 et RDN_P12, absente au droit du puits RDN_P13. Les puits RDN_P11 et RDN_P12 sont donc considérés comme étant dans un **aquifère granulaire captif**, alors que le puits RDN_P13 est dans un **aquifère granulaire libre**.

RDN_P11, RDN_P12 et RDN_P13

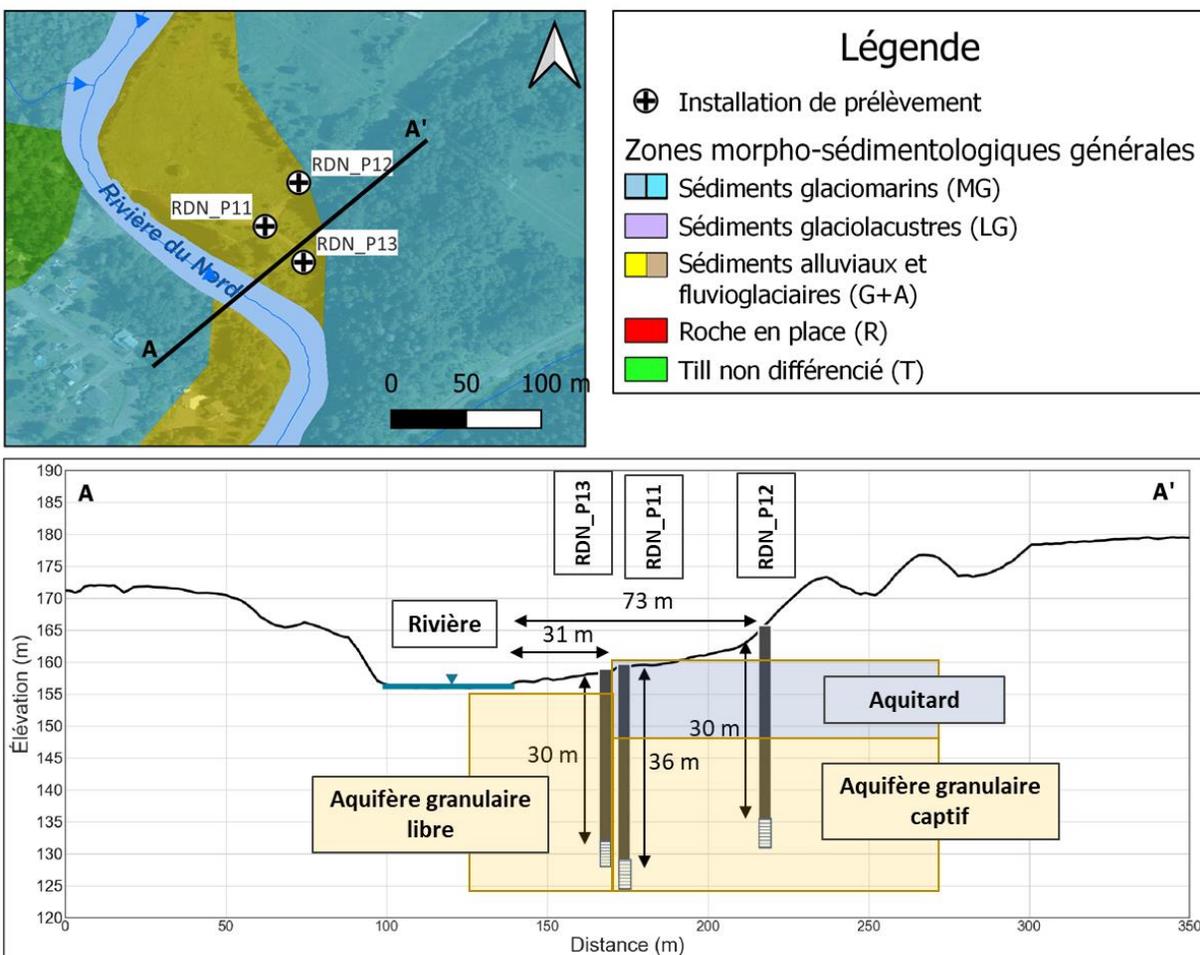


Figure 3-18 Localisation des sites de prélèvement RDN_P11 à RDN_P13 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données de conductivité électrique disponibles pour l'eau souterraine de l'installation **RDN_P11** couvrent la période de novembre 2019 à mai 2021 (Figure 3-19), et celles isotopiques de novembre 2019 à novembre 2020. On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,5 ‰ vs V-SMOW (N=29) et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 48 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=43) (Figure 3-19a).
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans la Figure 3-19b, est la même que celle des deux autres puits du secteur et centrée autour d'une valeur moyenne à [-76‰; -11,1‰ vs V-SMOW].
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est stable, avec une très légère variation du signal entre les mois d'août et de novembre 2020, semblable à la variation des deux autres puits du secteur en plus atténués (Figure 3-19c).
- Les valeurs de conductivité électrique de l'eau souterraine sont supérieures à celles des eaux de surface, avec des moyennes respectives de 850 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-19d).

RDN_P11

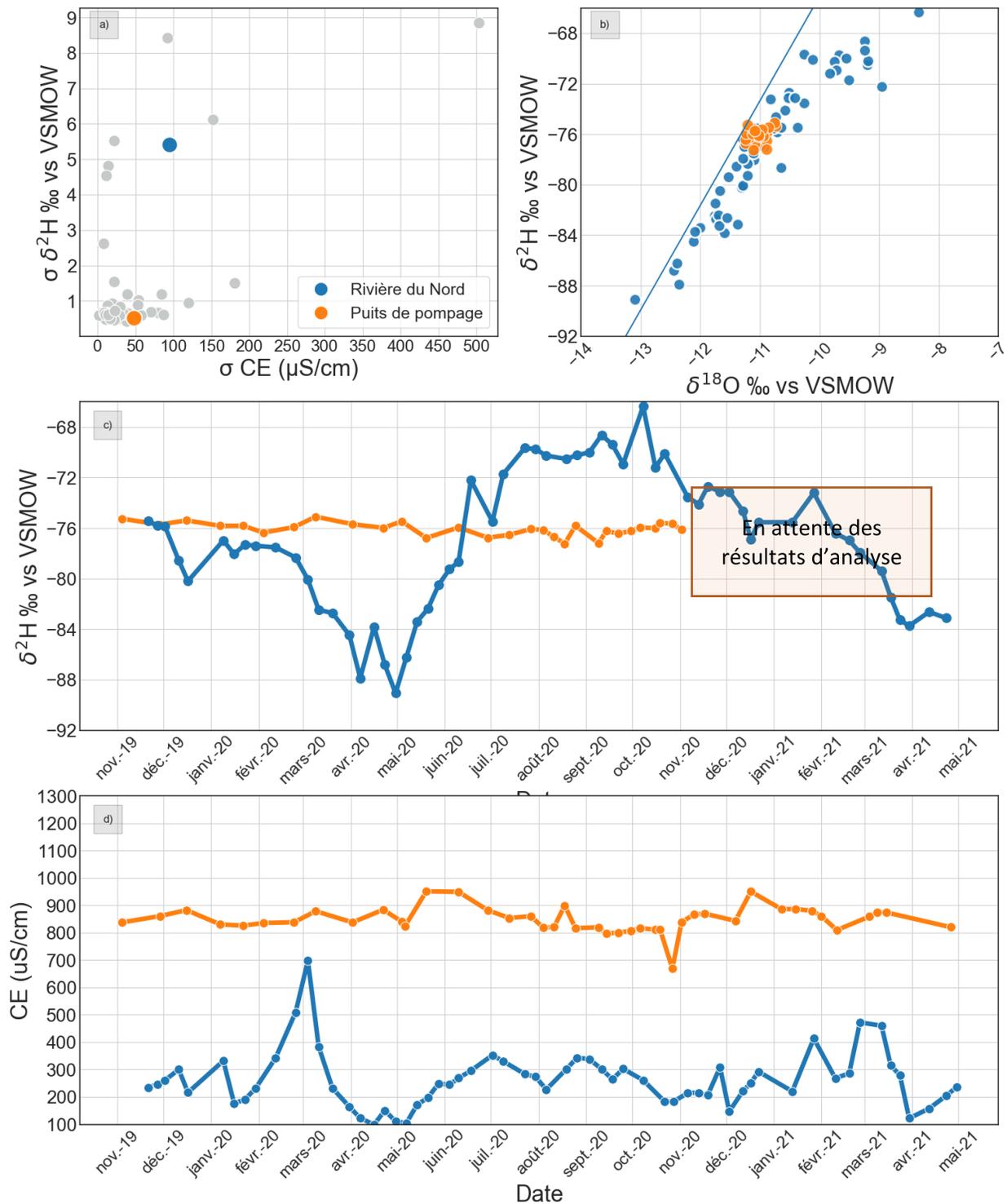


Figure 3-19 Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P11 : a) écarts-types observés dans le projet pour δ²H et EC; b) diagramme binaire δ²H vs δ¹⁸O; c) évolution temporelle de δ²H; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données de conductivité électrique disponibles pour l'eau souterraine de l'installation **RDN_P12** couvrent la période de novembre 2019 à mai 2021 -et les données isotopiques de novembre 2019 à novembre 2020. On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,6‰ vs V-SMOW (N=29) et sur les valeurs de conductivité électrique de 87 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=43) (Figure 3-20a).
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans la Figure 3-20b, est centrée autour d'une valeur moyenne à [-76‰; -11,1‰ vs V-SMOW].
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ présente un appauvrissement progressif de 1 à 2‰ vs V-SMOW durant la période d'étude (Figure 3-20c), avec une légère variation du signal entre les mois de mars 2020 et de juillet 2020.
- Les valeurs de conductivité électrique de l'eau souterraine sont nettement supérieures à celles des eaux de surface, avec des moyennes respectives de 1120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-20d). La diminution de la conductivité électrique au puits en mars 2020, suivie d'une augmentation en juillet (amplitudes respectives de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, semble corrélée avec le signal de l'eau de surface. Cependant, à la vue des gammes de variations présentes durant le reste de l'année, il est difficile d'apporter plus d'éléments.

RDN_P12

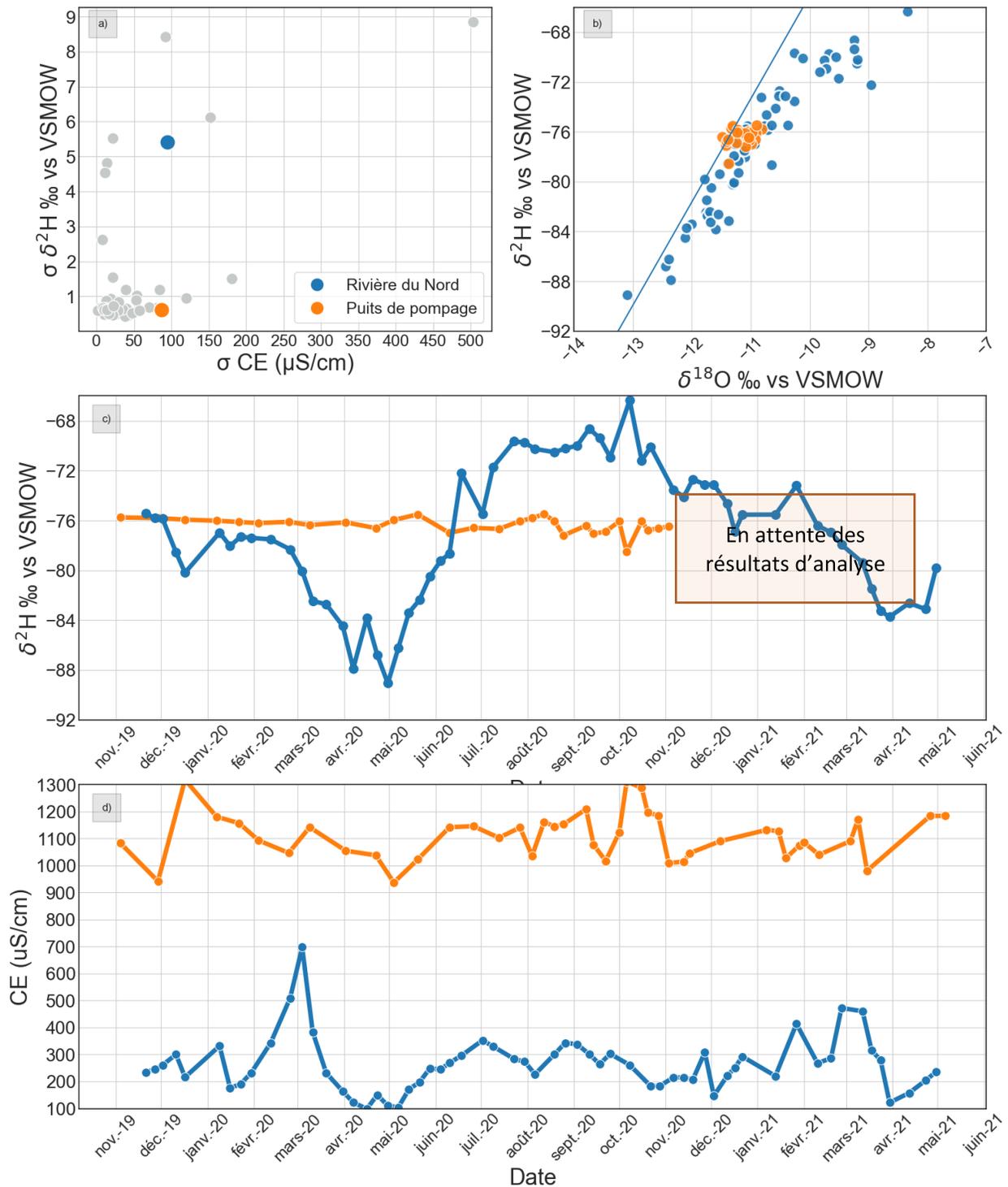


Figure 3-20 Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P12 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données de conductivité électrique disponibles pour l'eau souterraine du prélèvement **RDN_P13** couvrent la période de novembre 2019 à mai 2021 (Figure 3-21), et celles isotopiques de novembre 2019 à novembre 2020. On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,8 ‰ vs V-SMOW (N=28) et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=42) (Figure 3-21a).
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans la Figure 3-21b, est la même que celle des deux autres puits du secteur et centrés autour d'une valeur moyenne à [-76‰; -11,1‰ vs V-SMOW].
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est stable, avec une légère variation du signal entre les mois d'août et de novembre 2020, semblable à la variation des deux autres puits du secteur en plus marqués (Figure 3-21c).
- Les valeurs de conductivité électrique de l'eau souterraine sont supérieures à celles des eaux de surface, avec des moyennes respectives de 550 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-21d).

RDN_P13

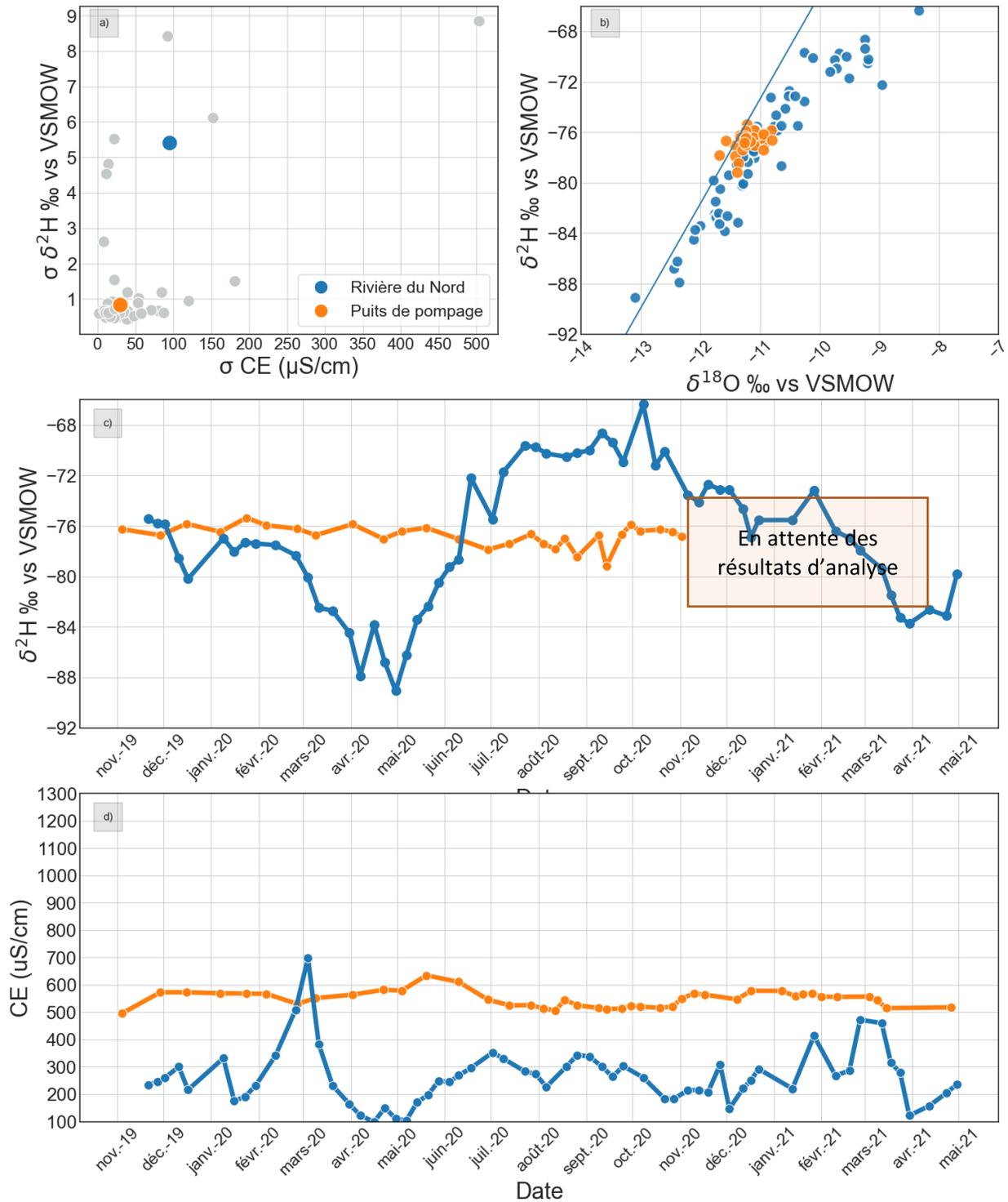


Figure 3-21 Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P13 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

3.3.1.7 RDN_P14 et RDN_P15

Caractérisation hydrogéologique

- Les captages RDN_P14 et RDN_P15 n'appartiennent pas à la même installation de prélèvement municipale, mais ils ne sont séparés que de 150 mètres et sont installés dans le même aquifère granulaire. L'installation RDN_P14 est composée d'une dizaine de puits verticaux d'environ **6 mètres de profondeur**, alignés entre la rivière du Nord et un bassin artificiel alimenté par les eaux de la rivière, à **6 mètres de distance** des deux eaux de surface. Le prélèvement RDN_P15 est installé à une **profondeur de 10 mètres**, à **29 mètres** de distance de la rivière du Nord. Les coupes stratigraphiques au droit des deux puits confirment l'absence de couche confinantes au sommet de l'aquifère, ces deux installations sont donc considérées comme étant dans **des aquifères granulaires libres**.

RDN_P14 et RDN_P15

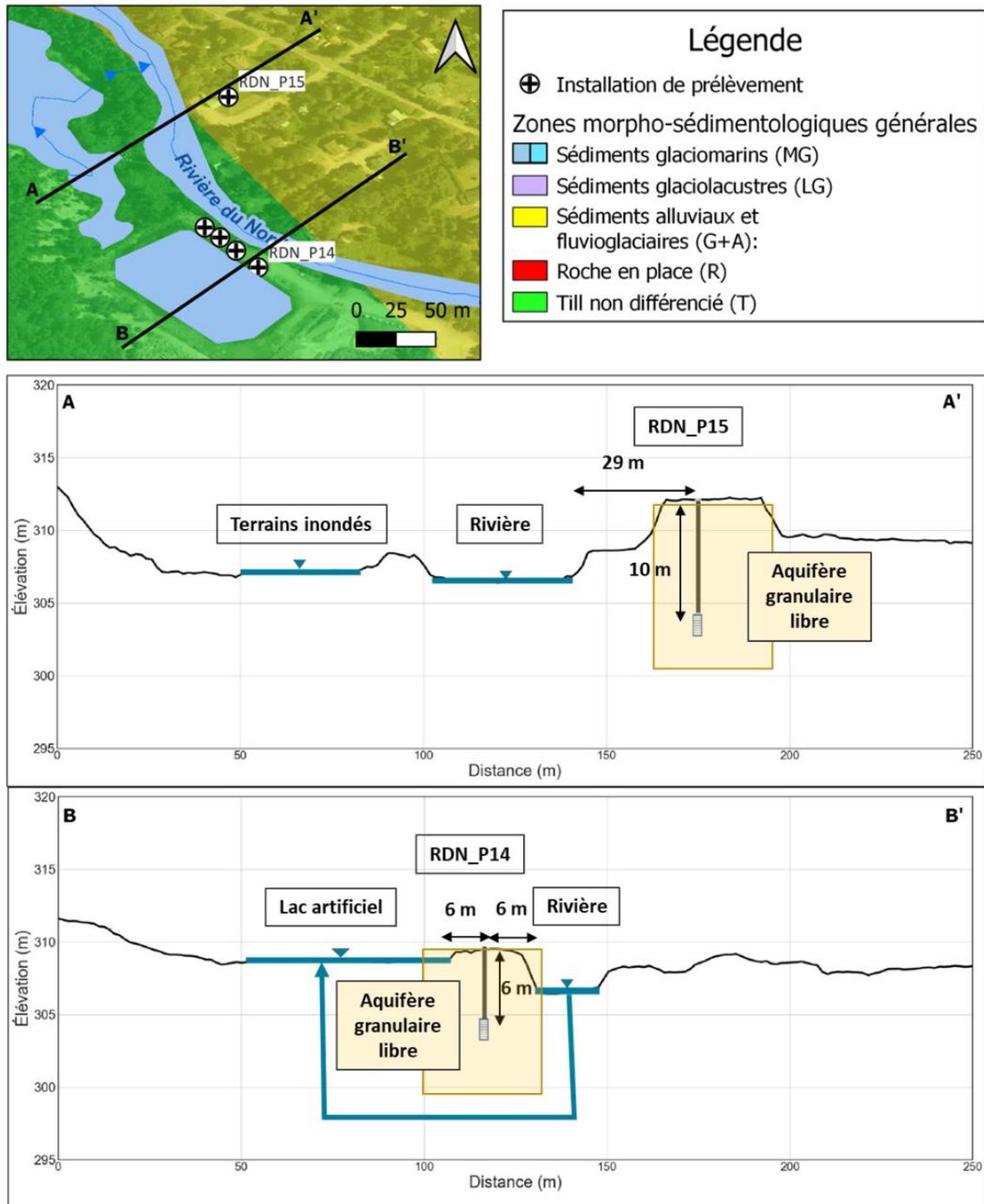


Figure 3-22 Localisation des sites de prélèvement RDN_P14 et RDN_P15 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les échantillons de l'installation **RDN_P14** ont été prélevés à l'eau brute à chaque puits séparément entre décembre 2019 et février 2020, et leurs résultats sont représentés sous forme de moyenne sur la Figure 3-23 . À partir du mois d'août 2020, les données présentées sont celles du mélange.
- Les données isotopiques et de la conductivité électrique disponibles pour l'eau souterraine couvrent la période de décembre 2019 à mai 2021. Noter qu'en raison de la pandémie de Covid-19, l'acquisition des données a été interrompue de janvier à août 2020, ce qui inclut une période propice à des forçages hydroclimatiques isotopiquement marqués par des eaux fortement appauvries, donc potentiellement utile pour les objectifs du présent projet. On observe tout de même un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 1,55 ‰ vs V-SMOW (N=41) et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 22,13 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=48) (Figure 3-23a).
- La distribution relativement large des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, depuis [-78‰; -11.3‰ vs-VSMOW] à [-72‰; -9.7‰ vs-VSMOW], se retrouve entièrement dans le domaine de variation des eaux de la rivière du Nord, c.A.D. proche de celui des précipitations, mais avec une signature sensiblement évaporée (Figure 3-23b).
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est assez marquée, avec un appauvrissement progressif de décembre 2019 à janvier 2020 (de -75 à -77‰ vs V-SMOW) suivi dans la deuxième période de données (juin 2020 à mars 2021), d'une remontée jusqu'à une valeur maximale de -72‰ en septembre 2020 suivie d'un appauvrissement progressif jusqu'à une valeur minimale autour de -78‰ vs V-SMOW à la fin de l'acquisition de données (Figure 3-23c). Malgré l'absence de données durant plus de 10 mois, l'inclusion des données dans le champ de variation de la rivière du Nord et le caractère possiblement synchrone avec les données de cette dernière permettent l'hypothèse d'une tendance évolutive similaire et marquée, avec un déphasage qui ne dépasserait pas 2 mois.
- Les valeurs de conductivité électrique de l'eau souterraine sont en deçà de celles de l'eau de surface. Avec une moyenne autour de 130 $\mu\text{S}/\text{cm}$ contre 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ pour la rivière du Nord, elles correspondent à la gamme des valeurs minimales de l'eau de surface. Une légère tendance évolutive se dénote, par exemple avec des évolutions rapides sous forme de pics de valeurs élevées en novembre et décembre 2020. Cependant, elles ne sont que ponctuelles (Figure 3-23d).

RDN_P14

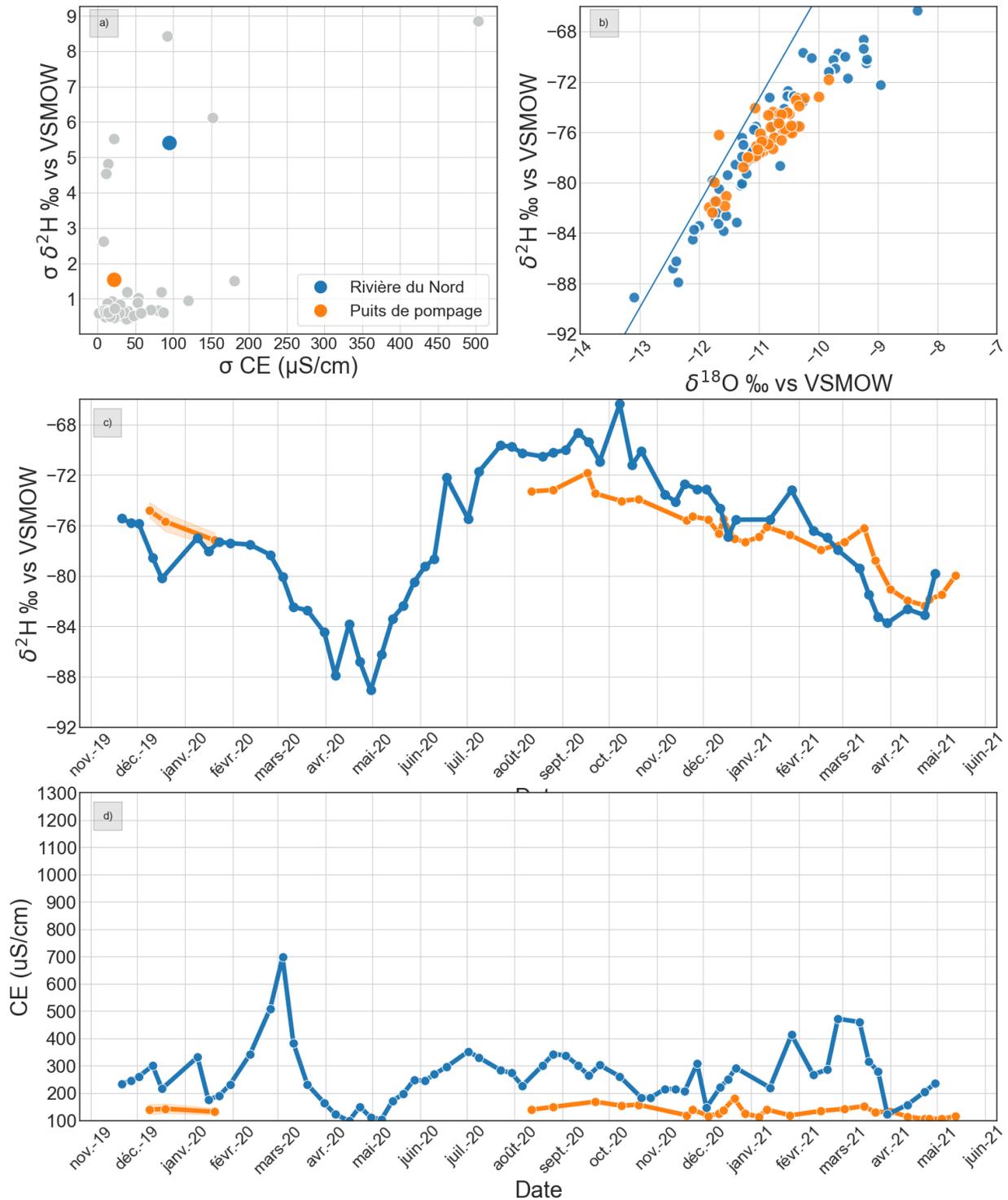


Figure 3-23 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P14 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les résultats des analyses disponibles pour l'eau souterraine de l'installation **RDN_P15** couvrent la période de décembre 2019 à janvier 2021, et les résultats d'analyses se poursuivent jusqu'en mai 2021 pour la conductivité électrique. Noter qu'en raison de la pandémie de Covid-19, l'acquisition des données a été interrompue entre mars et juin 2020, une période pourtant propice à des forçages hydroclimatiques et des eaux de surface isotopiquement marquées par les eaux de fontes (signature appauvrie), donc potentiellement utile pour les objectifs du présent projet. On observe tout de même un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 2,6 ‰ vs VSMOW (N=16) et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 7,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=28) (Figure 3-24).
- La distribution relativement large des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, depuis [-81‰; -11.7‰ vs-VSMOW] à [-73‰; -10.6‰ vs-VSMOW], se retrouve entièrement dans le domaine de variation des eaux de la rivière du Nord, c.-à.-d. proche de celui des précipitations, mais avec une signature légèrement évaporée (Figure 3-24b).
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est marquée, avec un appauvrissement progressif de décembre 2019 à mars 2020 (de -73 à -76‰ vs V-SMOW) suivi dans la deuxième période de données (juin à octobre 2020), d'un appauvrissement à une valeur minimale de -81‰ vs V-SMOW en juillet puis d'une remontée constante jusqu'à -76 ‰ vs V-SMOW en octobre 2020 (Figure 3-24c).
- Les valeurs de conductivité électrique de l'eau souterraine sont en deçà de celles de l'eau de surface. Avec une moyenne autour de 140 $\mu\text{S}/\text{cm}$ contre 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ pour la rivière du Nord, elles correspondent à la gamme des valeurs minimales de l'eau de surface. Aucune tendance évolutive pour la conductivité électrique ne se dessine à cette échelle d'observation (Figure 3-24d).

RDN_P15

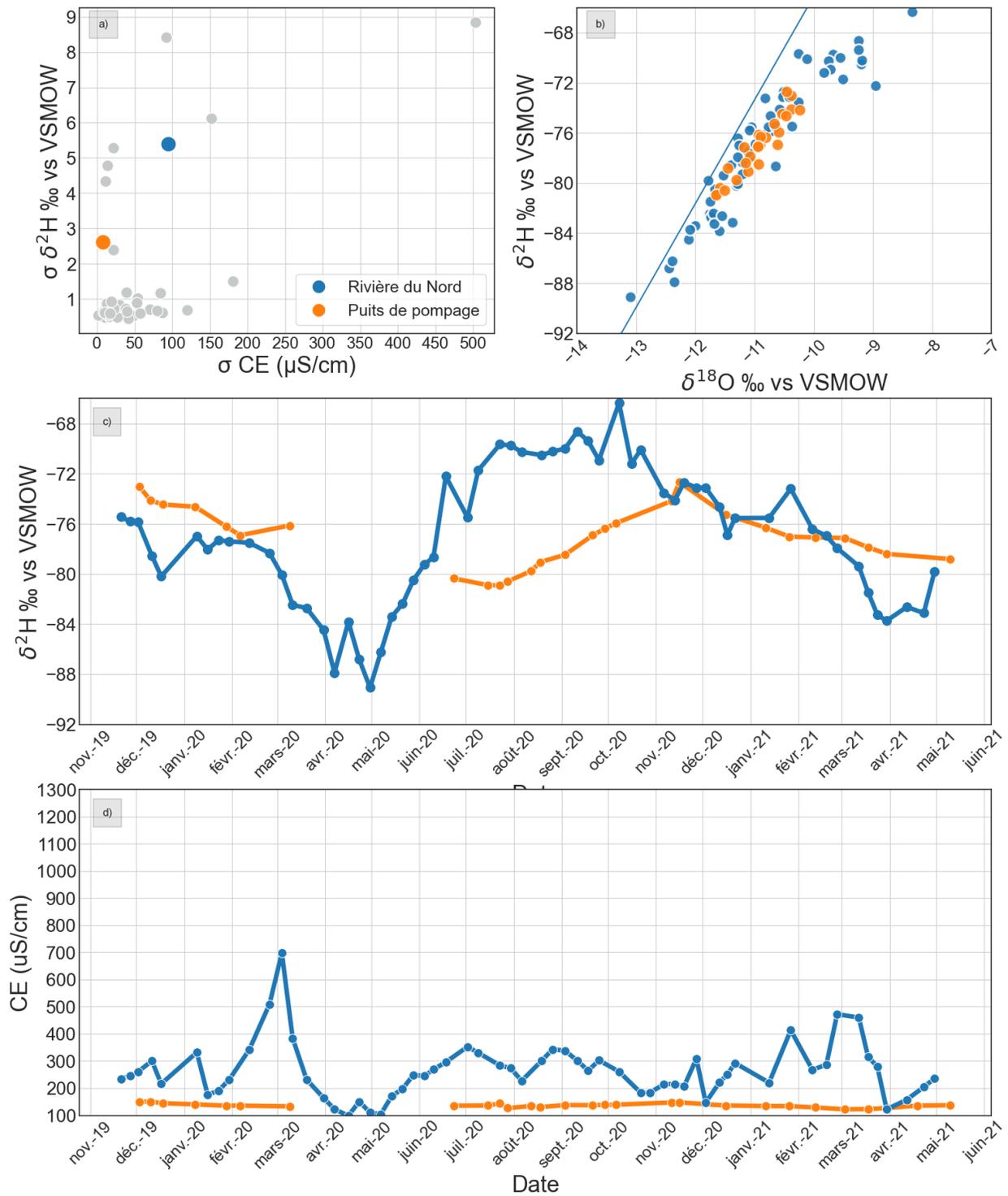
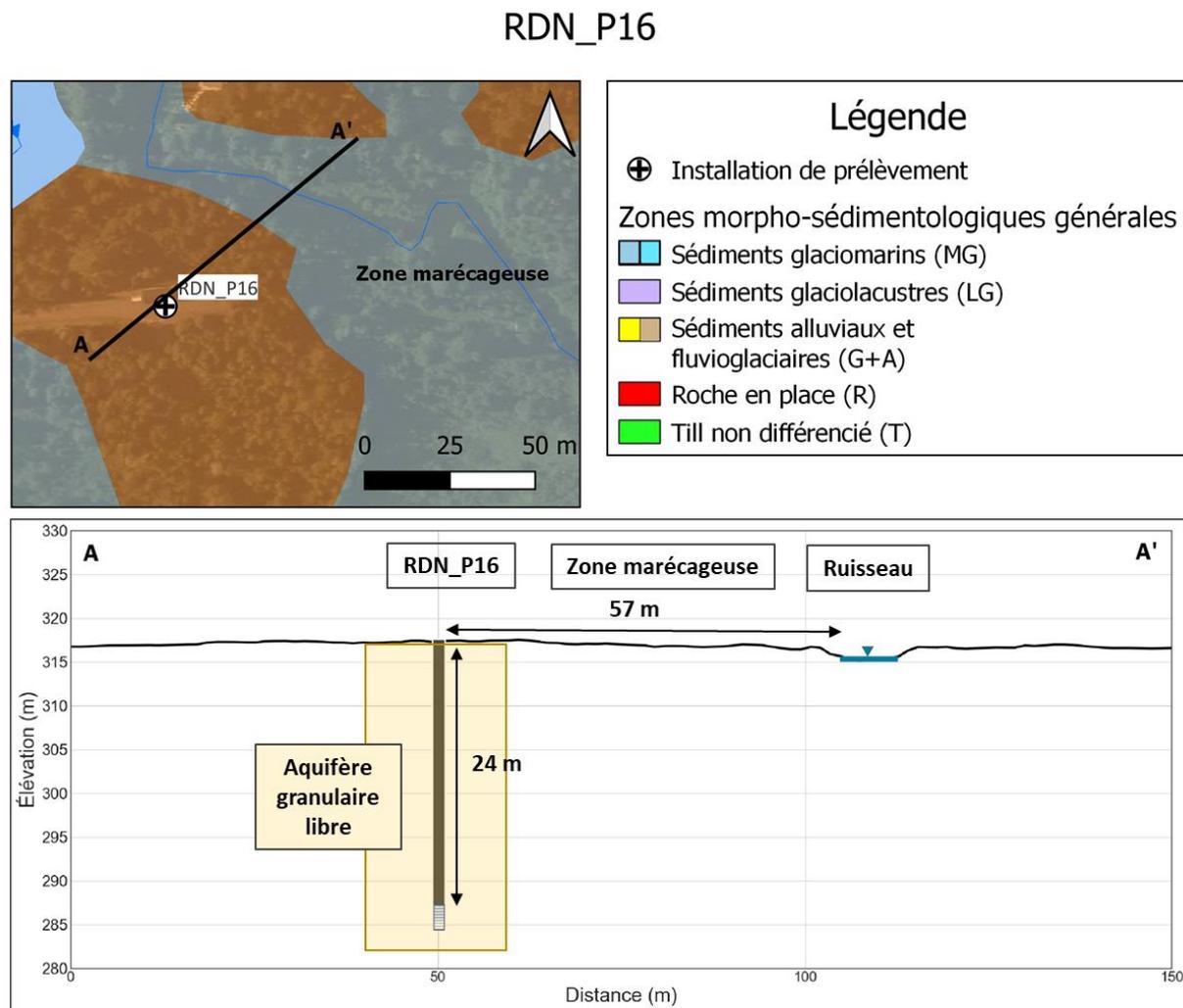


Figure 3-24 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P15 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

3.3.1.8 RDN_P16

Caractérisation hydrogéologique

- L'installation de prélèvement RDN_P16 est située à **57 mètres d'un ruisseau** affluent de la rivière du Nord et est aménagée à une **profondeur de 24 mètres** dans un aquifère granulaire. Le ruisseau n'ayant pas été échantillonné, le signal de la rivière du Nord est utilisé pour fins de comparaison. Les coupes stratigraphiques au droit du puits indiquent que l'installation est dans un **aquifère granulaire libre**.



Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données isotopiques et celles de la conductivité électrique de l'installation **RDN_P16** sont disponibles entre les mois de novembre 2019 et mai 2021, avec une interruption due à l'urgence sanitaire de Covid-19 entre les mois de mars et juillet 2020 (Figure 3-26). On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,6 ‰ vs V-SMOW (N=16) et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de seulement 2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=28) (Figure 3-26a).
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans la Figure 3-26b, est centrée autour de valeurs moyennes à [-76‰; -11,2‰ vs V-SMOW].
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ semble stable, avec une moyenne légèrement plus appauvrie que celle de l'eau de surface (-76‰; -74,5‰ vs V-SMOW) (Figure 3-26c).
- L'évolution temporelle de la conductivité électrique est stable, et la moyenne est plus faible que celle des eaux de surface, respectivement de 163 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 260 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-26d).

RDN_P16

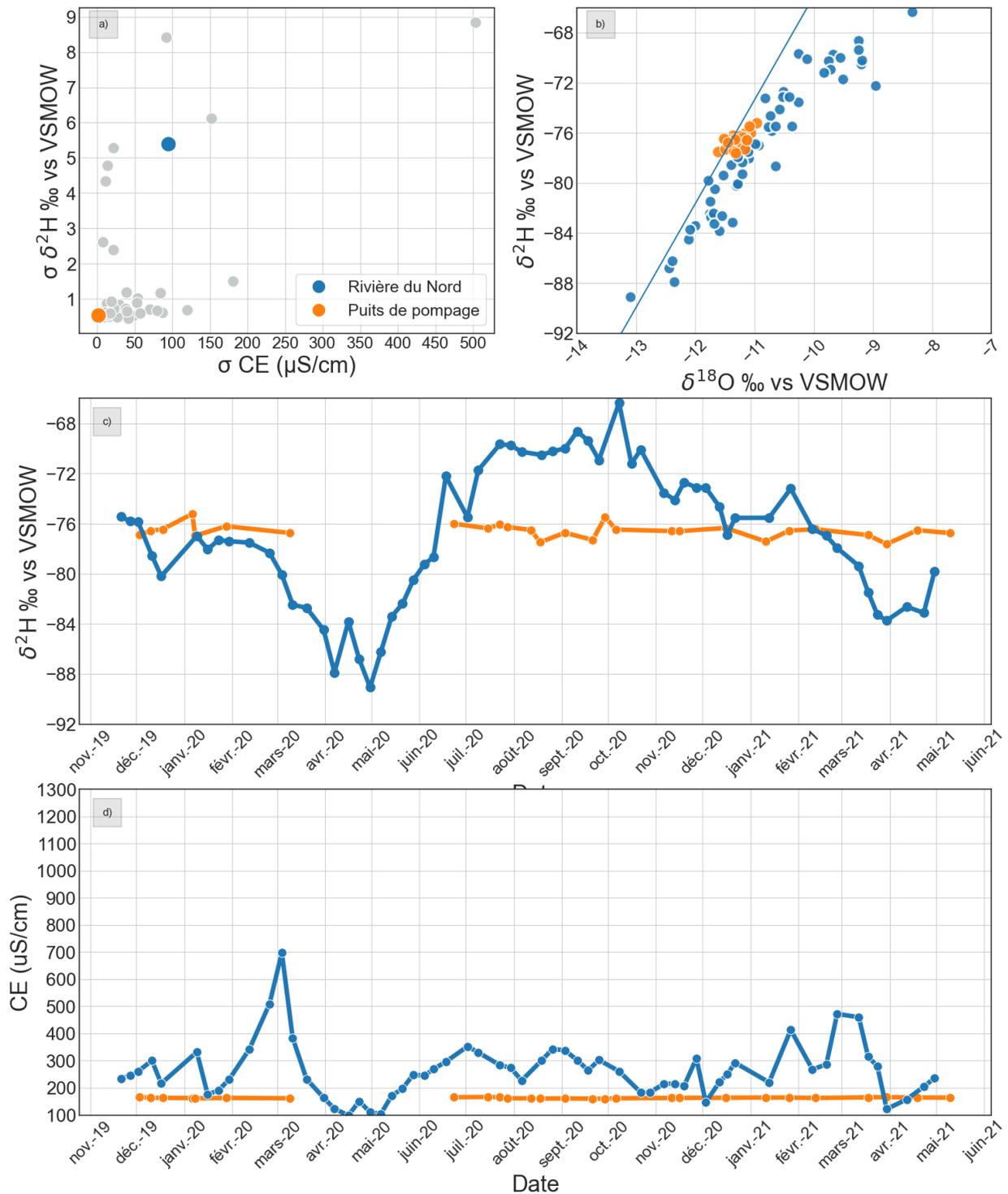


Figure 3-26 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P16 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

3.3.1.9 RDN_P17 et RDN_P18

Caractérisation hydrogéologique

- L'installation de captage RDN_P17 est située à **19 mètres de distance** de la rivière du Nord et est aménagée à une **profondeur de 17 mètres** dans un aquifère granulaire. Le plan d'eau situé au sud-ouest du site de captage semble être asséché depuis plusieurs années. L'installation de captage RDN_P18 est située à **19 mètres de distance** de la rivière du Nord et est aménagée à une **profondeur de 33 mètres** dans un aquifère granulaire. Les coupes stratigraphiques au droit du puits indiquent que les deux installations sont dans un **aquifère granulaire libre**.

RDN_P17 et RDN_P18

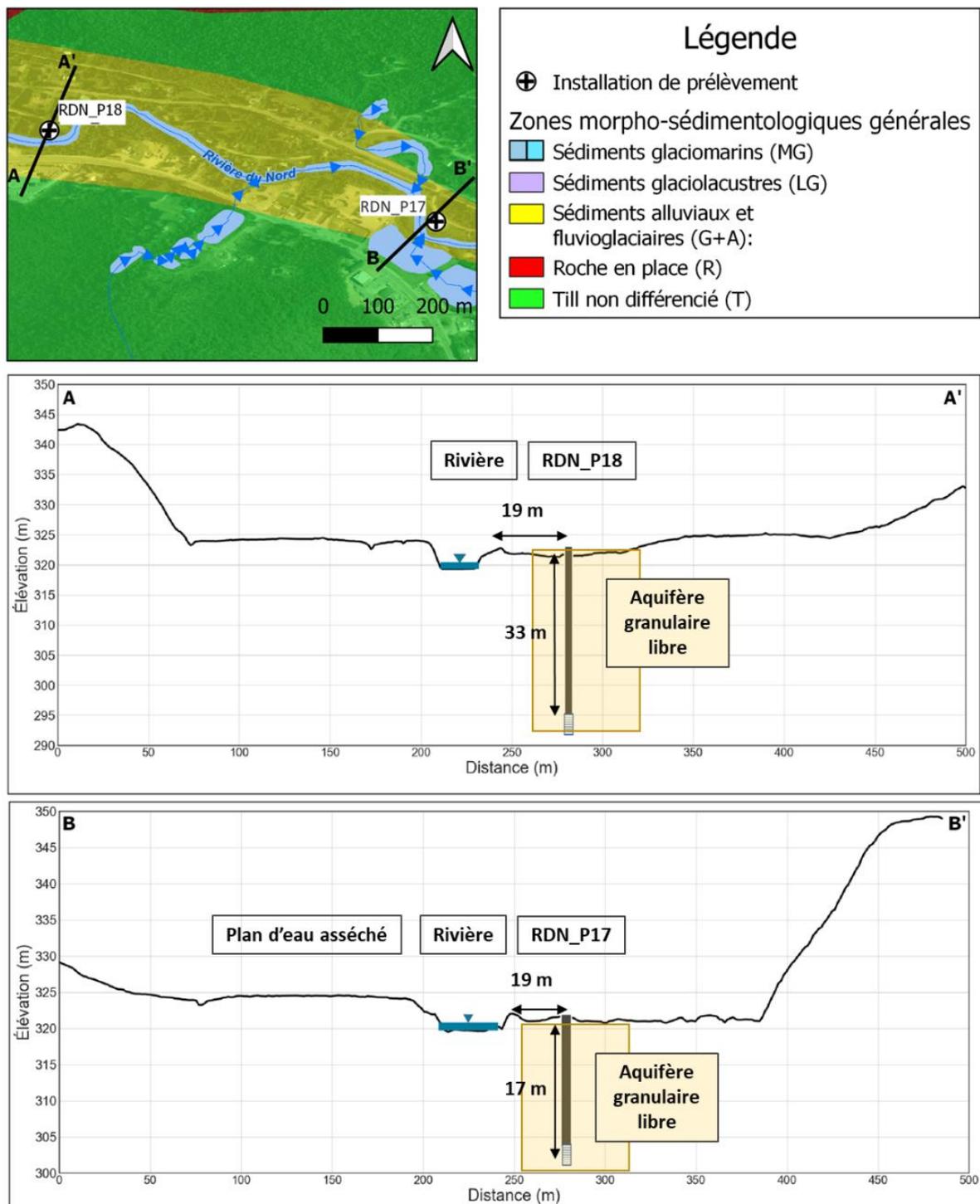


Figure 3-27 Localisation des sites de prélèvement RDN_P17 et RDN_P18 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données isotopiques et celles de la conductivité électrique du prélèvement **RDN_P17** sont disponibles entre les mois de novembre 2019 et mai 2021, avec une interruption due à l'urgence sanitaire de Covid-19 entre les mois de mars et juillet 2020 (Figure 3-28). On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,7 ‰ vs V-SMOW (N=21) et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 13 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=35) (Figure 3-28a)
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans la Figure 3-28b, est centrée autour de valeurs moyennes à [-76‰; -11‰ vs V-SMOW].
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ semble stable, avec une moyenne semblable à celle de l'eau de surface (-75,9‰; -74,5‰ vs V-SMOW] (Figure 3-28c)
- L'évolution temporelle de la conductivité électrique est stable, et la moyenne est semblable à celle des eaux de surface, respectivement de 320 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 260 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-28d).

RDN_P17

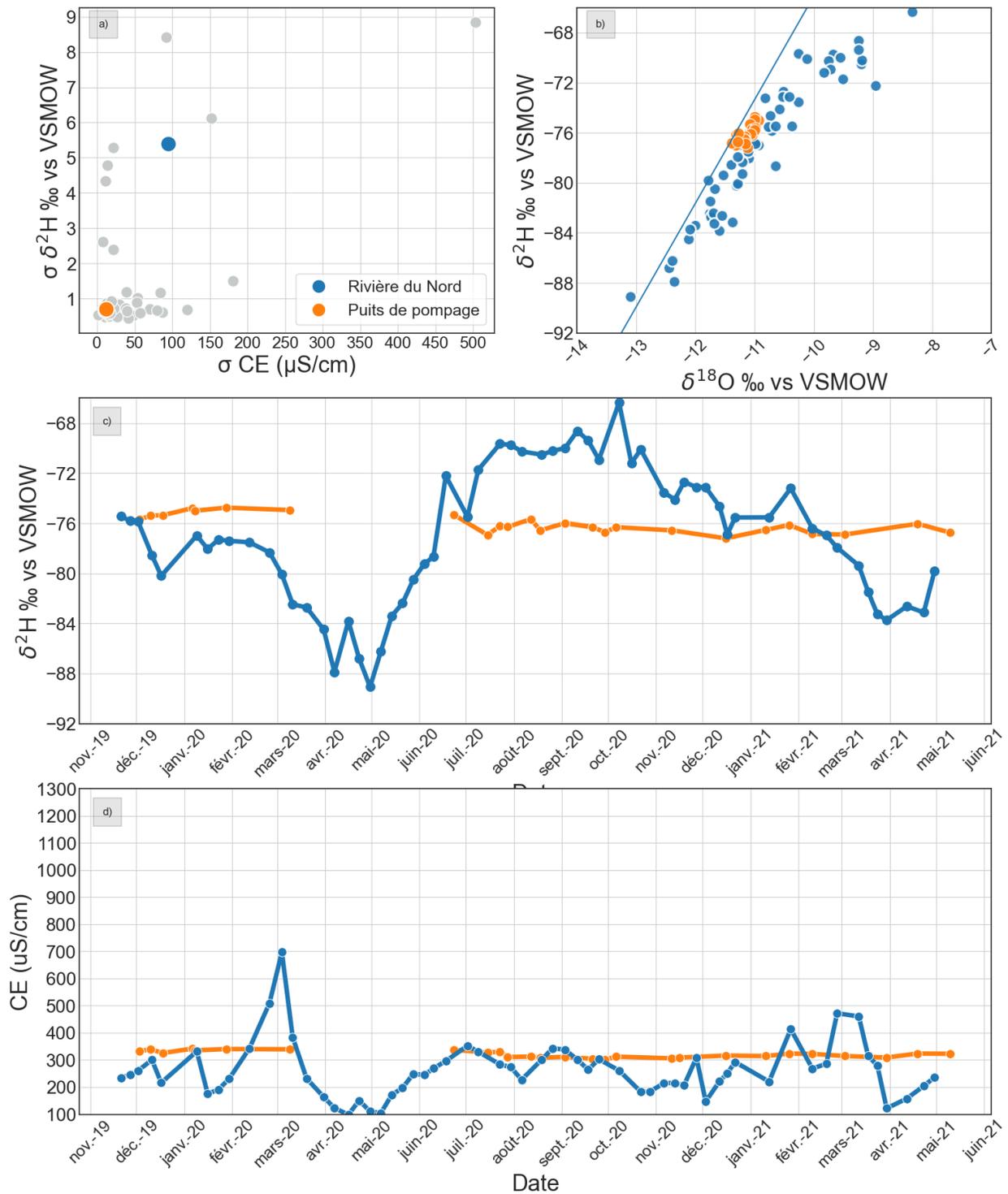


Figure 3-28 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P17 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données isotopiques et celles de la conductivité électrique du prélèvement **RDN_P18** sont disponibles entre les mois de novembre 2019 et mai 2021, avec une interruption due à l'urgence sanitaire de Covid-19 entre les mois de mars et juillet 2020 (Figure 3-29). On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,7 ‰ vs V-SMOW (N=21) et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=32) (Figure 3-29a).
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans la Figure 3-29b, est centrée autour de valeurs moyennes à [-77‰; -11,2‰ vs V-SMOW].
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ semble stable, avec une moyenne légèrement plus appauvrie que celle de l'eau de surface (-77‰; -74,5‰ vs V-SMOW] (Figure 3-29c). Un appauvrissement est identifiable à la mi-décembre 2019, soulevant le fait que les mois les plus propices à identifier des variations isotopiques, soit au printemps, sont manquants.
- L'évolution temporelle de la conductivité électrique est stable, et la moyenne est semblable à celle des eaux de surface, respectivement de 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 260 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-29d).

RDN_P18

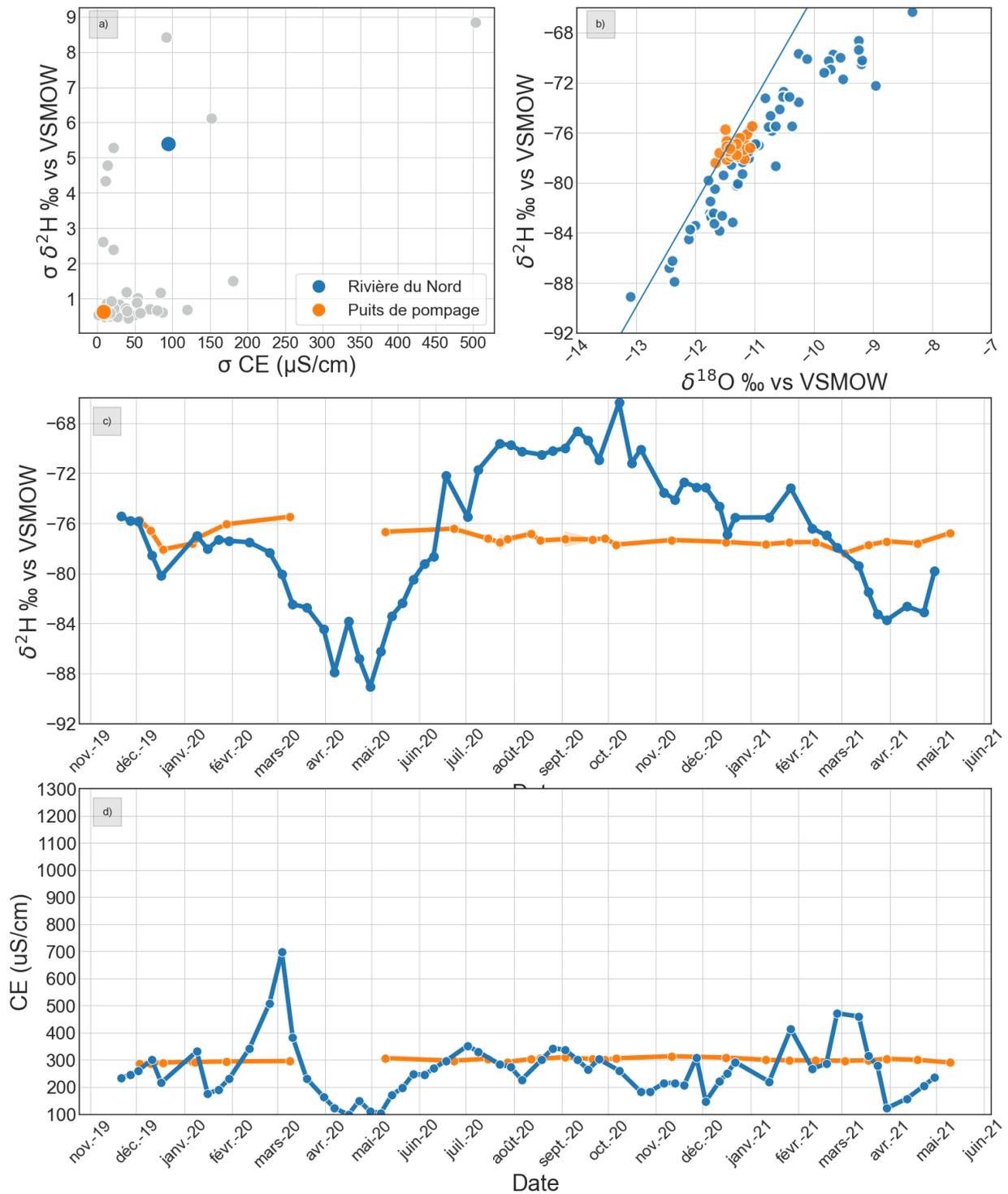


Figure 3-29 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P18 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

3.3.1.10 RDN_P19 et RDN_P20

Caractérisation hydrogéologique

- Les puits RDN_P19 et RDN_P20 sont aménagés à respectivement **30 mètres et 20 mètres de profondeur** dans le roc fracturé. Ces puits sont situés à **83 mètres de distance** du lac Ménard, qu'il n'a pas été possible d'échantillonner lors de ce projet. Comme les puits sont situés dans le bassin versant de la rivière du Nord, le signal de cette rivière a été utilisé.

RDN_P19 et RDN_P20

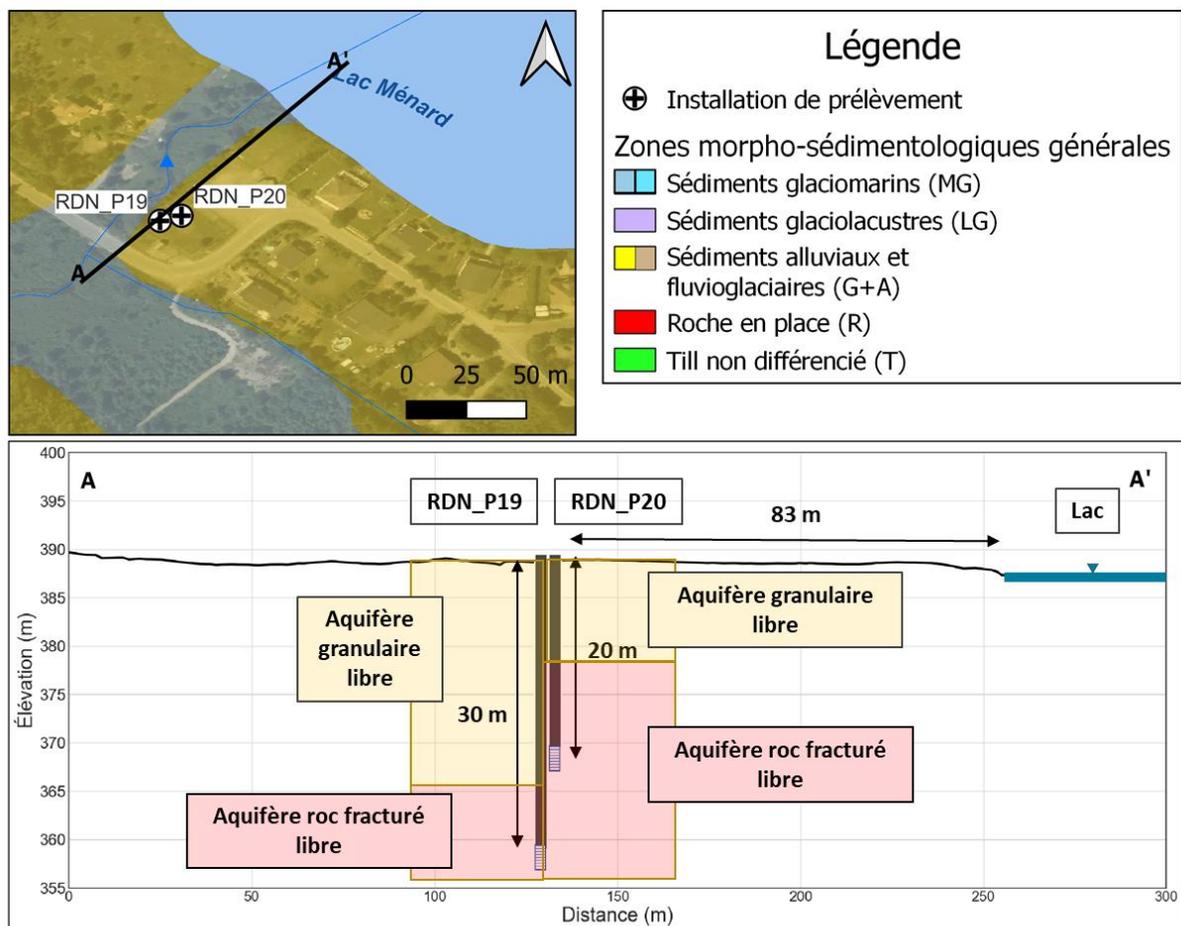


Figure 3-30 Localisation des sites de prélèvement RDN_P19 et RDN_P20 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données isotopiques et de la conductivité électrique disponibles pour l'eau souterraine du prélèvement **RDN_P19** couvrent la période de novembre 2019 à mars 2021 (Figure 3-31). On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,6 ‰ vs V-SMOW (N=28) et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=42) (Figure 3-31a).
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans b, est la même que le puits P02 du même secteur et est centrée autour d'une valeur moyenne à [-76,4‰; -11,5‰ vs V-SMOW].
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est stable, avec une moyenne légèrement plus enrichie que celle de l'eau de surface (-76,4‰; -74,5‰ vs V-SMOW]. (Figure 3-31c).
- Les valeurs de conductivité électrique de l'eau souterraine sont légèrement supérieures à celles des eaux de surface, avec des moyennes respectives de 430 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-31d). L'augmentation du signal du puits à la mi-mars 2020 semble reliée avec l'augmentation de la conductivité électrique dans la rivière.

RDN_P19

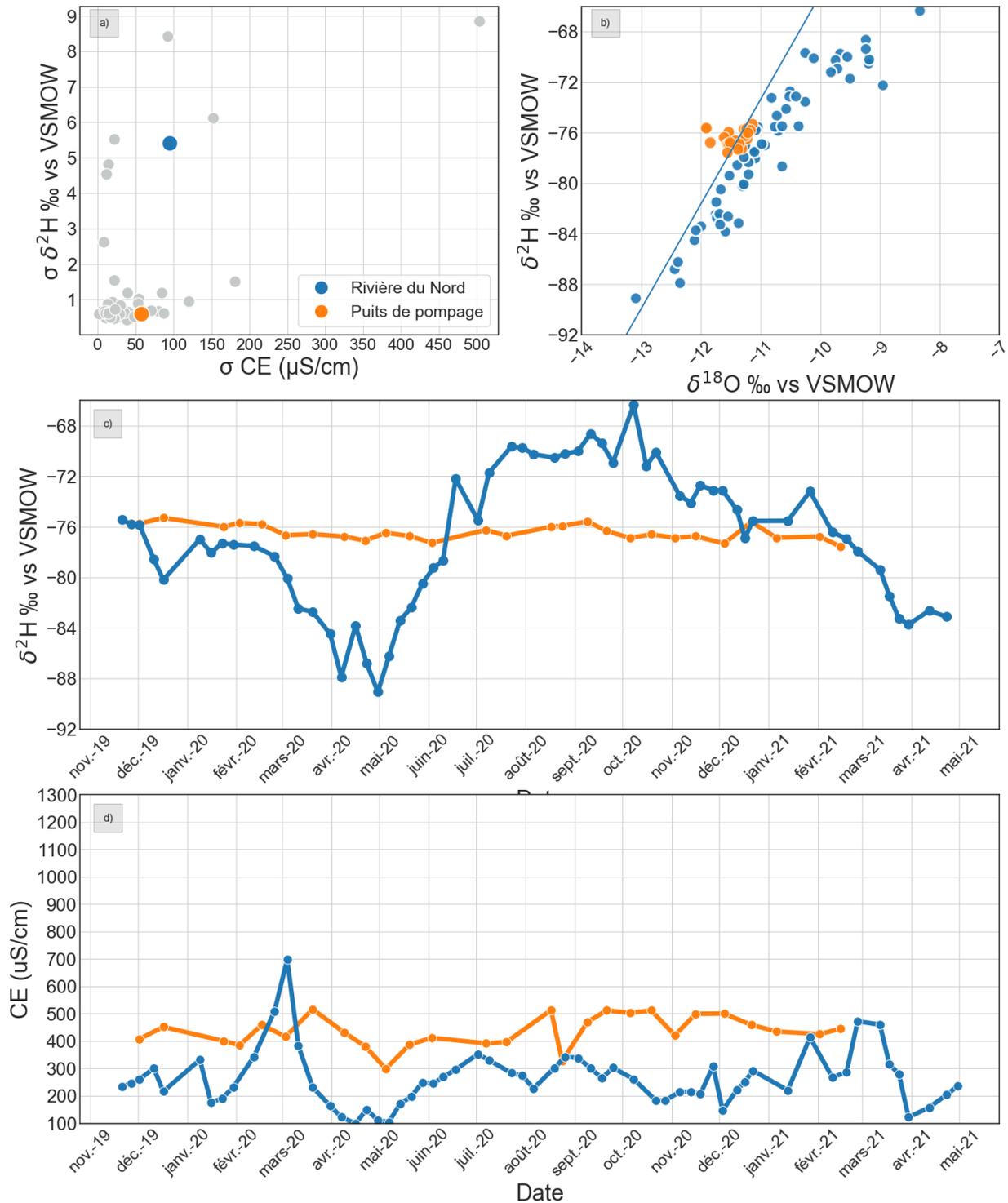


Figure 3-31 Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P19 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données isotopiques et de la conductivité électrique disponibles pour l'eau souterraine du prélèvement **RDN_P20** couvrent la période de novembre 2019 à mars 2021 (Figure 3-32). On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,6 ‰ vs V-SMOW (N=28) et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 28 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=42) (Figure 3-32a).
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans la Figure 3-32b, est la même que le puits P01 du même secteur et est centrée autour d'une valeur moyenne à [-76,4‰; -11,5‰ vs V-SMOW].
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est stable, avec une moyenne légèrement plus enrichie que celle de l'eau de surface (-76,4‰; -74,5‰ vs V-SMOW). (Figure 3-32d).
- Les valeurs de conductivité électrique de l'eau souterraine sont supérieures à celles des eaux de surface, avec des moyennes respectives de 510 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-32d).

RDN_P20

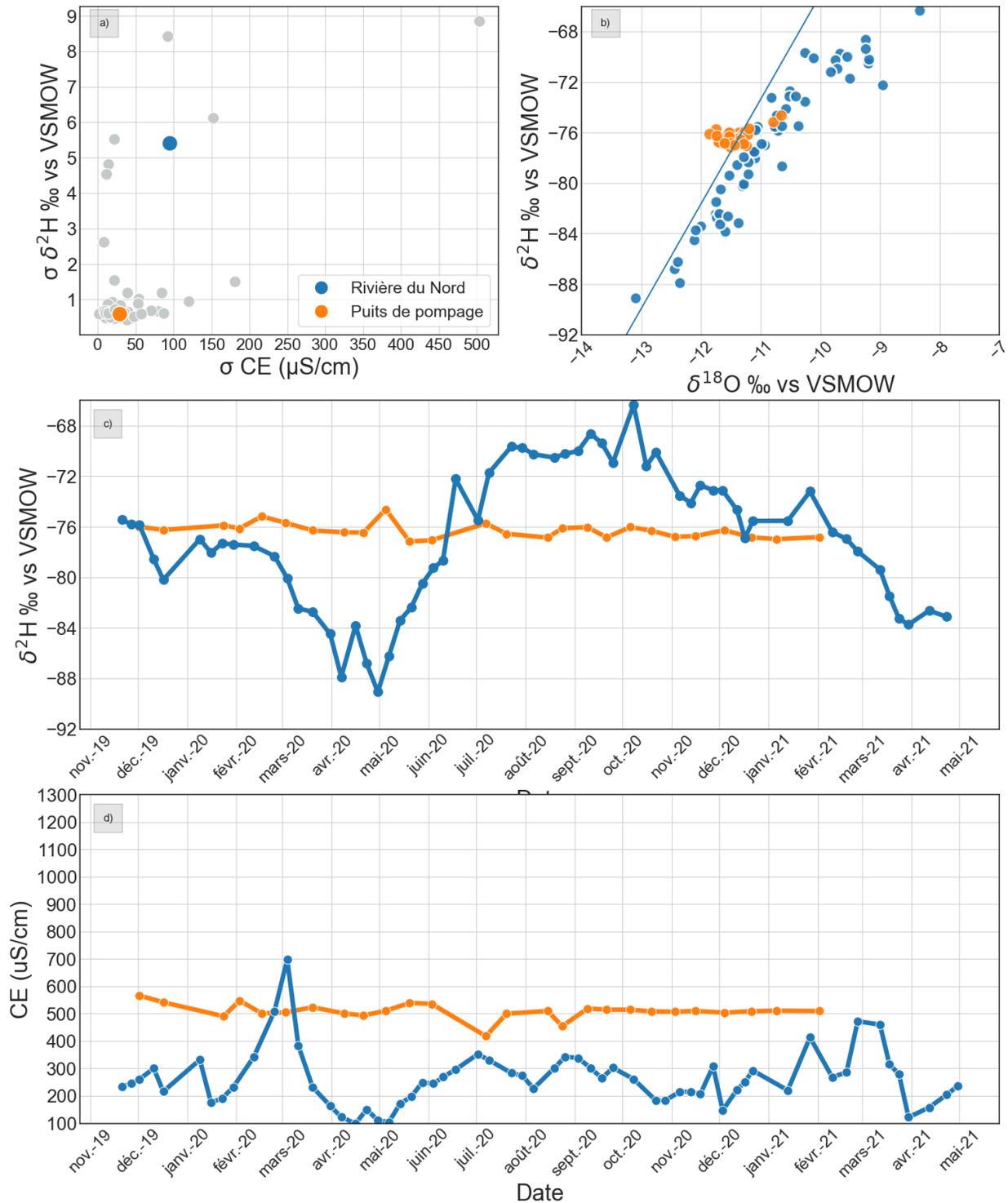


Figure 3-32 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement RDN_P20 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

3.3.2 Bassin versant de la rivière Rouge

Un total de 6 puits regroupés dans 3 municipalités différentes sont présents dans le bassin versant de la rivière Rouge. Les puits sont présentés en ordre alphabétique. Le signal de l'eau de surface présenté est celui du bassin versant de la rivière du Nord, aucun échantillon n'ayant été recueilli dans la rivière Rouge.

3.3.2.1 ROU_P01 et ROU_P02

Caractérisation hydrogéologique

- Le puits ROU_P01 est un puits au roc aménagé à une **profondeur de 35 mètres**. Le puits ROU_P02 est aménagé à une **profondeur de 30 mètres** dans un aquifère granulaire. Les deux puits sont installés à une **distance de 135 mètres** de la rivière Rouge. Cette rivière n'ayant pas été échantillonnée lors de ce projet, le signal de rivière du Nord est ici utilisé pour fins de comparaison. Les coupes stratigraphiques au droit des puits indiquent la présence d'une couche d'argile en surface, les puits ROU_P01 et ROU_P02 sont donc considérés être respectivement dans des **aquifères de roc fracturé captif et granulaire captifs**.

ROU_P01 et ROU_P02

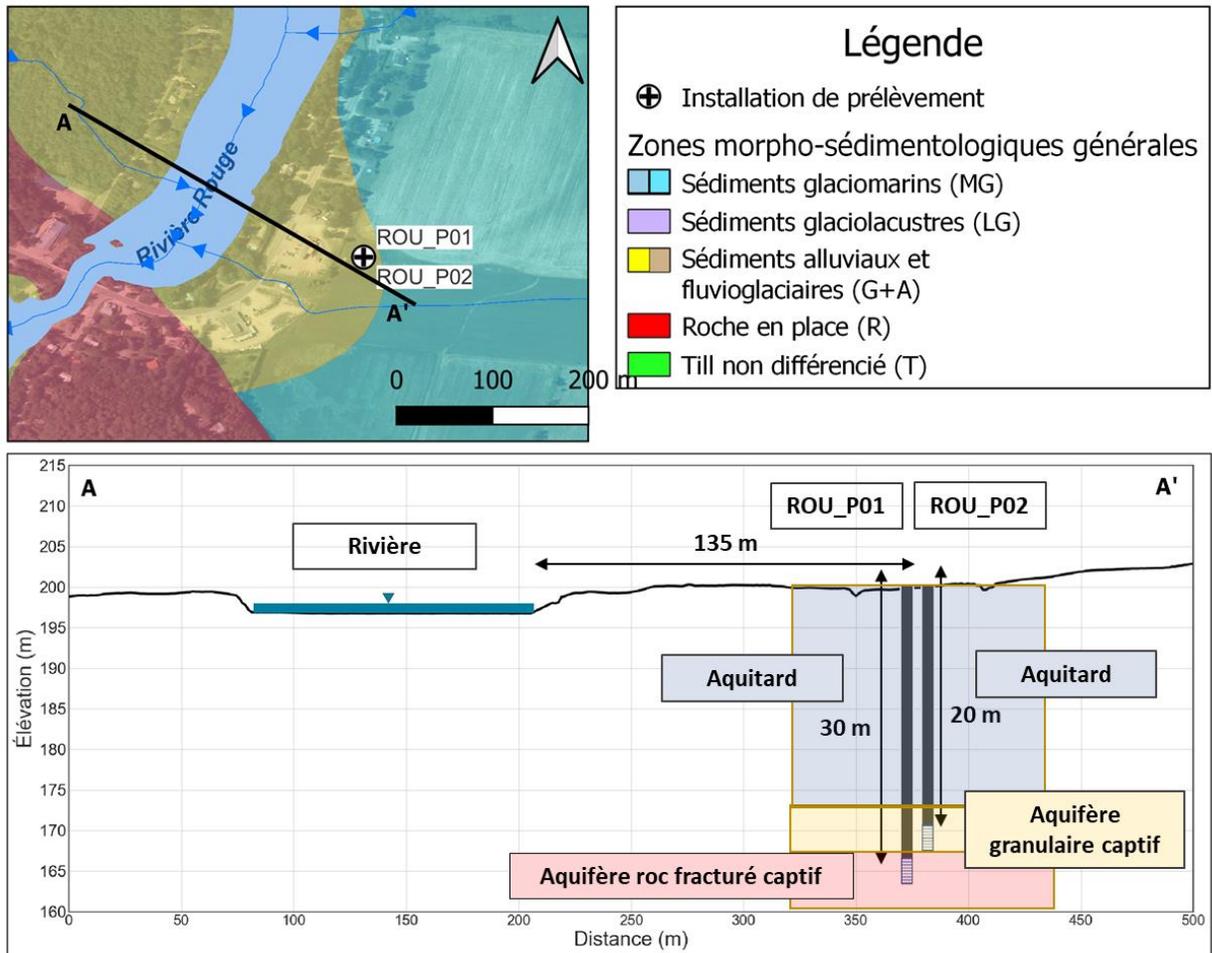


Figure 3-33 Localisation des sites de prélèvement ROU_P01 et ROU_P02 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données isotopiques et celles de la conductivité électrique disponibles pour l'eau souterraine du prélèvement **ROU_P01** couvrent la période de décembre 2019 à avril 2020 (Figure 3-34), avec un point en août 2020. On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,6 ‰ vs V-SMOW (N=39) et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 14 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=77) (Figure 3-34a).
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans la Figure 3-34b, est centrée autour de valeur moyenne à [-76‰; -11,1‰ vs V-SMOW].
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est stable, avec une moyenne à peine plus enrichie que celle de l'eau de surface (-76‰; -74,5‰ vs V-SMOW) (Figure 3-34c)
- La moyenne de la conductivité électrique est plus élevée que celle des eaux de surface, respectivement de 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 260 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-34d).

ROU_P01

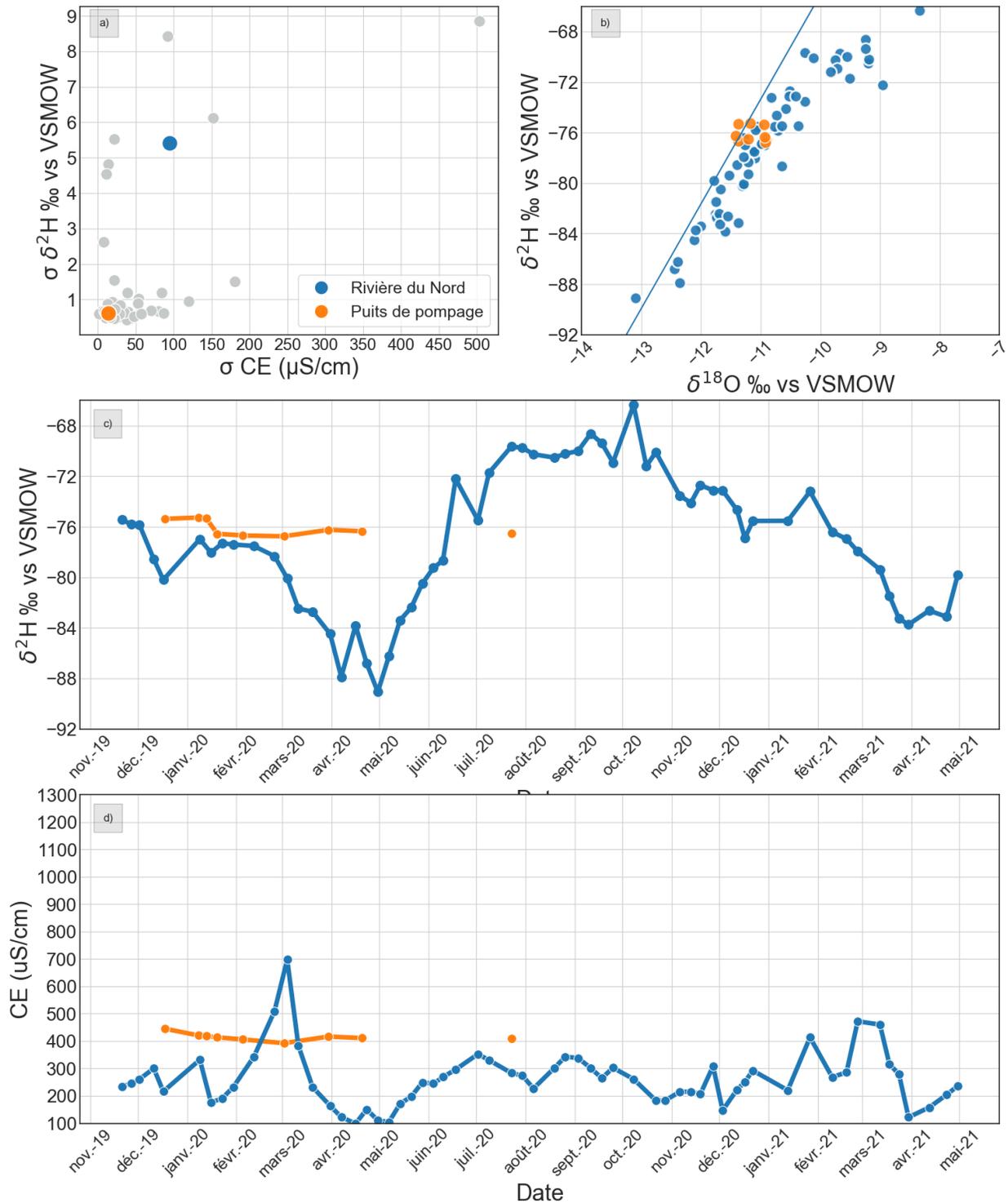


Figure 3-34 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement ROU_P01 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données isotopiques disponibles pour l'eau souterraine du prélèvement **ROU_P02** couvrent la période de décembre 2019 à décembre 2020 (Figure 3-34). Celles de la conductivité électrique couvrent la période de décembre 2019 à avril 2021. On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,7 ‰ vs V-SMOW (N=39) et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 23 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=77) (Figure 3-35a).
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans la Figure 3-35b, est centrée autour de valeur moyenne à [-76‰; -11,1‰ vs V-SMOW].
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est relativement stable, avec une moyenne à peine plus enrichie que celle de l'eau de surface (-76‰; -74,5‰ vs V-SMOW) (Figure 3-35c)
- La moyenne de la conductivité électrique est plus élevée que celle des eaux de surface, respectivement de 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 260 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-35d).

ROU_P02

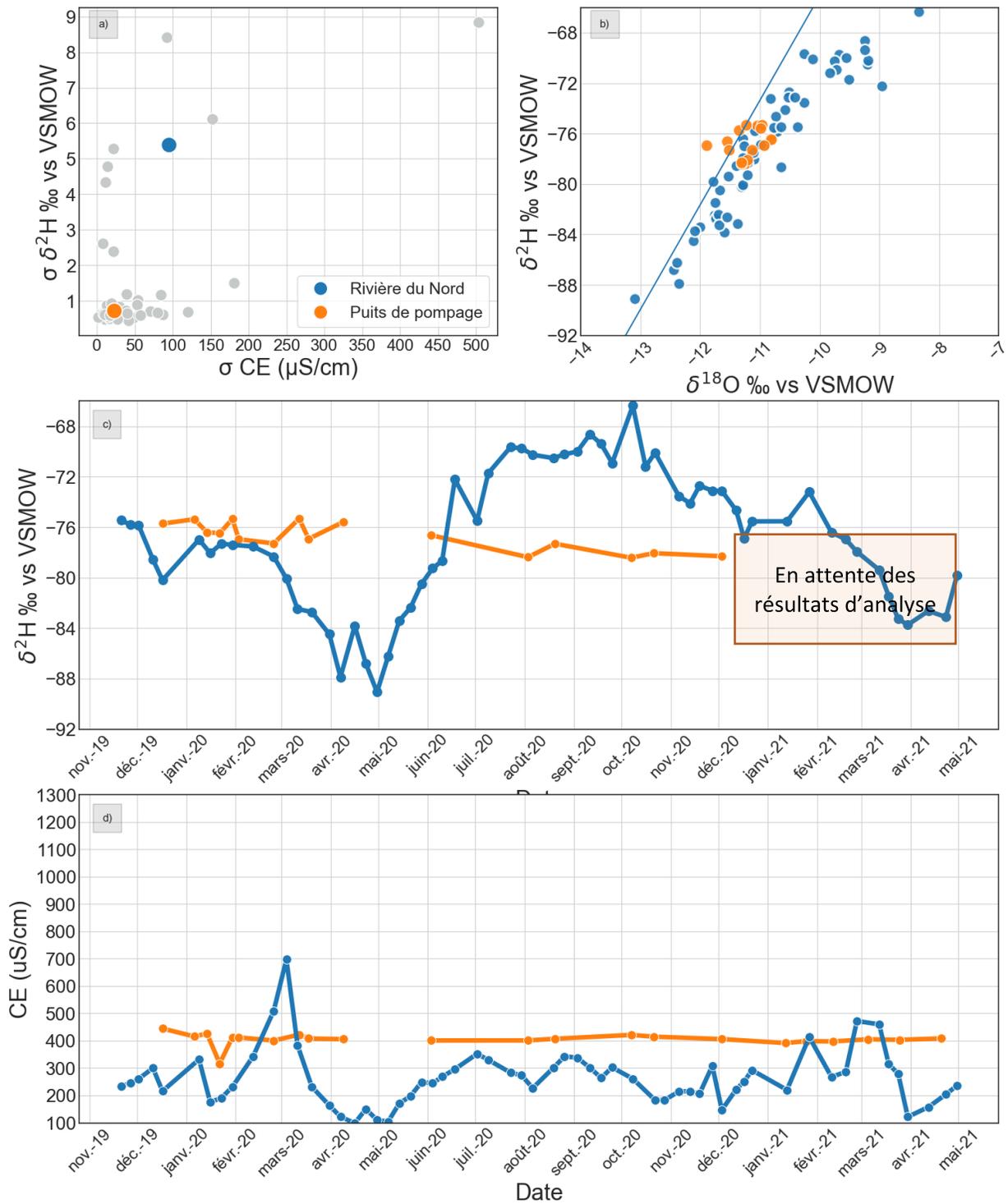


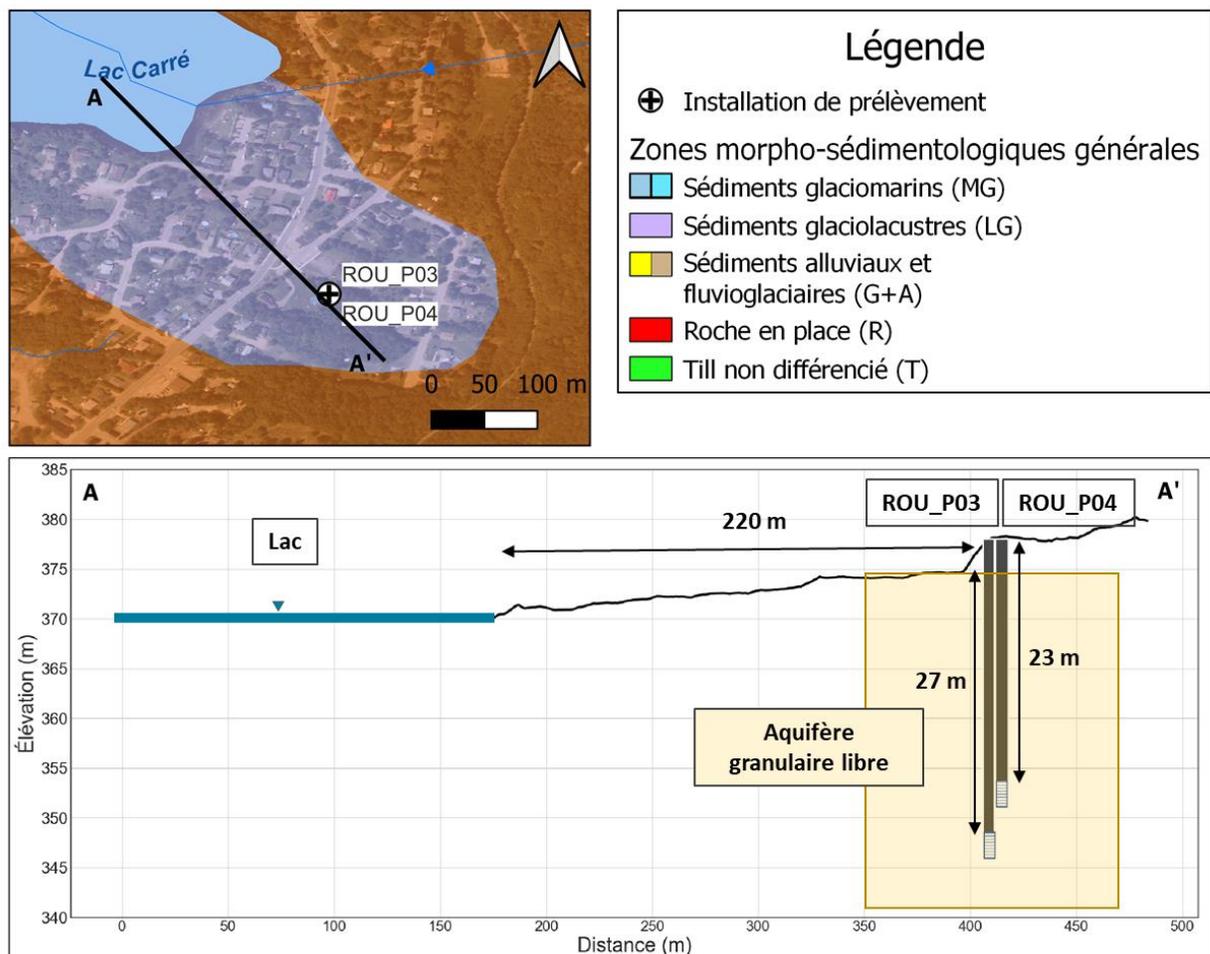
Figure 3-35 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement ROU_P02 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

3.3.2.2 ROU_P03 et ROU_P04

Caractérisation hydrogéologique

- Les puits ROU_P03 et ROU_P04 appartiennent à la même installation de captage et sont aménagés à des **profondeurs de 27 mètres et 23 mètres** respectivement, dans un aquifère granulaire, à une **distance de 220 mètres** du lac Carré. Ce lac n'ayant pas été échantillonné, le signal de la rivière du Nord est utilisé pour fins de comparaison. Les coupes stratigraphiques permettent d'identifier que les deux puits sont dans un **aquifère granulaire libre**.

ROU_P03 et ROU_P04



Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données isotopiques et celles de la conductivité électrique du prélèvement **ROU_P03** sont disponibles de façon continue pendant la période de septembre 2020 à mars 2021 (Figure 3-37 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement ROU_P03 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique), avec quelques données disparates entre novembre 2019 et septembre 2020. On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,6 ‰ vs V-SMOW (N=24) et sur les valeurs de conductivité électrique de 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=24) (Figure 3-37a).
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans la Figure 3-37b, est centrée autour de valeurs moyennes à [-79,8‰; -12‰ vs V-SMOW].
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ semble stable, malgré l'absence de données lors des saisons critiques comme le printemps, avec une moyenne plus appauvrie que celle de l'eau de surface (-79,8‰; -74,5‰ vs V-SMOW] (Figure 3-37c).
- L'évolution temporelle de la conductivité électrique est stable, et la moyenne est plus faible que celle des eaux de surface, respectivement de 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 260 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-37d).

ROU_P03

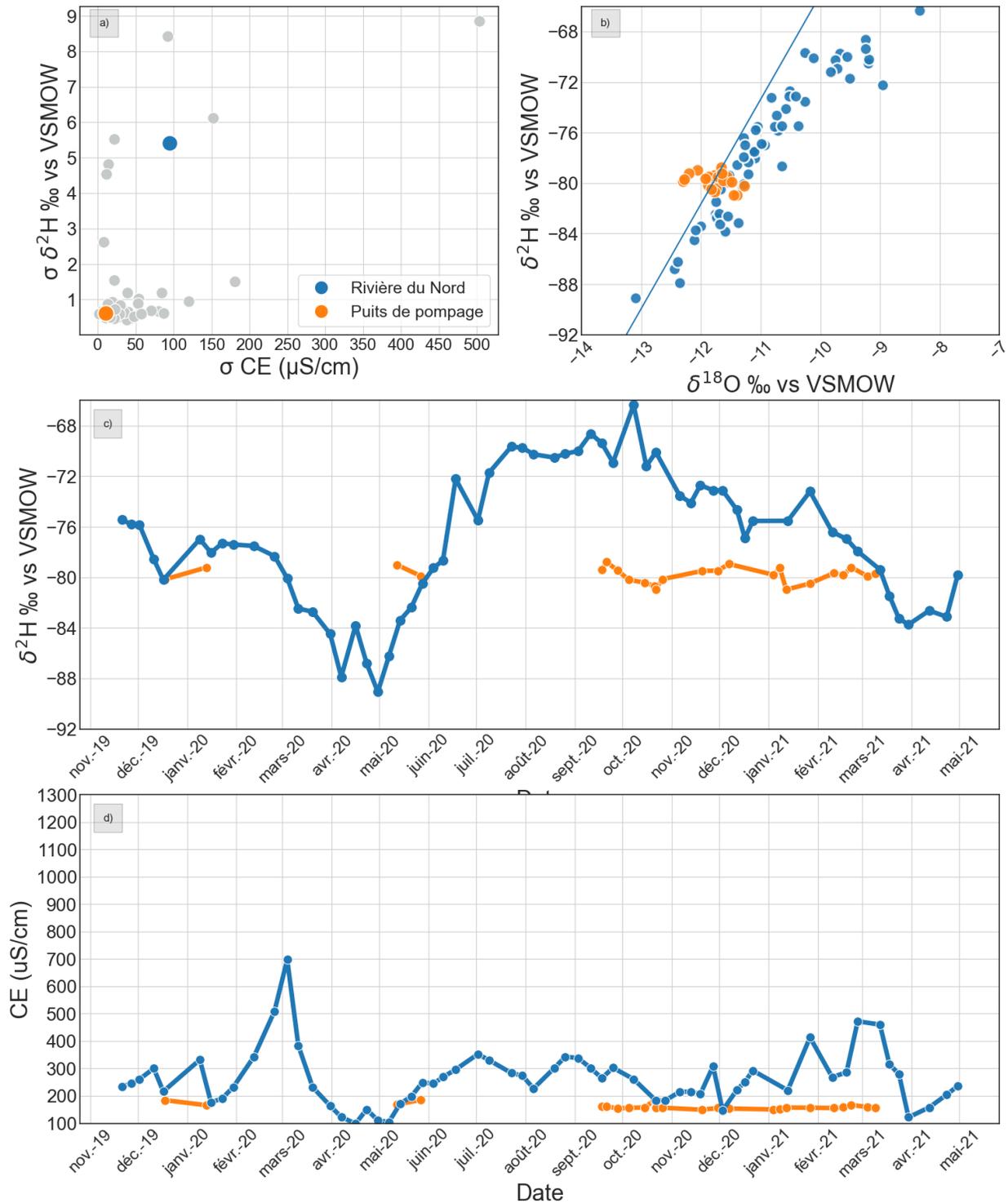


Figure 3-37 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement ROU_P03 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données isotopiques et celles de la conductivité électrique du prélèvement **ROU_P04** sont disponibles de façon continue entre novembre 2019 et juin 2020 ainsi qu'entre septembre 2020 à mars 2021 (Figure 3-38). On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,6 ‰ vs V-SMOW (N=27) et sur les valeurs de conductivité électrique de 16 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=27) (Figure 3-38a)
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans la Figure 3-38b, est centrée autour de valeurs moyennes à [-81‰; -12‰ vs V-SMOW].
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ semble stable, avec une moyenne plus appauvrie que celle de l'eau de surface (-81‰; -74,5‰ vs V-SMOW] (Figure 3-38c)
- L'évolution temporelle de la conductivité électrique est stable, et la moyenne est plus faible que celle des eaux de surface, respectivement de 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 260 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-38d).

ROU_P04

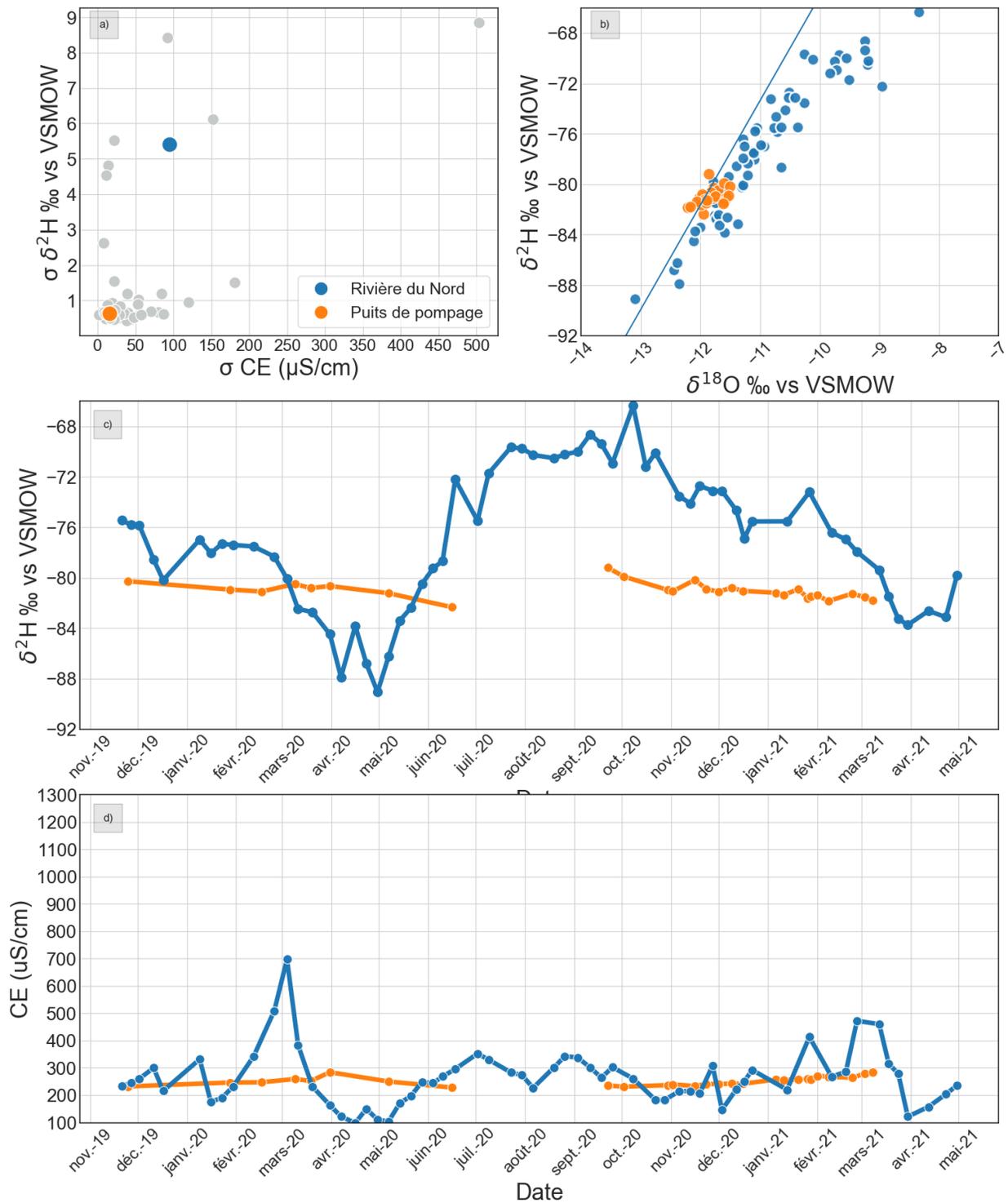


Figure 3-38 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement ROU_P04: a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

3.3.2.3 ROU_P05 et ROU_P06

Caractérisation hydrogéologique

- Les deux puits de pompage ROU_P05 et ROU_P06 sont aménagés à une **profondeur de 42 mètres** dans un aquifère granulaire, à **88 mètres de distance** de la rivière Rouge. Cette rivière n'ayant pas été échantillonnée lors de ce projet, le signal de rivière du Nord est ici utilisé pour fins de comparaison. Les coupes stratigraphiques au droit du puits permettent d'identifier la présence d'une couche confinante de silt argileux en surface, les puits sont donc considérés comme étant dans un **aquifère granulaire captif**.

ROU_P05 et ROU_P06

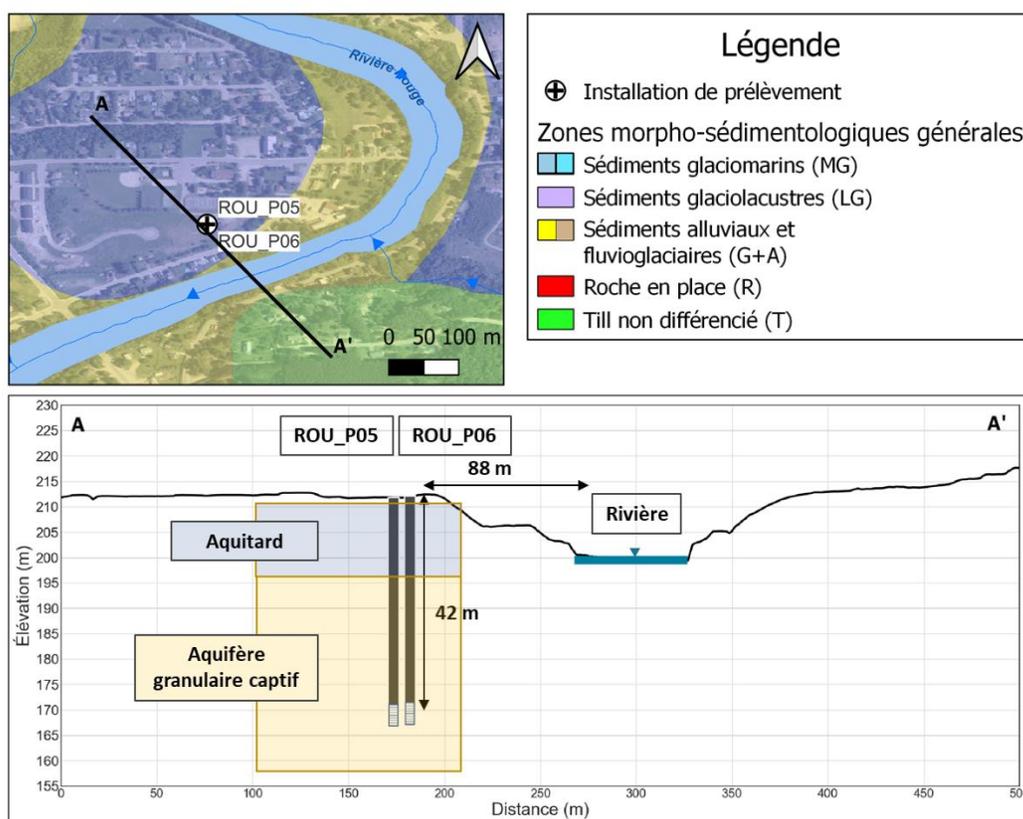


Figure 3-39 Localisation des sites de prélèvement ROU_P05 et ROU_P06 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données isotopiques et celles de la conductivité électrique disponibles pour l'eau souterraine du prélèvement **ROU_P05** couvrent la période de novembre 2019 à mars 2021 (Figure 3-40). On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,5 ‰ vs V-SMOW (N=18 et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 22 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=17) (Figure 3-40a).
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans la Figure 3-40b, est centrée autour de valeur moyenne à [-79‰; -11,5‰ vs V-SMOW].
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est relativement stable, avec une moyenne plus appauvrie que celle de l'eau de surface (-79,3‰; -74,5‰ vs V-SMOW] (Figure 3-40c)
- La moyenne de la conductivité électrique est plus élevée que celle des eaux de surface, respectivement de 615 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 260 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-40d).

ROU_P05

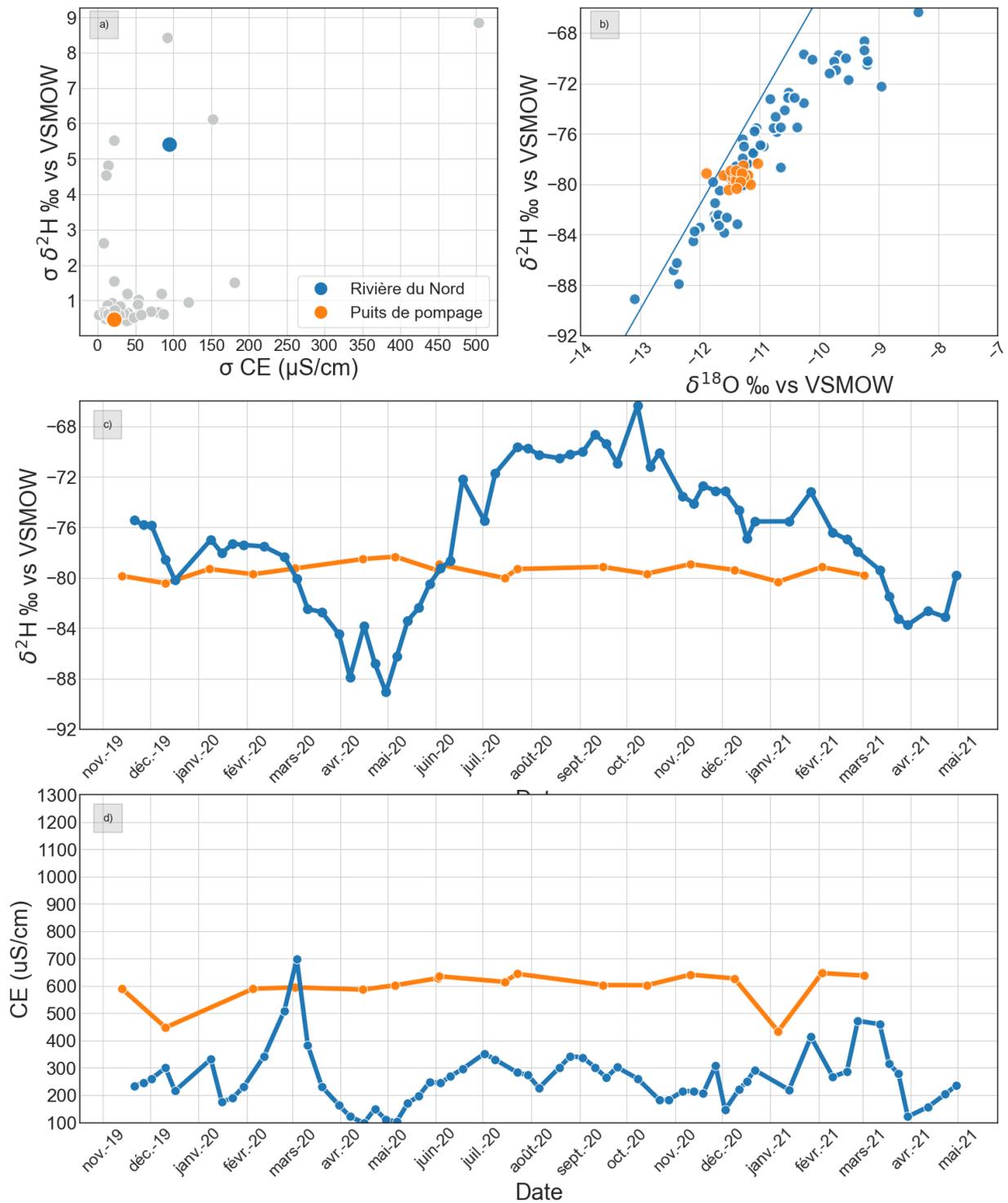


Figure 3-40 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement ROU_P05 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données isotopiques et celles de la conductivité électrique disponibles pour l'eau souterraine du prélèvement **ROU_P06** couvrent la période de novembre 2019 à mars 2021 (Figure 3-41). On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,5 ‰ vs V-SMOW (N=15) et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 16 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=16) (Figure 3-41a).
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans Figure 3-41b, est centrée autour de valeur moyenne à [-80‰; -11,5‰ vs V-SMOW].
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est relativement stable, avec une moyenne plus appauvrie que celle de l'eau de surface (-80,1‰; -74,5‰ vs V-SMOW] (Figure 3-41c)
- La moyenne de la conductivité électrique est un peu plus élevée que celle des eaux de surface, respectivement de 420 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 260 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-41d)

ROU_P06

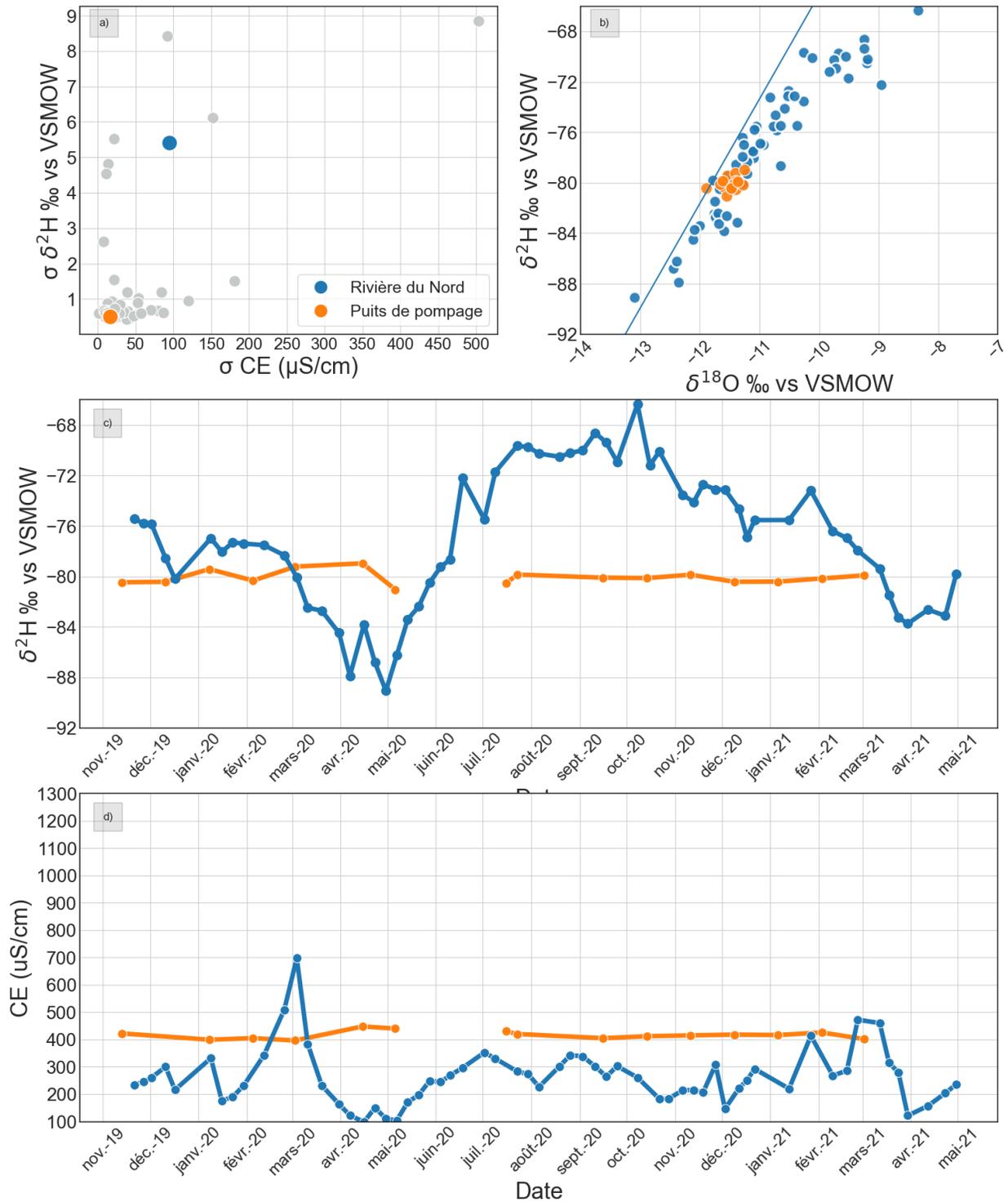


Figure 3-41 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement ROU_P06 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

3.3.3 Bassin versant de la rivière des Mille-Îles

Un total de 2 installations de captage d'eau souterraine regroupées dans une municipalité sont présentes dans le bassin versant de la rivière des Mille-Îles.

3.3.3.1 MIL_P01

Caractérisation hydrogéologique

- Le prélèvement MIL_P01 consiste en 2 puits, dont le mélange a été échantillonné pour le présent projet. Le puits 1 est d'une profondeur de **38 mètres dans le roc** et il est situé à **28 mètres de distance** de la Belle Rivière. Les documents consultés ne rapportaient aucune information décrivant les caractéristiques du puits 2. Les coupes stratigraphiques au droit du puits 1 permettent d'identifier une couche d'argile en surface, ce puits est donc considéré comme étant dans un **aquifère de roc fracturé captif**.

MIL_P01

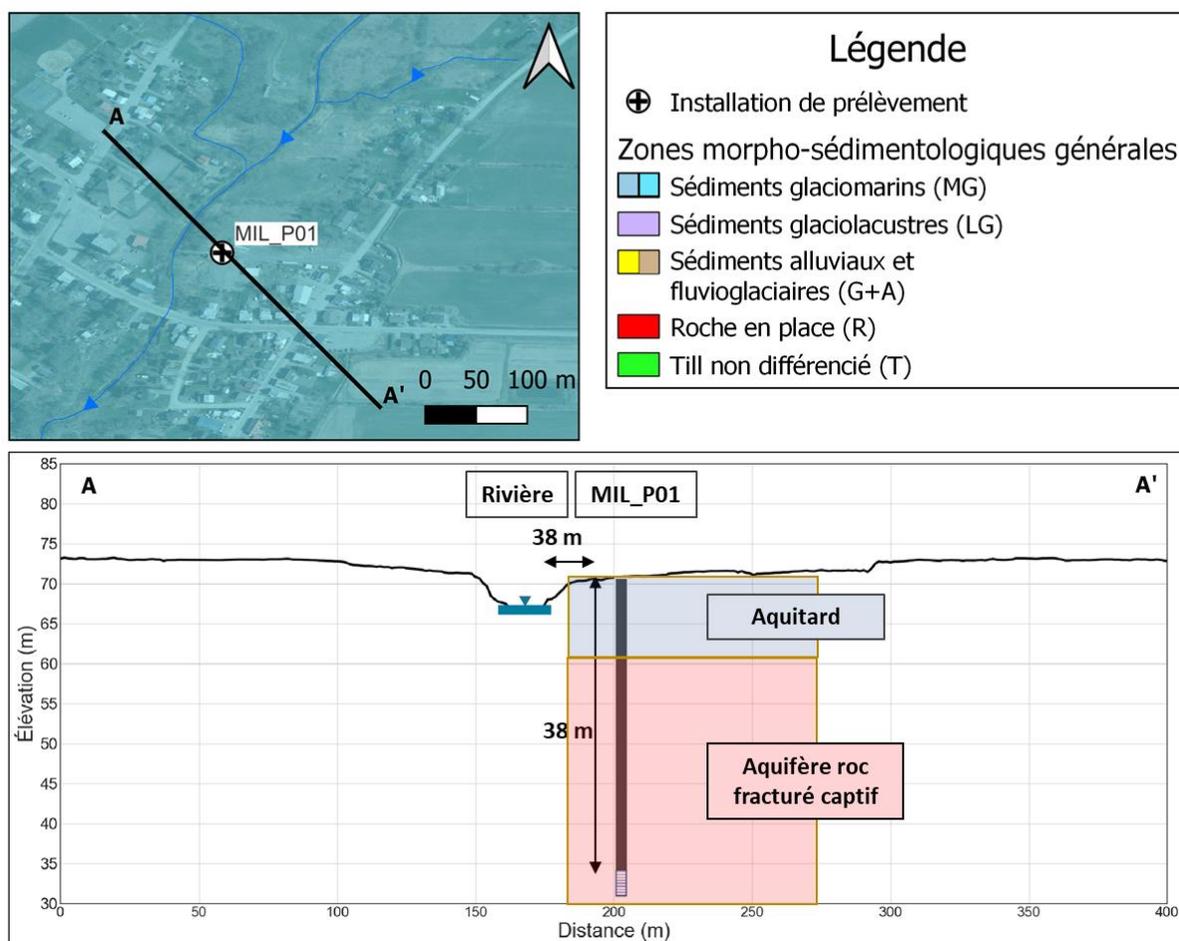


Figure 3-42 Localisation du site de prélèvement MIL_P01 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données isotopiques et de conductivité électrique disponibles pour l'eau souterraine du prélèvement **MIL_P01** couvrent la période de novembre 2019 à mai 2021 (Figure 3-43). On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ (1,2 ‰ vs V-SMOW, N=41) qui excède l'erreur analytique de 1 ‰ vs V-SMOW, tout comme l'écart-type sur les valeurs de conductivité électrique (84,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$, N=62), qui excède l'erreur de mesure établie à 25 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ forme un nuage de points de 5‰ et 1‰ vs V-SMOW d'amplitude respective, centrée autour d'une valeur moyenne à [-76‰; -11.3‰ vs V-SMOW]. Si certaines des valeurs sont dans la gamme caractéristique des eaux de la Belle Rivière, adjacente, un certain nombre est situé le long de la droite météoritique locale.

- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est essentiellement marquée par un enrichissement relatif de 4‰ au cours du mois de février 2020, suivi d'un appauvrissement de 5‰ entre mars et avril, durant la période du dégel printanier (Figure 3-43c).
- Les valeurs de conductivité électrique de l'eau souterraine évoluent dans une gamme similaire à celle des eaux de surface de la Belle Rivière, avec des moyennes respectives de 650 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-43d). Des évolutions de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ d'un mois à l'autre sont régulièrement observées, sans qu'une tendance particulière se révèle. Ceci étant, les évolutions respectives des eaux de surface et souterraine semblent régulièrement anticorrélées jusqu'en juillet 2020, avant d'être très similaires durant la seconde partie de l'échantillonnage.

MIL_P01

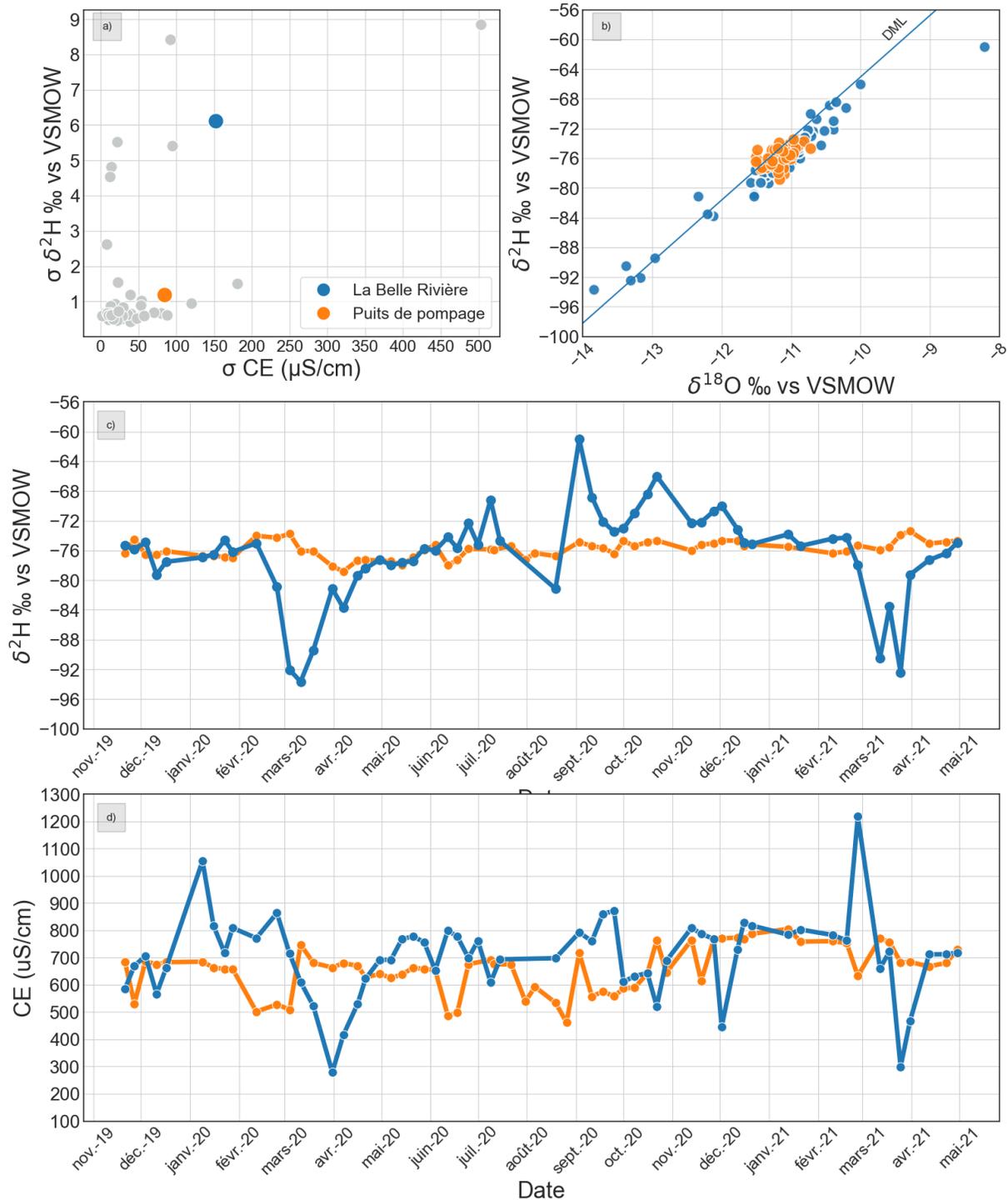


Figure 3-43 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement MIL_P01 a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique.

3.3.3.2 MIL_P02

Caractérisation hydrogéologique

- Le puits MIL_P02 est aménagé dans le roc fracturé **entre 7,6 m et 80,5 m de profondeur** (la profondeur moyenne de 30 mètres est utilisée pour la suite du rapport) et localisé à **55 mètres de distance** de la rivière Mascouche. Les coupes stratigraphiques au droit du puits ont révélé la présence d'une couche d'argile en surface, ce puits est donc considéré comme étant dans un **aquifère au roc fracturé captif**.

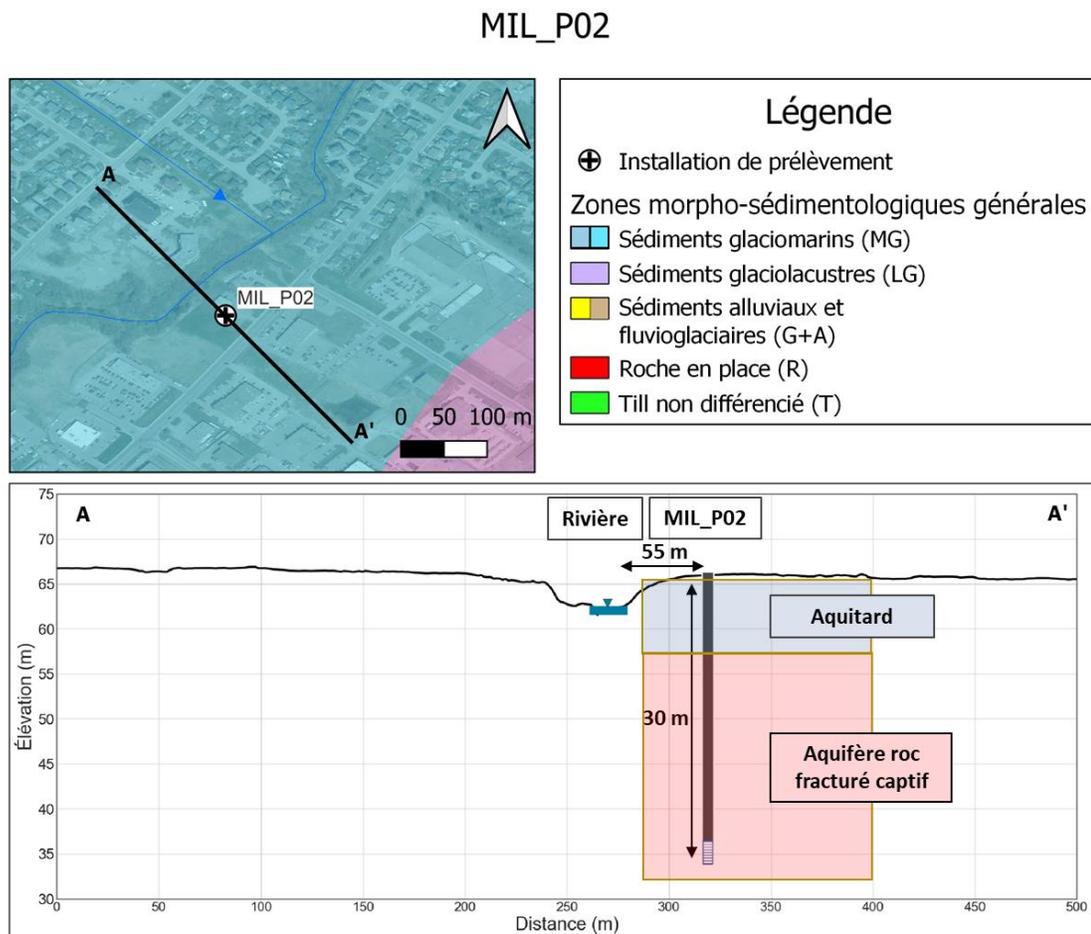


Figure 3-44 Localisation du site de prélèvement MIL_P02 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données isotopiques et de conductivité électrique disponibles pour l'eau souterraine couvrent la période de décembre 2019 à mai 2021. On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,7 ‰ vs V-SMOW (N=40) et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 80 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N62) (Figure 3-45a).
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans la Figure 3-45b, forme un nuage de points de 1 ‰ et 1,5‰ vs V-SMOW d'amplitude respective, centré autour d'une valeur moyenne à [-73‰; -10,7‰ vs V-SMOW]. Il ne couvre qu'une partie très restreinte des valeurs de l'eau de surface.
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ présente une légère tendance décroissante homogène durant la période d'étude, de -72‰ à -74‰ vs V-SMOW environ (Figure 3-45c).
- Les valeurs de conductivité électrique de l'eau souterraine sont relativement élevées et généralement supérieures à celles des eaux de surface, avec des moyennes respectives de 1350 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 1104 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figure 3-45d). Une augmentation progressive d'environ 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ est observée durant la durée du projet.

MIL_P02

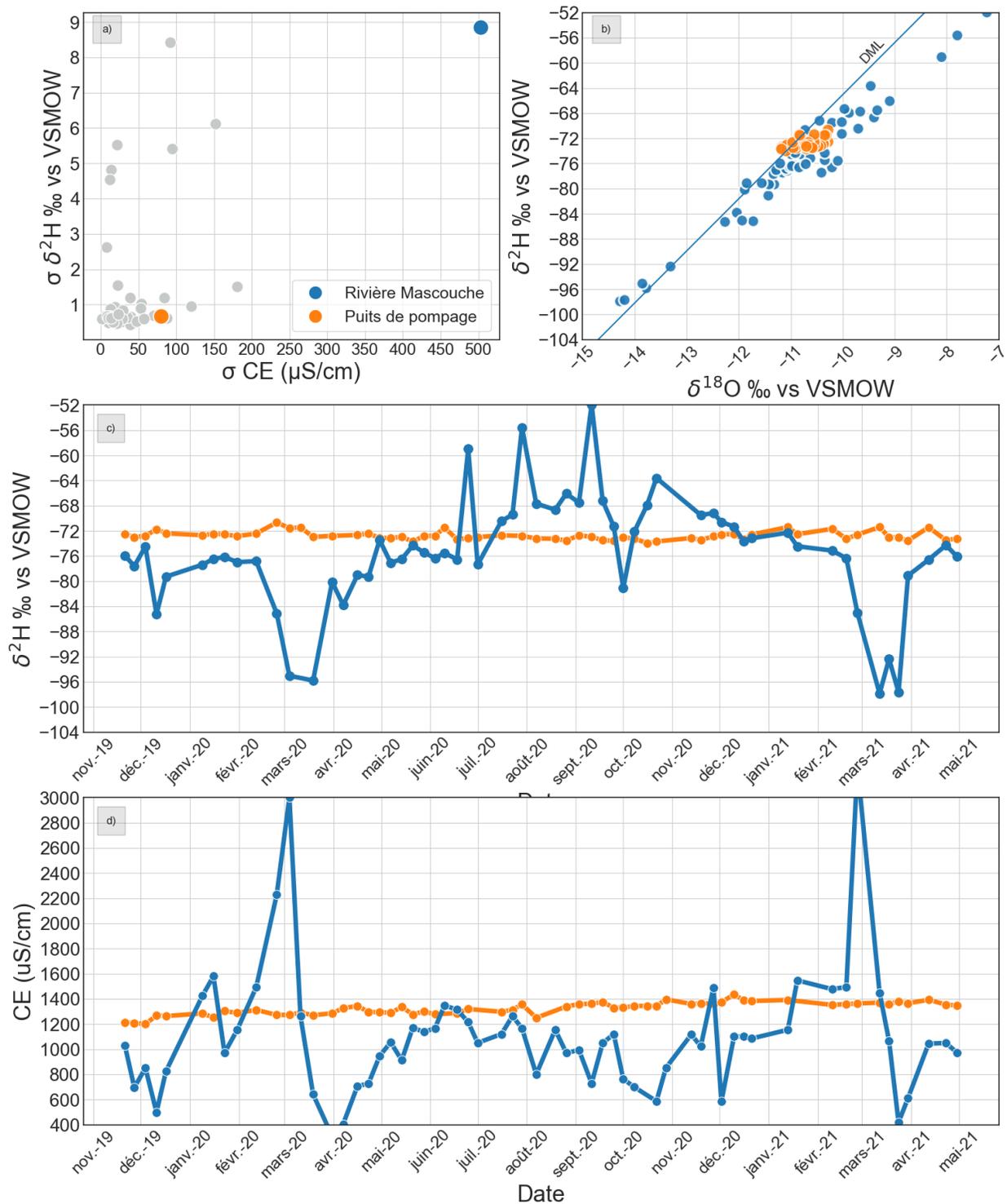


Figure 3-45 Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement MIL_P02 : a) écarts-types observés dans le projet pour δ²H et EC; b) diagramme binaire δ²H vs δ¹⁸O; c) évolution temporelle de δ²H; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

3.3.4 Bassin versant de la rivière Nicolet

Un total de 12 puits regroupés dans 7 municipalités différentes sont présents dans le bassin versant de la rivière Nicolet. Les puits sont présentés en ordre de distance aval amont le long de la rivière.

3.3.4.1 NIC_P01

Caractérisation hydrogéologique

- Le puits de pompage NIC_P01 est aménagé à une **profondeur de 45 mètres** dans un aquifère de roc fracturé, à une **distance de 213 mètres** de la rivière Nicolet. Le puits de cette municipalité est le seul de catégorie 2 dans le projet de recherche. L'étude des coupes stratigraphiques au droit du puits ont permis d'identifier une couche de quelques mètres de silt argileux en surface, cette installation est donc considérée comme un aquifère au **roc fracturé captif**.

NIC_P01

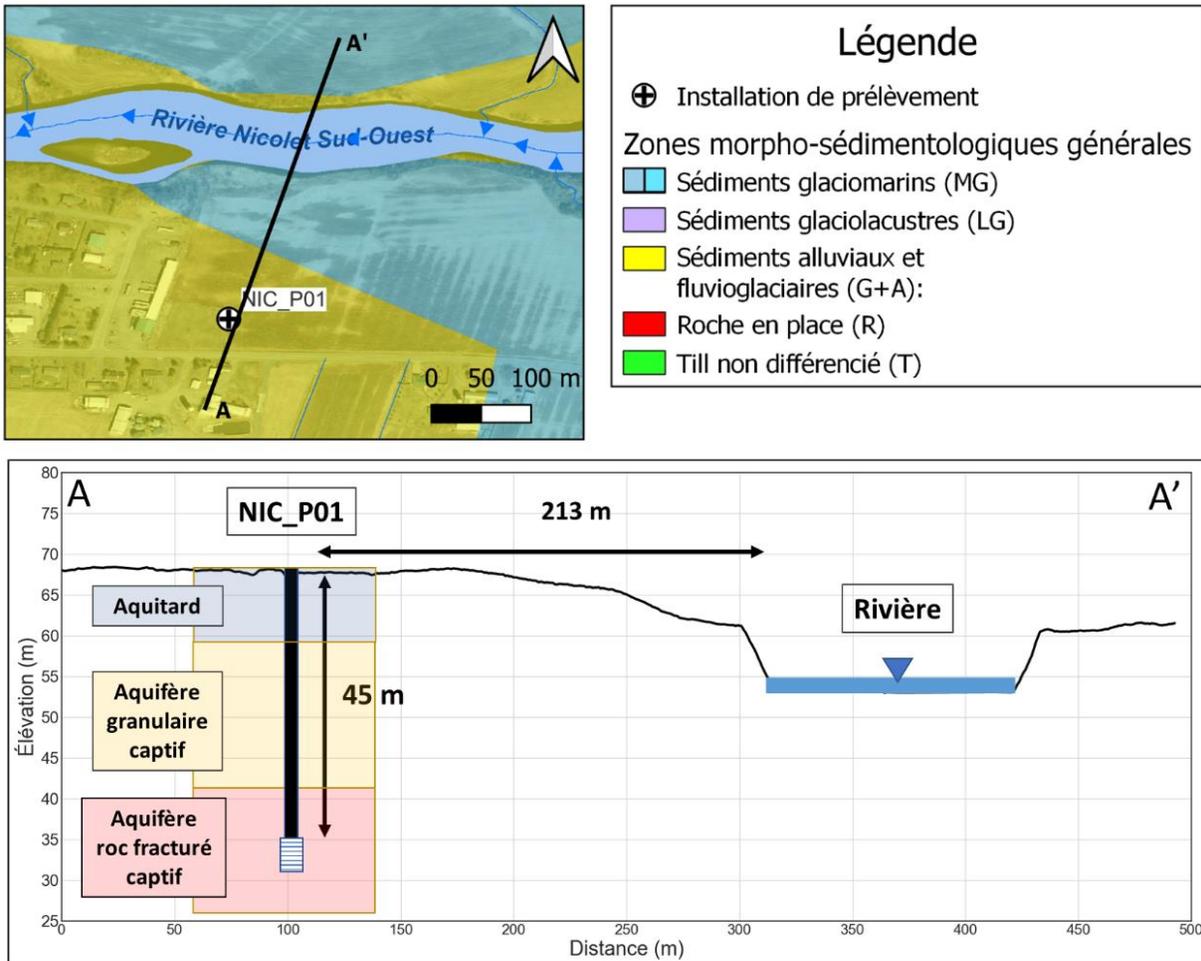


Figure 3-46 Localisation du site de prélèvement NIC_P01 et coupe hydrostratigraphique conceptuelle

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données isotopiques et celles de la conductivité électrique sont disponibles entre décembre 2019 et mars 2021 (Figure 3-47) On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,5 ‰ vs V-SMOW (N=54), et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=54) (Figure 3-47a).
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans la Figure 3-47b, est centrée autour de valeurs moyennes à [-76,3‰; -11,1‰ vs V-SMOW].
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est stable, avec une moyenne plus enrichie que celle de l'eau de surface (-76,3‰; -77,8‰ vs V-SMOW] (Figure 3-47c). En décembre et mars (étiage d'hiver), la composition isotopique des eaux de surface et souterraine est identique.
- L'évolution temporelle de la conductivité électrique est stable, et la moyenne est plus élevée que celle des eaux de surface, respectivement de 775 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 280 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-47d)

Juin 2022

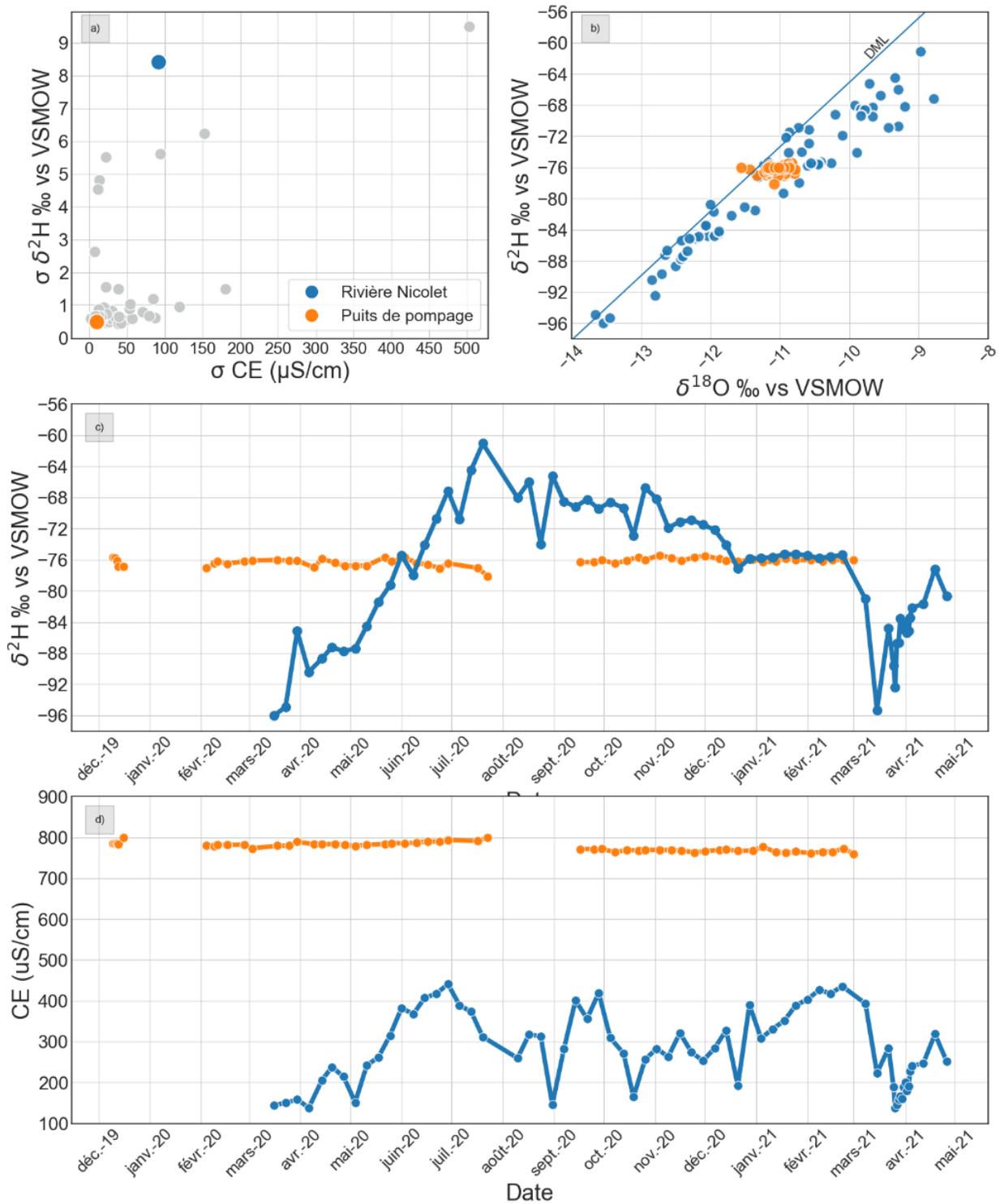


Figure 3-47 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement NIC_P01 : a)

écarts-types observés dans le projet pour $\delta^{2}\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^{2}\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^{2}\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

3.3.4.2 NIC_P02 et NIC_P03 et NIC_P04

Caractérisation hydrogéologique

- Les puits NIC_P02 et NIC_P03 et NIC_P04 appartiennent tous à la même installation de captage d'eau souterraine. Le puits **NIC_P02** est aménagé à une **profondeur de 12 mètres**, le **NIC_P03** à une **profondeur de 29 mètres** et le **NIC_P04** à une **profondeur de 16 mètres**, les trois dans un aquifère granulaire à une **distance de 542 mètres** de la rivière Nicolet. Le petit lac visible sur la carte est asséché depuis plusieurs années, mais aurait fait partie de l'ancien système d'approvisionnement en eau potable de la municipalité, où l'eau de la rivière Nicolet était pompée jusque dans le lac pour permettre une plus grande quantité d'eau disponible en période d'étiage. L'étude des coupes stratigraphiques des trois forages a confirmé la présence de quelques dizaines de centimètres de sable silteux à la surface. Cette épaisseur n'étant pas significative, les puits de cette installation sont considérés comme étant dans un **aquifère granulaire libre**.

NIC_P02, NIC_P03 et NIC_P04

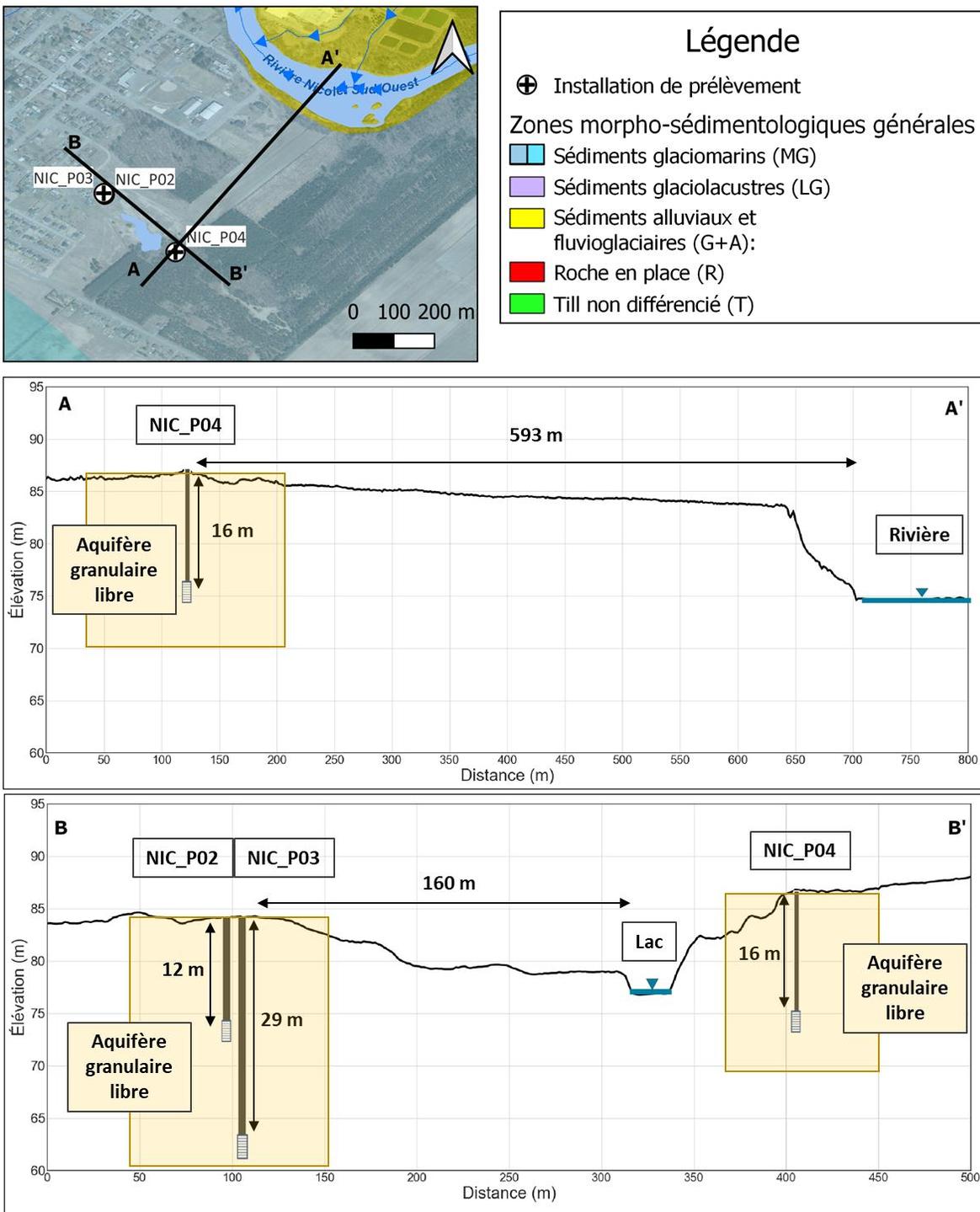


Figure 3-48 Localisation des sites de prélèvement NIC_P02 à NIC_P04 et coupe hydrostratigraphique

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données isotopiques et celles de la conductivité électrique disponibles pour l'eau souterraine du puits **NIC_P02** couvrent la période de novembre 2019 à août 2020 (Figure 3-49). On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,9 ‰ vs V-SMOW (N=39) et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 19 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=77) (Figure 3-49a).
- Le ratio isotopique $\delta^2\text{H}$, telle qu'illustré dans la Figure 3-49b, est centré autour d'une valeur moyenne à -81‰ vs V-SMOW alors que les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ sont plutôt étalées entre -11‰ et -12,1 vs V-SMOW.
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est stable, avec une moyenne plus appauvrie que celle de l'eau de surface (-81‰; -77,8‰ vs V-SMOW] (Figure 3-49c)
- La moyenne de la conductivité électrique est plus élevée que celle des eaux de surface, respectivement de 470 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 280 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-49d). Une légère augmentation des valeurs de la conductivité électrique peut être observée dans le temps.

NIC_P02

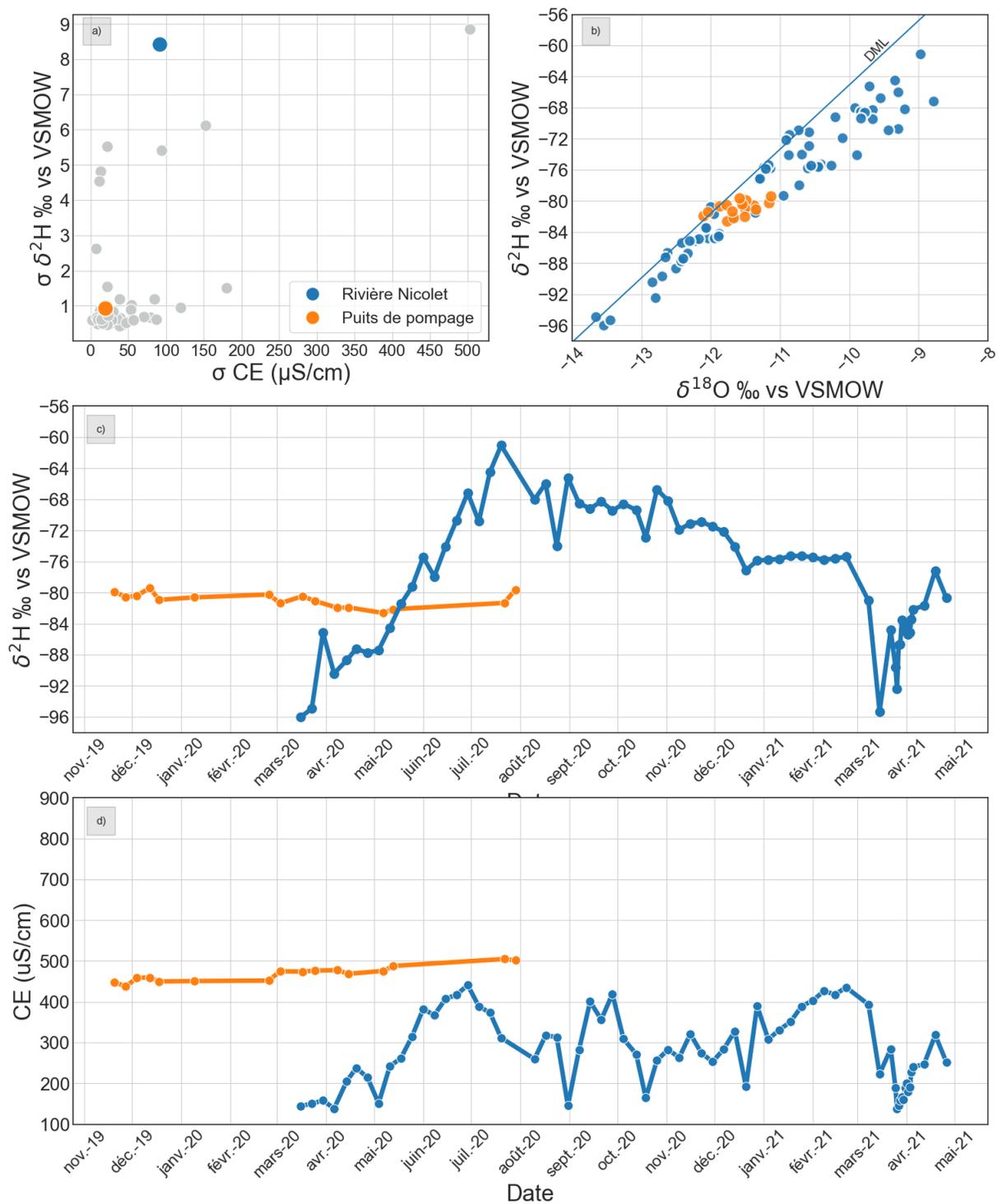


Figure 3-49 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement NIC_P02: a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données isotopiques et celles de la conductivité électrique disponibles pour l'eau souterraine du puits **NIC_P03** couvrent la période de novembre 2019 à août 2020 (Figure 3-50). On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,7 ‰ vs V-SMOW (N=39) et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=77) (Figure 3-50a).
- Le ratio isotopique $\delta^2\text{H}$, telle qu'illustré dans la Figure 3-50b, est centré autour d'une valeur moyenne à -81‰ vs V-SMOW alors que les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ sont plutôt étalées entre -11,1‰ et -12,1 vs V-SMOW.
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est stable, avec une moyenne plus appauvrie que celle de l'eau de surface (-81‰; -77,8‰ vs V-SMOW] (Figure 3-50c)
- La moyenne de la conductivité électrique est plus élevée que celle des eaux de surface, respectivement de 590 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 280 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-50d). Une augmentation des valeurs de la conductivité électrique peut être observée dans le temps, peut-être liée à l'augmentation de la CE dans les eaux de surface.

NIC_P03

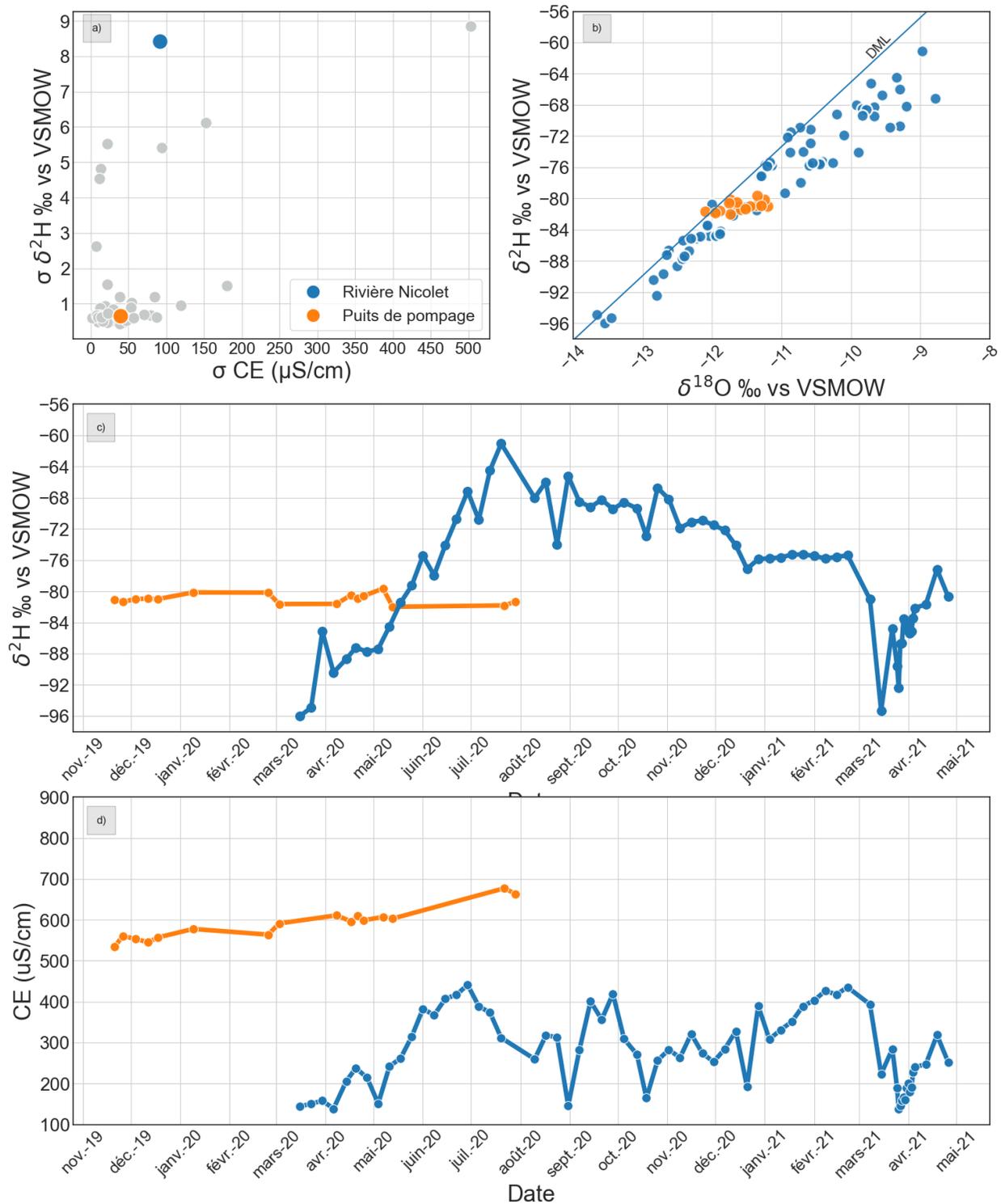


Figure 3-50 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement NIC_P03: a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données isotopiques et celles de la conductivité électrique disponibles pour l'eau souterraine du puits **NIC_P04** couvrent la période de novembre 2019 à août 2020 (Figure 3-51). On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,6 ‰ vs V-SMOW (N=39) et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 17 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=77) (Figure 3-51a).
- Le ratio isotopique $\delta^2\text{H}$, telle qu'illustrée dans la Figure 3-51b, est centrés autour d'une valeur moyenne à -81‰ vs V-SMOW alors que les valeurs du ratio de $\delta^{18}\text{O}$ sont plutôt étalées entre -11‰ et -12,1 vs V-SMOW.
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est stable, avec une moyenne plus appauvrie que celle de l'eau de surface (-81‰; -77,8‰ vs V-SMOW] (Figure 3-51c)
- La moyenne de la conductivité électrique est plus élevée que celle des eaux de surface, respectivement de 540 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 280 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-51d).

NIC_P04

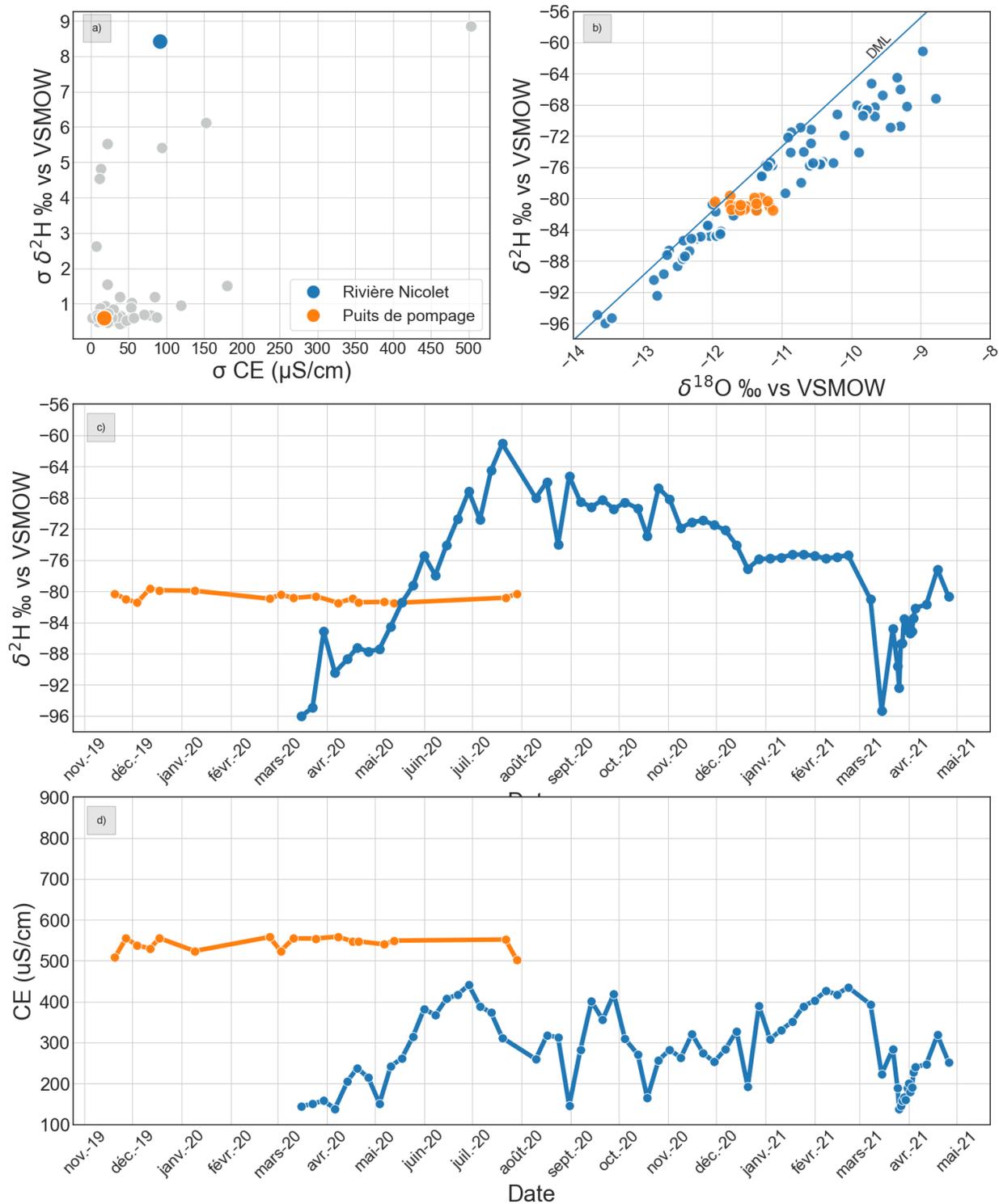
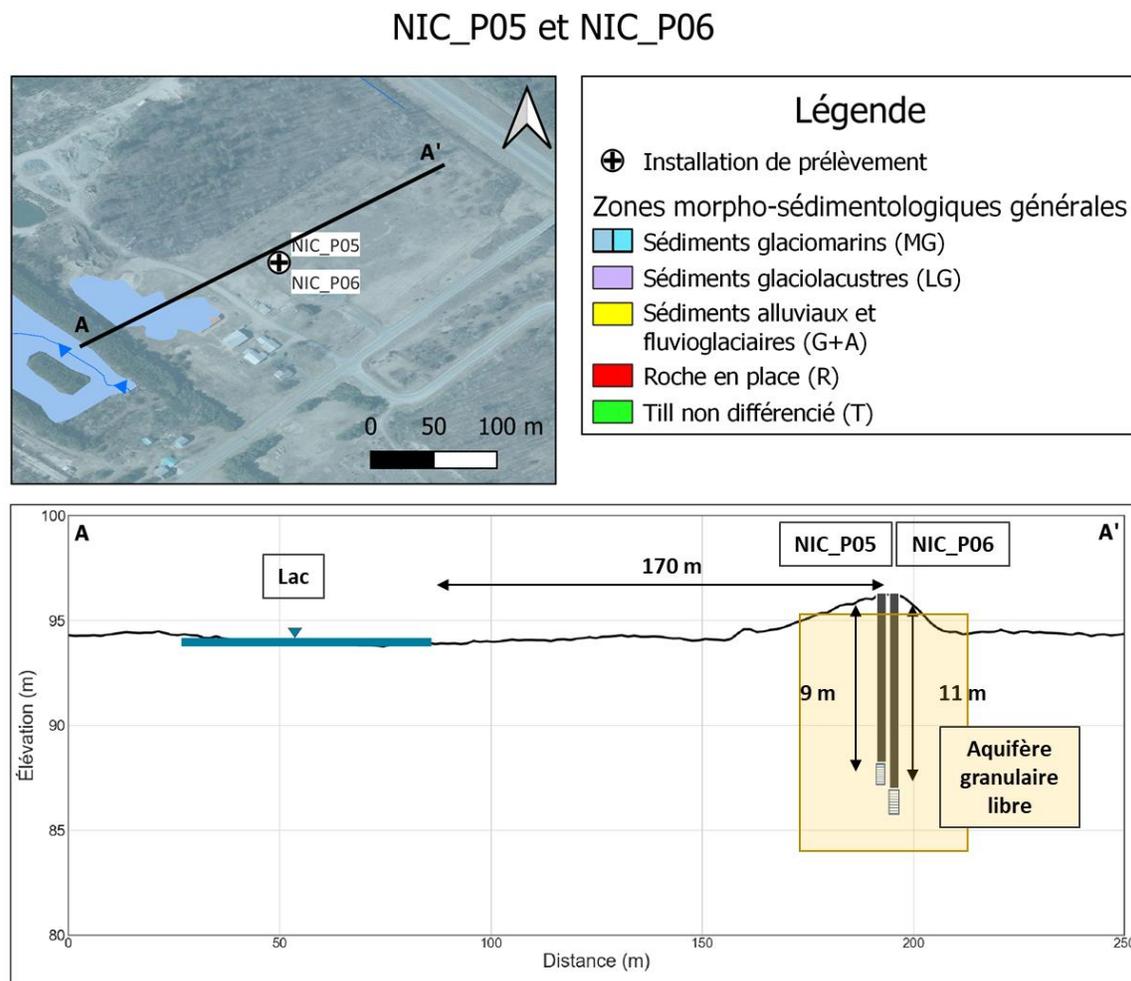


Figure 3-51 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement NIC_P04: a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

3.3.4.3 NIC_P05 et NIC_P06

Caractérisation hydrogéologique

- Les installations NIC_P05 et NIC_P06 sont aménagés respectivement à une **profondeur de 9 mètres et 11 mètres** dans un aquifère granulaire, à **une distance de 170 mètres d'un lac de carrière**. Ce lac n'ayant pas pu être échantillonné, le signal de la rivière Nicolet est utilisé pour fins de comparaison. Les coupes stratigraphiques au droit du forage ont révélé l'absence de couche confinante en surface, ces puits sont donc considérés comme étant dans un **aquifère granulaire libre**.



Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données sont disponibles entre novembre 2019 et mai 2021 (Figure 3-53). On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,7 ‰ vs V-SMOW (N=47) et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=61) (Figure 3-53a).
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans la Figure 3-53b, est centrée autour de valeurs moyennes à [-84,6‰; -12,5‰ vs V-SMOW], avec un étalement horizontal marqué des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$.
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est stable, avec une moyenne plus appauvrie que celle de l'eau de surface (-84,6‰; -77,8‰ vs V-SMOW] (Figure 3-53c)
- L'évolution temporelle de la conductivité électrique est stable, et la moyenne est plus faible que celle des eaux de surface, respectivement de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 280 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-53d).

NIC_P05

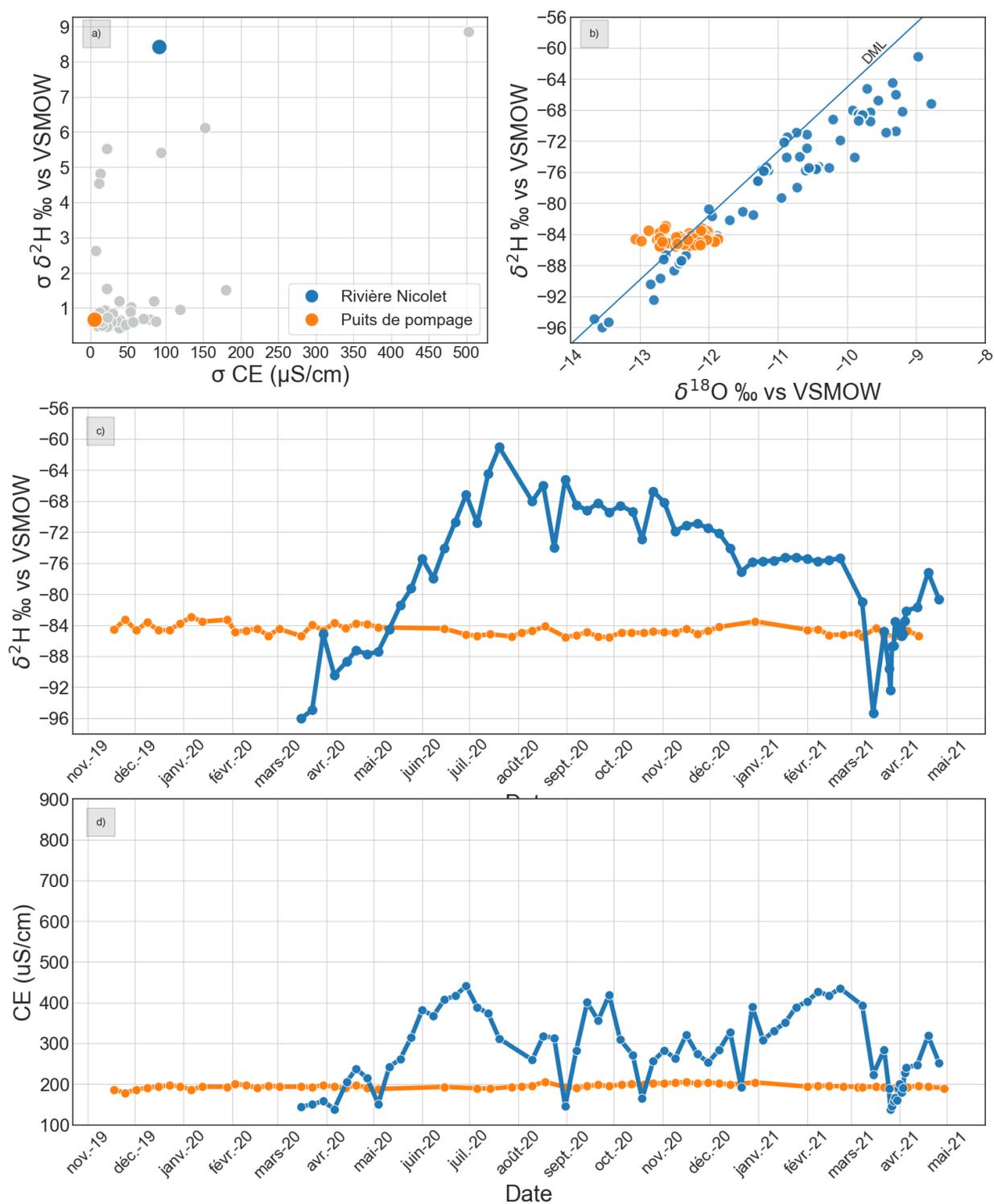


Figure 3-53 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement NIC_P05 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données sont disponibles entre novembre 2019 et mai 2021 (Figure 3-54). On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,7 ‰ vs V-SMOW (n = 49) un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (n = 56) (Figure 3-54a).
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans la Figure 3-54b, est centrée autour de valeurs moyennes à [-83,3‰; -12,2‰ vs V-SMOW], avec un étalement horizontal marqué des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$.
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est stable, avec une moyenne plus appauvrie que celle de l'eau de surface (-83,3‰; -77,8‰ vs V-SMOW] (Figure 3-54c)
- L'évolution temporelle de la conductivité électrique est stable, et la moyenne est plus faible que celle des eaux de surface, respectivement de 175 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 280 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-54d).

NIC_P06

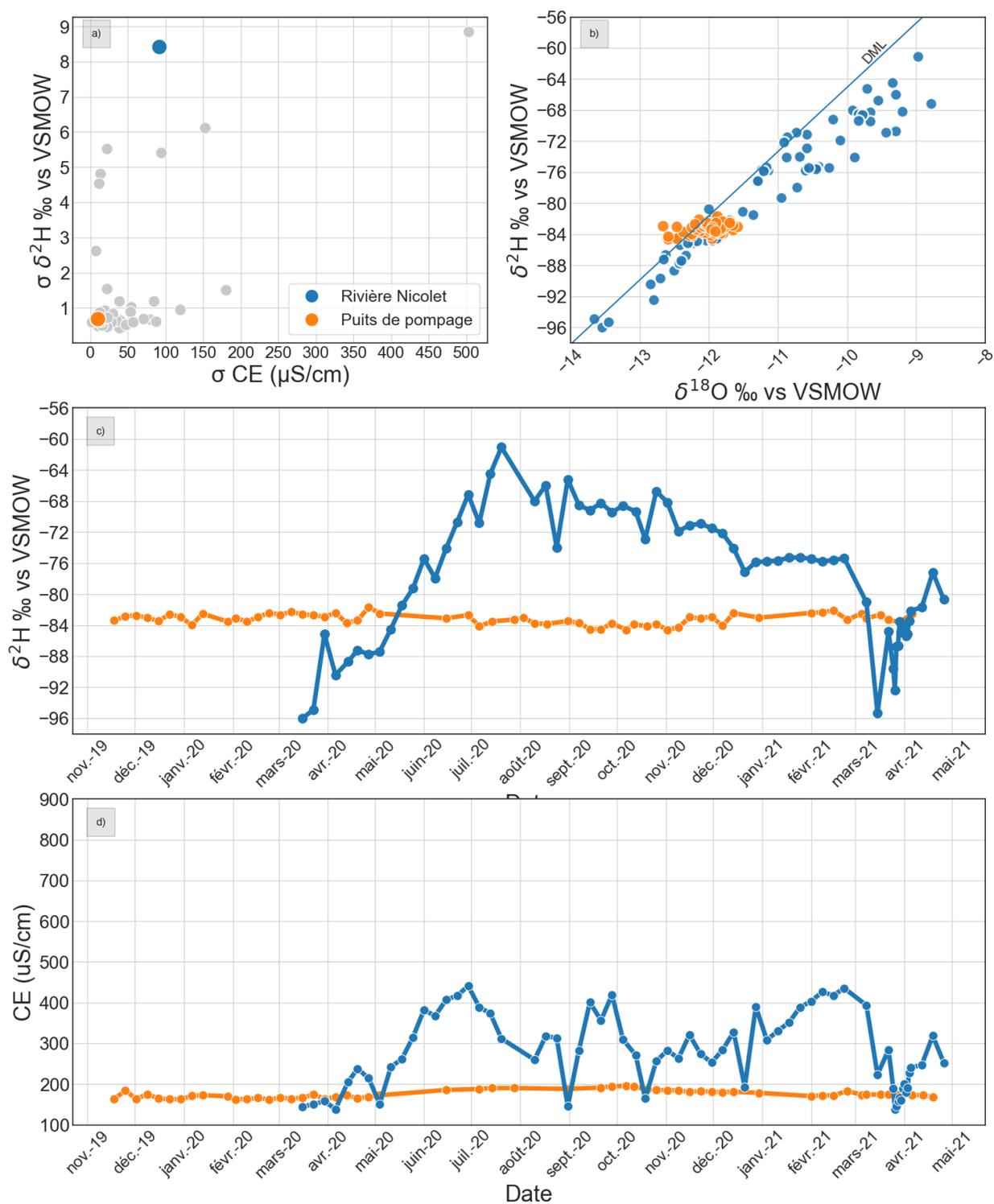


Figure 3-54 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement NIC_P06: a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

3.3.4.4 NIC_P07

Caractérisation hydrogéologique

- L'installation NIC_P07 est aménagée à **40 mètres de profondeur** dans un aquifère granulaire à **260 mètres du ruisseau Francoeur, affluent de la rivière Nicolet**. La coupe lithologique au droit du puits confirme la présence d'une couche de plusieurs mètres d'argile en surface, ce puits est donc considéré comme étant dans un **aquifère granulaire captif**.

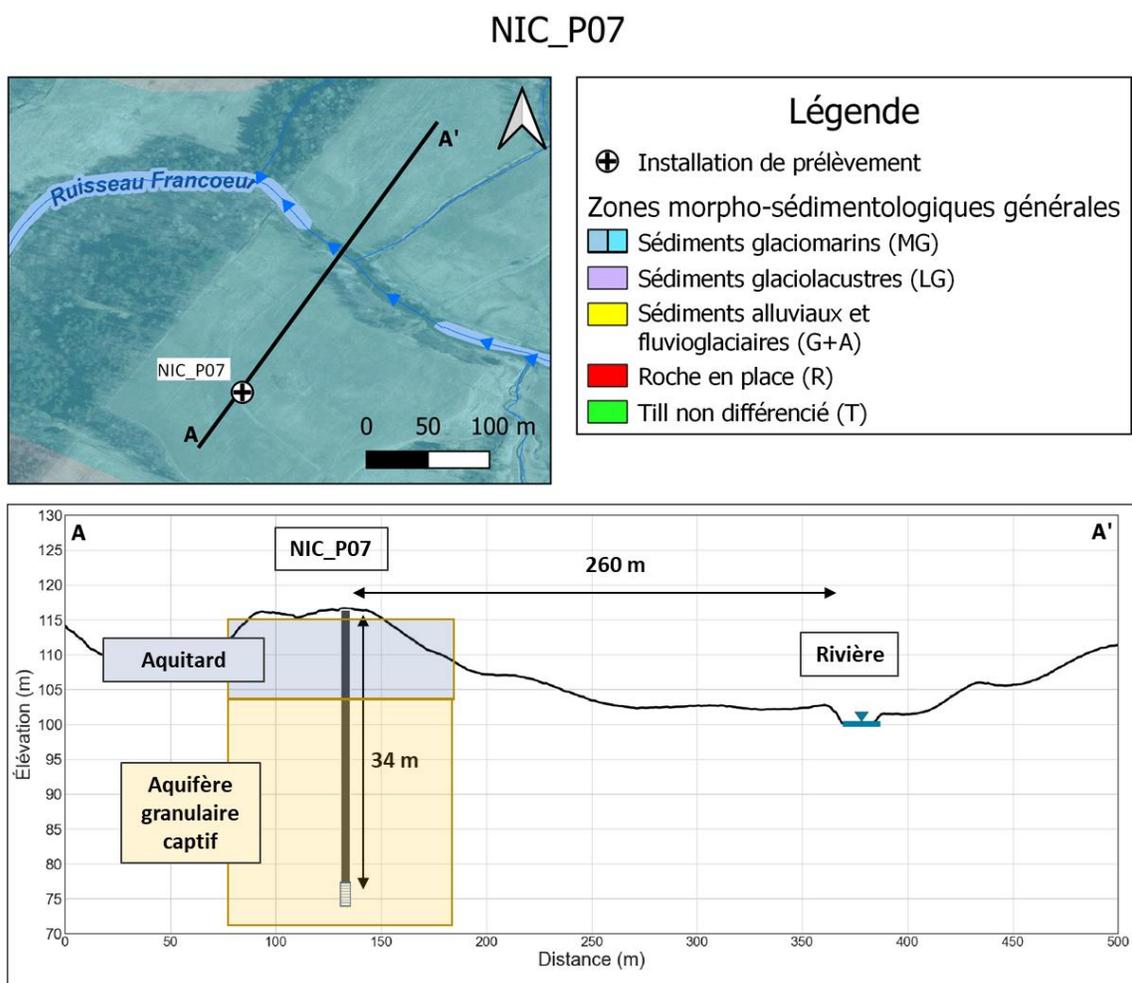


Figure 3-55 Localisation du site de prélèvement NIC_P07 et coupe hydrostratigraphique

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données disponibles de la conductivité électrique et celles des isotopes couvrent la période de novembre 2019 à mai 2021 (Figure 3-56). On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 0,6 ‰ vs V-SMOW (N=77) et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 35 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=77) (Figure 3-56a).
- Le ratio isotopique $\delta^2\text{H}$, telle qu'illustré dans la Figure 3-56b, est centré autour d'une valeur moyenne à -74‰ vs V-SMOW alors que les valeurs du ratio de $\delta^{18}\text{O}$ sont plutôt étalées entre -0,7‰ et -12 vs V-SMOW.
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est très stable, avec une moyenne semblable à celle de l'eau de surface (-78,5‰; -77,8‰ vs V-SMOW] (Figure 3-56c)
- La moyenne de la conductivité électrique est plus élevée que celle des eaux de surface, respectivement de 460 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 280 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ (Figure 3-56d). Une augmentation de la conductivité électrique peut être observée dans le temps, peut-être liée à l'augmentation du débit de pompage. Un nouveau puits a été foré pendant la durée du projet, pour augmenter la capacité de pompage du site.

NIC_P07

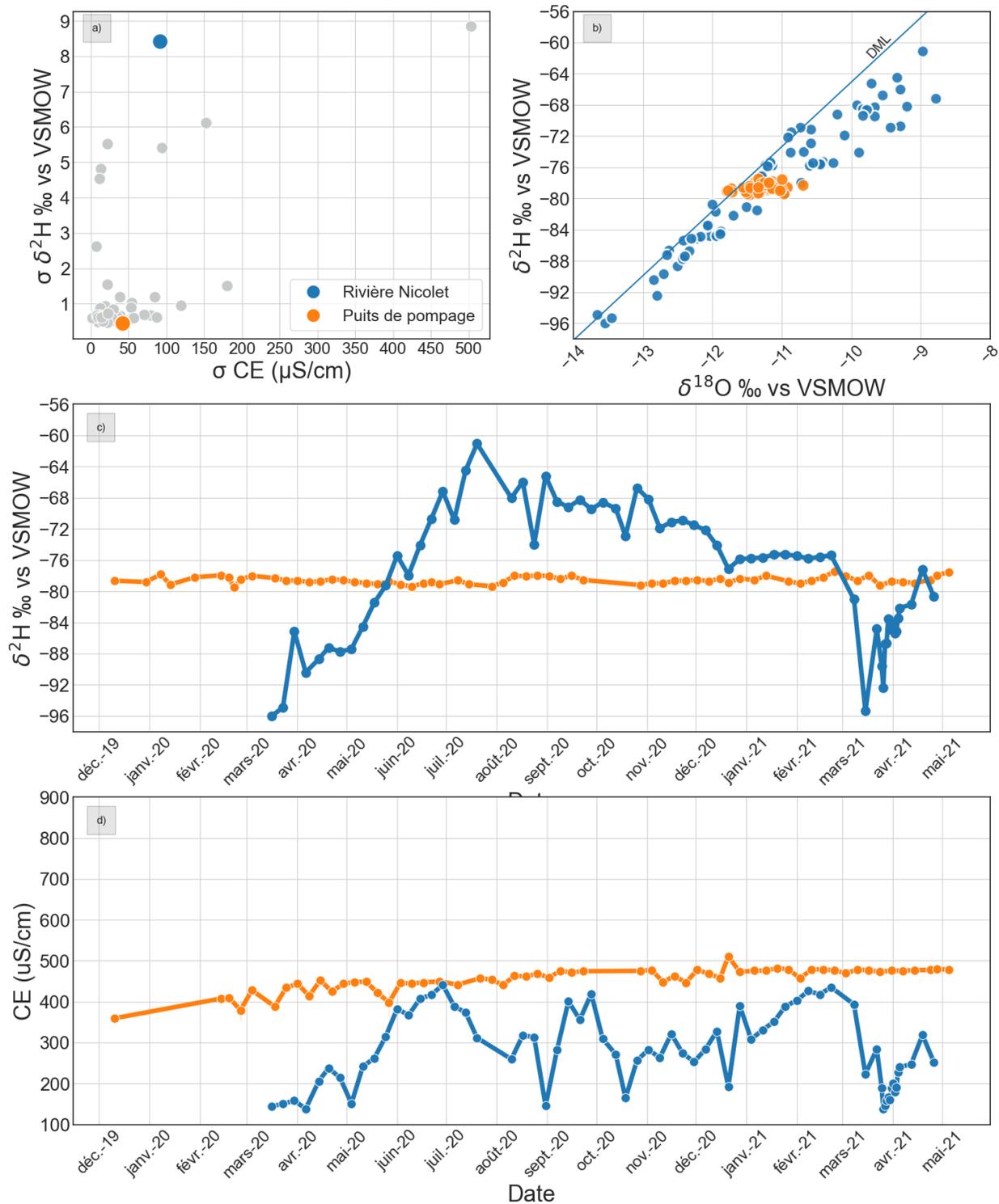


Figure 3-56 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement NIC_P07: a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

3.3.4.5 NIC_P08

Caractérisation hydrogéologique

- L'installation NIC_P08 est un puits collecteur à drains rayonnant, composé de 7 drains horizontaux de longueurs variant entre 16 et 40 mètres dans un aquifère granulaire. Il est installé à **20 m de profondeur** et localisé à **54 mètres de la rivière Nicolet** et **130 mètres d'un lac** de carrière. La description des lithologies rencontrées au droit du puits lors de la construction indique qu'il est situé dans un **aquifère granulaire libre**.

NIC_P08

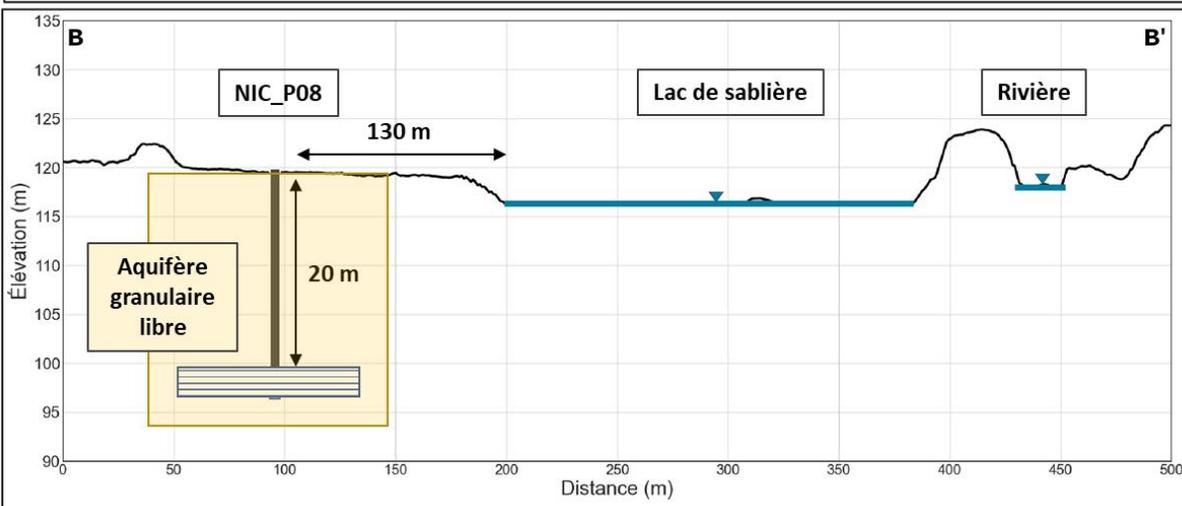
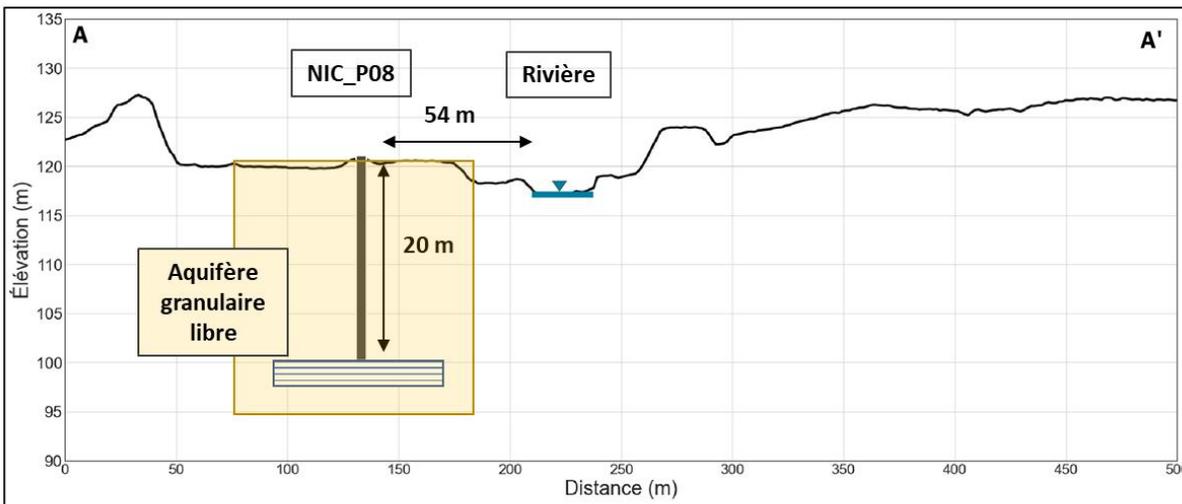
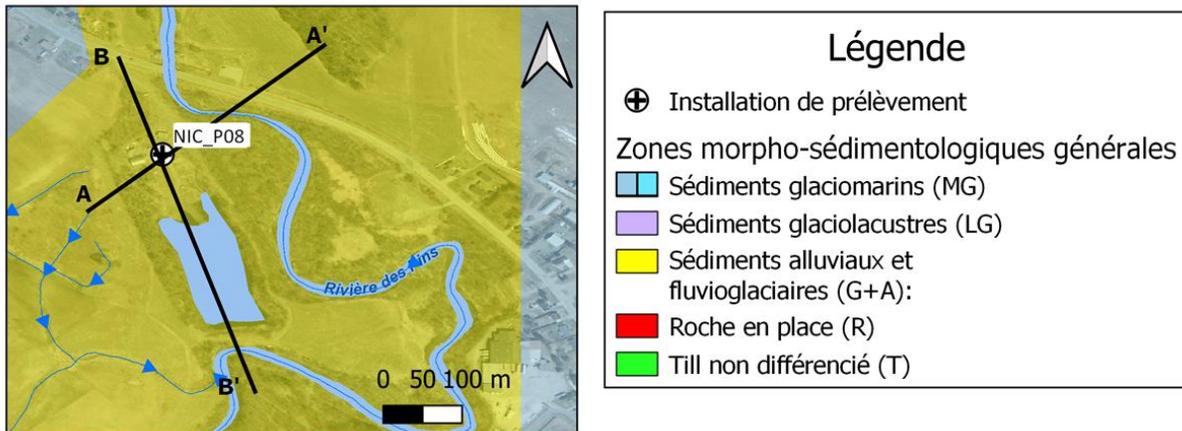


Figure 3-57 Localisation du site de prélèvement NIC_P08 et coupe hydrostratigraphique

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données isotopiques et de conductivité électrique disponibles pour l'eau souterraine couvrent la période de décembre 2019 à décembre 2020 (Figure 3-58). On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 1,03 ‰ vs V-SMOW (N=12) et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 54 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=12), (Figure 3-58a).
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans la Figure 4-13b, forme un alignement entre [-78‰; -11.3 vs V-SMOW] et [-76‰; -10.2‰ vs V-SMOW]. Ces valeurs se trouvent dans la gamme des eaux de surface, quoi que toutes évaporées et possiblement dérivées d'une source qui serait localisée à l'intersection avec la droite météoritique locale vers [-81‰; -12‰ vs V-SMOW].
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ reste peu marquée, avec toutefois un enrichissement entre la fin de l'été et la fin de l'automne Figure 3-58c).
- Les valeurs de conductivité électrique de l'eau souterraine augmentent graduellement pendant toute la série de données, passant de 550 à 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ entre novembre 2019 et novembre 2020, hormis une diminution temporaire de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ durant le mois de février 2020. La valeur moyenne de la conductivité électrique est bien au-delà de celle des eaux de surface (660 $\mu\text{S}/\text{cm}$ vs 280 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

NIC_P08

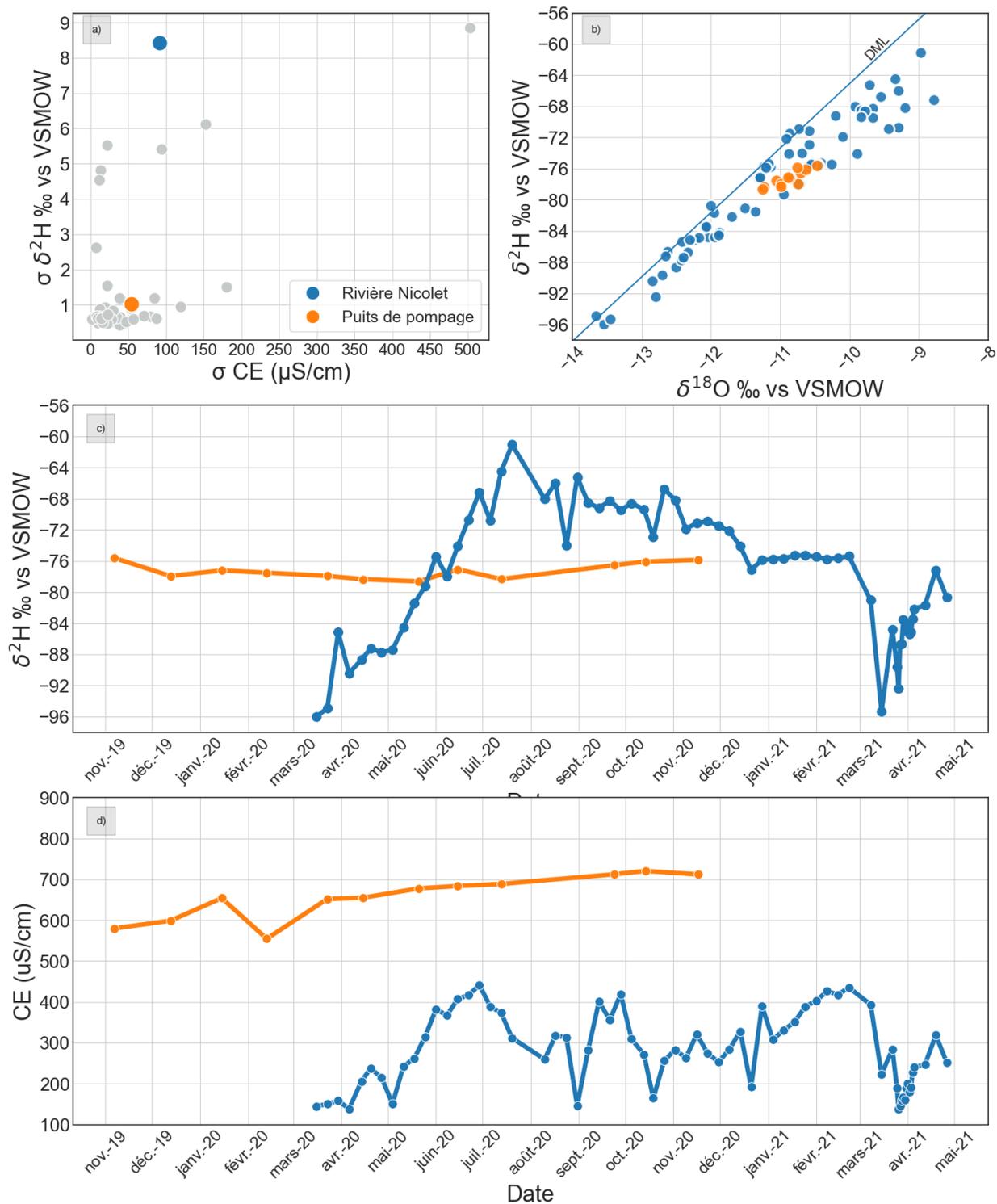
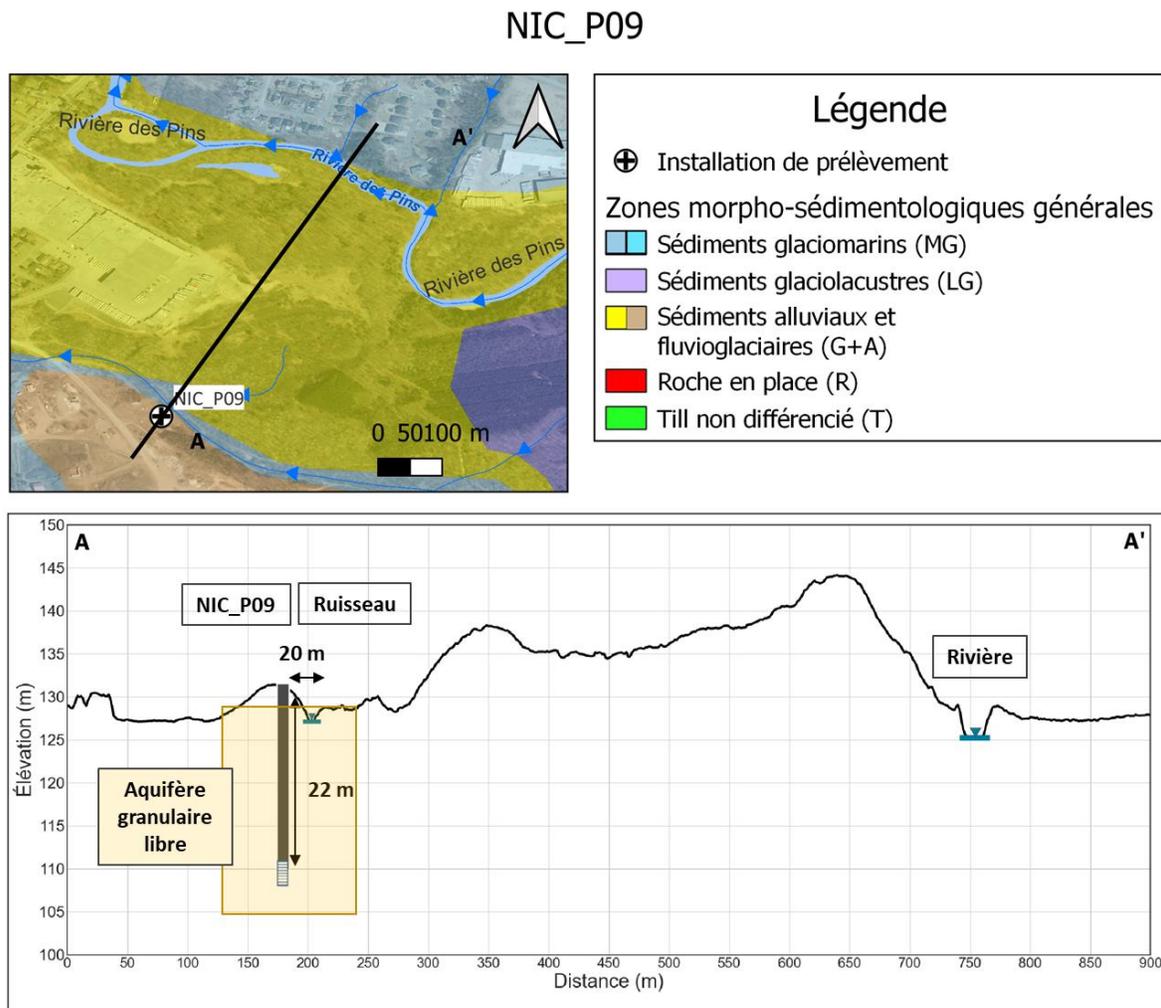


Figure 3-58: Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement NIC_P08 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

3.3.4.6 NIC_P09

Caractérisation hydrogéologique

- L'installation NIC_P09 est installée à **22 m de profondeur** dans un aquifère granulaire et est localisée à **20 mètres d'un ruisseau sans nom** et à 488 mètres de la rivière des Pins, affluent de la rivière Nicolet. L'étude de la stratigraphie au droit du puits indique que le puits est dans un **aquifère granulaire libre**.



Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données isotopiques et de conductivité électrique disponibles pour l'eau souterraine couvrent la période de décembre 2019 à décembre 2020 (Figure 3-60). On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 1,5 ‰ vs V-SMOW (N=12) et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 180,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=12) (Figure 3-60a).
- La distribution des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, telle qu'illustrée dans la Figure 3-60b, forme un alignement entre [-82‰; -12 vs V-SMOW] et [-76‰; -11,8‰ vs V-SMOW]. Ces valeurs se trouvent dans la gamme des eaux de surface, quoique possiblement impactées par une source plus ou moins évaporée localisée à l'intersection avec la droite météoritique locale.
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est légèrement marquée par un appauvrissement progressif (-80‰ vs V-SMOW) au cours du printemps 2020, avec des enrichissements à l'hiver 2020 et à l'été 2020 (Figure 3-60c). Cette tendance est corrélée avec celle des eaux de surface.
- Les valeurs de conductivité électrique de l'eau souterraine sont sujettes à discussion concernant la justesse des données. Des augmentations brusques (400 $\mu\text{S}/\text{cm}$) sont observées à l'hiver 2020 et à l'été 2021, synchrones avec le même phénomène dans les eaux de surface (Figure 3-60d).

NIC_P09

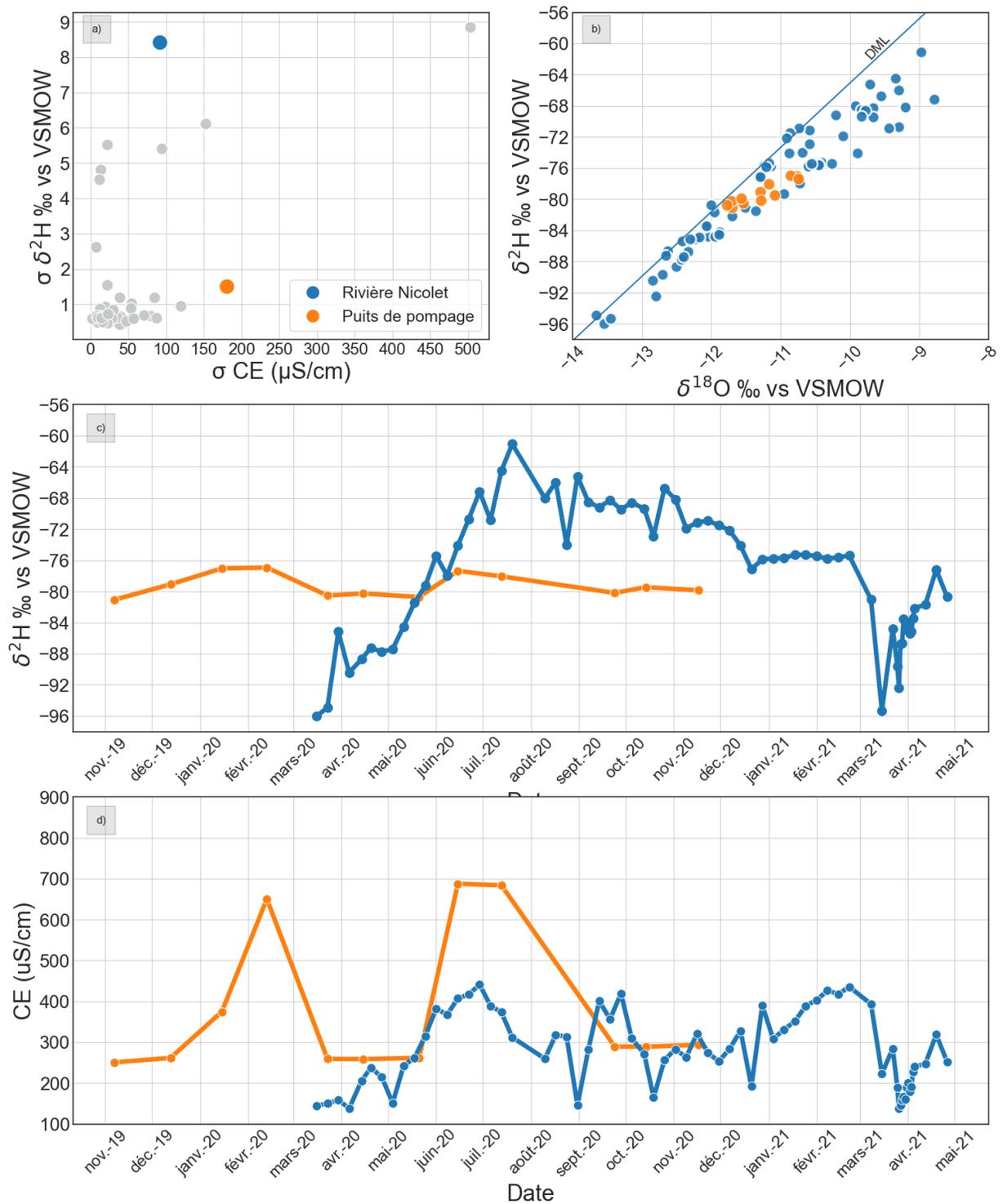


Figure 3-60 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement NIC_P09 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

3.3.4.7 NIC_P10 et NIC_P11

Caractérisation hydrogéologique

- Le prélèvement NIC_P10 correspond à plusieurs puits tubulaires variant entre **7 et 8 mètres de profondeur** installés dans un aquifère granulaire. Seul le mélange à l'eau brute des puits a été échantillonné dans le cadre de cette étude. La rivière Nicolet est située à **33 mètres de distance** des puits. Situé à proximité, le prélèvement NIC_P11 est constitué de drains horizontaux de **14 mètres de profondeur** installés dans le même aquifère granulaire. Il n'a pas été possible de consulter le schéma d'aménagement de cette installation de prélèvement, la **distance de 50 mètres** entre le prélèvement et la rivière Nicolet a été calculée à partir de l'emplacement de l'installation de pompage et non pas de l'extrémité des drains. Dans le cas des deux prélèvements, les coupes stratigraphiques au droit des puits ont permis de confirmer qu'ils sont dans des **aquifères granulaires libres**.

NIC_P10 et NIC_P011

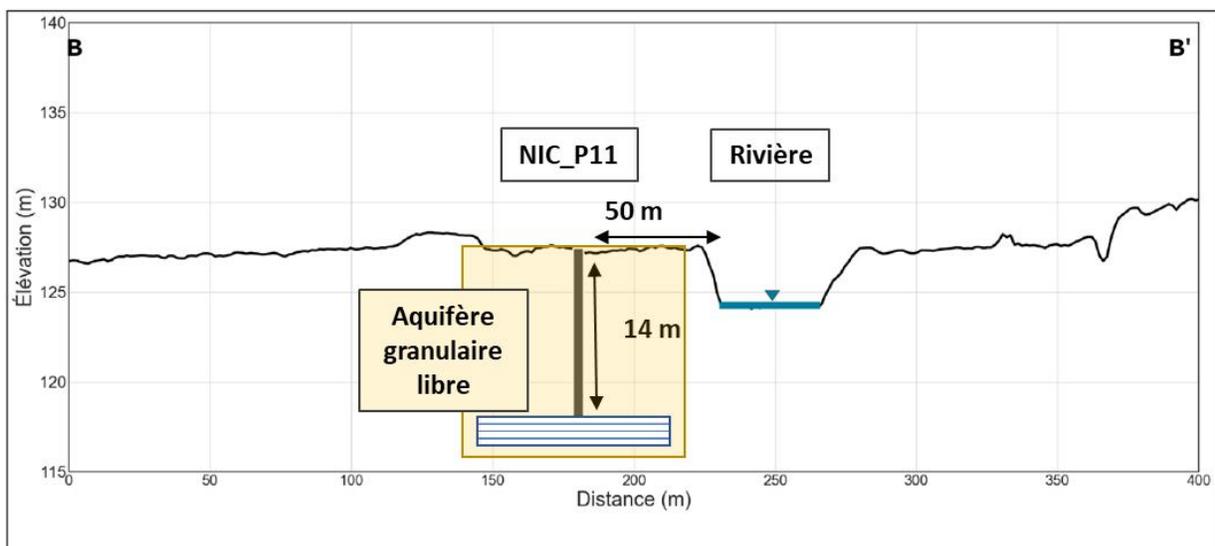
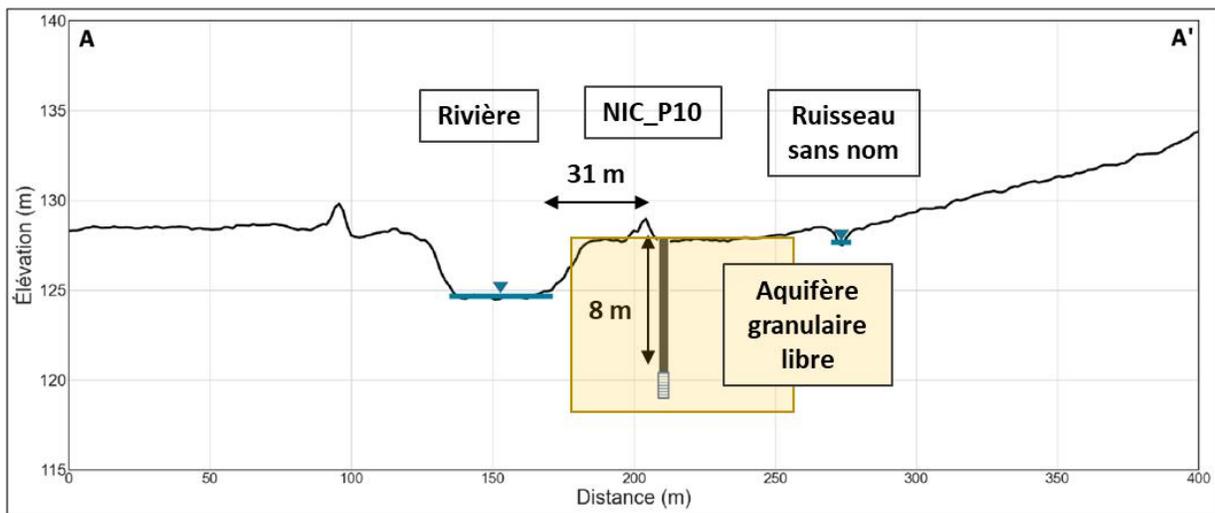
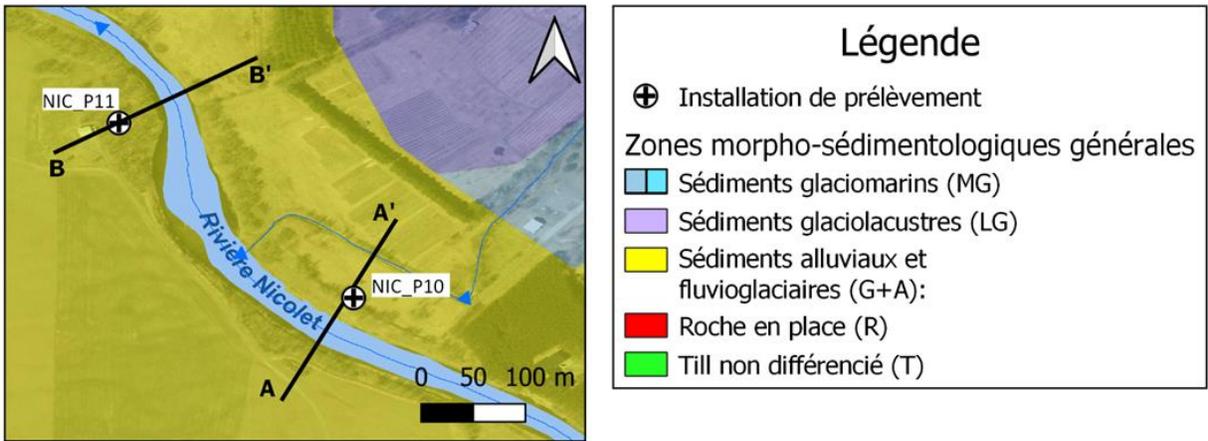


Figure 3-61 Localisation des sites de prélèvement NIC_P10 à NIC_P11 et coupe hydrostratigraphique

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données isotopiques disponibles pour l'installation **NIC_P10** couvrent la période de novembre 2019 à juin 2021, pour un total de 46 échantillons. Noter qu'en raison de la pandémie de Covid-19, l'acquisition des données a été interrompue de février à juin 2020, ce qui inclut une période propice à des forçages isotopiquement marqués par des eaux fortement appauvries, donc potentiellement utile pour les objectifs du présent projet. On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 4,81 ‰ vs V-SMOW (N=46) et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 13,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=50) (Figure 3-62).
- La distribution relativement large des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, depuis [-84‰; -12.2‰ vs-VSMOW] à [-68‰; -9.4‰ vs-VSMOW], se retrouve entièrement dans le domaine de variation des eaux de la rivière Nicolet, c.A.D. proche de celui des précipitations, mais avec une signature sensiblement évaporée (Figure 3-62b).
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est assez marquée, avec un appauvrissement stable de décembre 2019 à mars 2020 (-80‰ vs V-SMOW) suivi dans la deuxième période de données (juin 2020 à septembre 2020), d'une remontée jusqu'à une valeur plateau de -68‰ en septembre 2020. S'en suit une descente graduelle jusqu'à une valeur de -84‰ vs V-SMOW en mai 2021, et une dernière remontée vers la fin de la période d'acquisition des données. (Figure 3-62c).
- Les valeurs de conductivité électrique de l'eau souterraine sont dans la moyenne de celles de l'eau de surface. Avec une moyenne autour de 290 $\mu\text{S}/\text{cm}$ contre 280 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ pour la rivière Nicolet, elles correspondent à la gamme des valeurs minimales de l'eau de surface. Une légère tendance évolutive se dénote. (Figure 3-62d).

NIC_P10

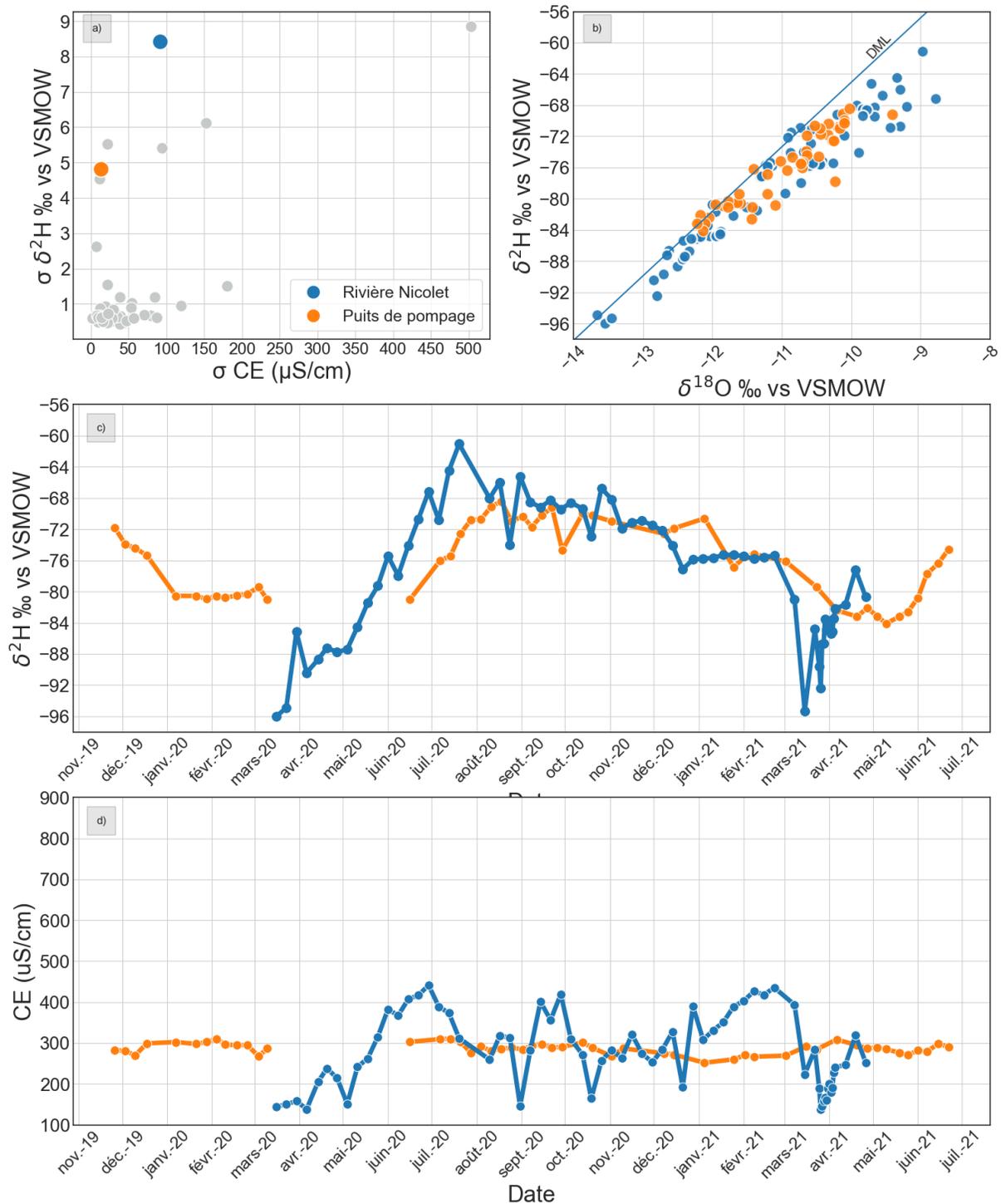


Figure 3-62 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement NIC_P10 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données isotopiques disponibles pour l'installation **NIC_P11** couvrent la période de novembre 2019 à juin 2021, pour un total de 46 échantillons. Noter qu'en raison de la pandémie de Covid-19, l'acquisition des données a été interrompue de mars à juin 2020, ce qui inclut une période propice à des forçages isotopiquement marqués par des eaux fortement appauvries, donc potentiellement utile pour les objectifs du présent projet. On observe un écart-type sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 4,54 ‰ vs V-SMOW (N=46) et un écart-type sur les valeurs de conductivité électrique de 11,68 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (N=50) (Figure 3-63a).
- La distribution relativement large des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, depuis [-84‰; -12.2‰ vs-VSMOW] à [-68‰; -9.4‰ vs-VSMOW], se retrouve entièrement, à quelques points près plus évaporés encore, dans le domaine de variation des eaux de la rivière Nicolet, c.-à-d. proche de celui des précipitations, mais avec une signature sensiblement évaporée (Figure 3-63b).
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ est assez marquée, avec un appauvrissement stable de novembre 2019 à janvier 2020 (de -72 à -80‰ vs V-SMOW) suivi d'une stabilisation à -80‰ jusqu'à mars 2020. Dans la deuxième période de données (juin 2020 à septembre 2020), on observe une remontée rapide jusqu'à une valeur plateau de -68‰ en septembre 2020, suivie d'une stabilisation à -76‰ au début de l'hiver (février). Après une interruption durant la période de crue printanière, les données reprennent à -80‰ vs V-SMOW à la fin avril 2021, avant de descendre à -80‰ en mai et de remonter jusqu'à atteindre -74‰ à la fin de la période d'acquisition des données, en juin 2021. (Figure 3-63c).
- Les valeurs de conductivité électrique de l'eau souterraine sont dans la moyenne de celles de l'eau de surface. Avec une moyenne autour de 265 $\mu\text{S}/\text{cm}$ contre 280 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ pour la rivière Nicolet, elles correspondent à la gamme des valeurs minimales de l'eau de surface. Aucune tendance évolutive claire ne se dénote (Figure 3-63d).

NIC_P11

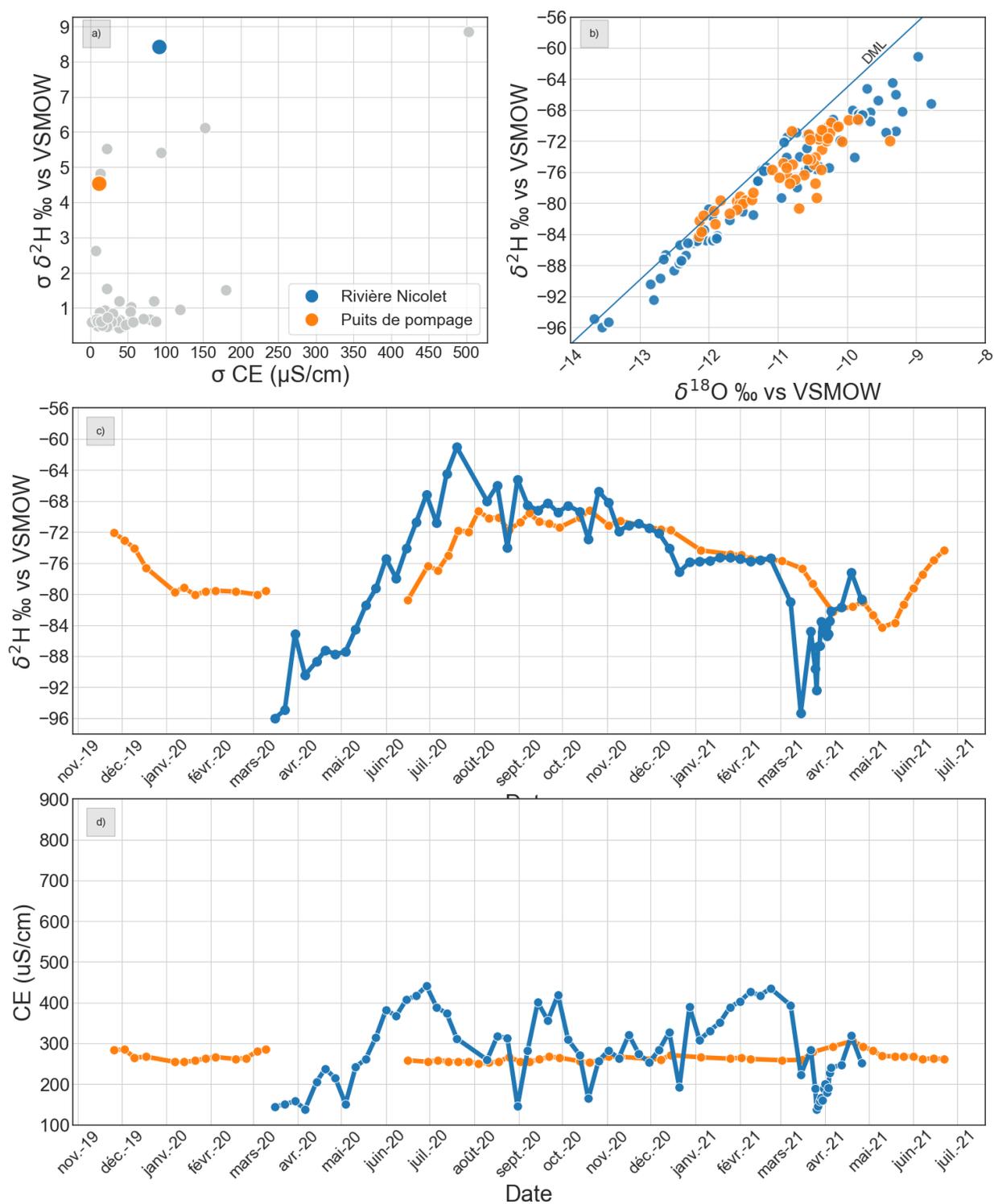


Figure 3-63 Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement NIC_P11: a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

3.3.4.8 NIC_P12

Caractérisation hydrogéologique

- Le prélèvement NIC_P012 se classe comme étant approvisionné par une eau souterraine sous influence directe d'une eau de surface (ESSIDES). Il est donc attendu que les eaux de surface au sens large, donc non restreintes aux eaux de lacs et rivières, exercent une influence sur son alimentation. Il est constitué d'un drain horizontal installé parallèlement à la rivière Bulstrode (affluent de la rivière Nicolet) à une distance d'environ **25 mètres de la rivière**. Les crépines se trouvent à **5 mètres de profondeur**, dans un aquifère granulaire. Les coupes stratigraphiques ont confirmé qu'il n'y avait pas d'aquitard entre la crépine et la surface du sol, cette installation est donc considérée comme dans un **aquifère granulaire libre**.

NIC_P12

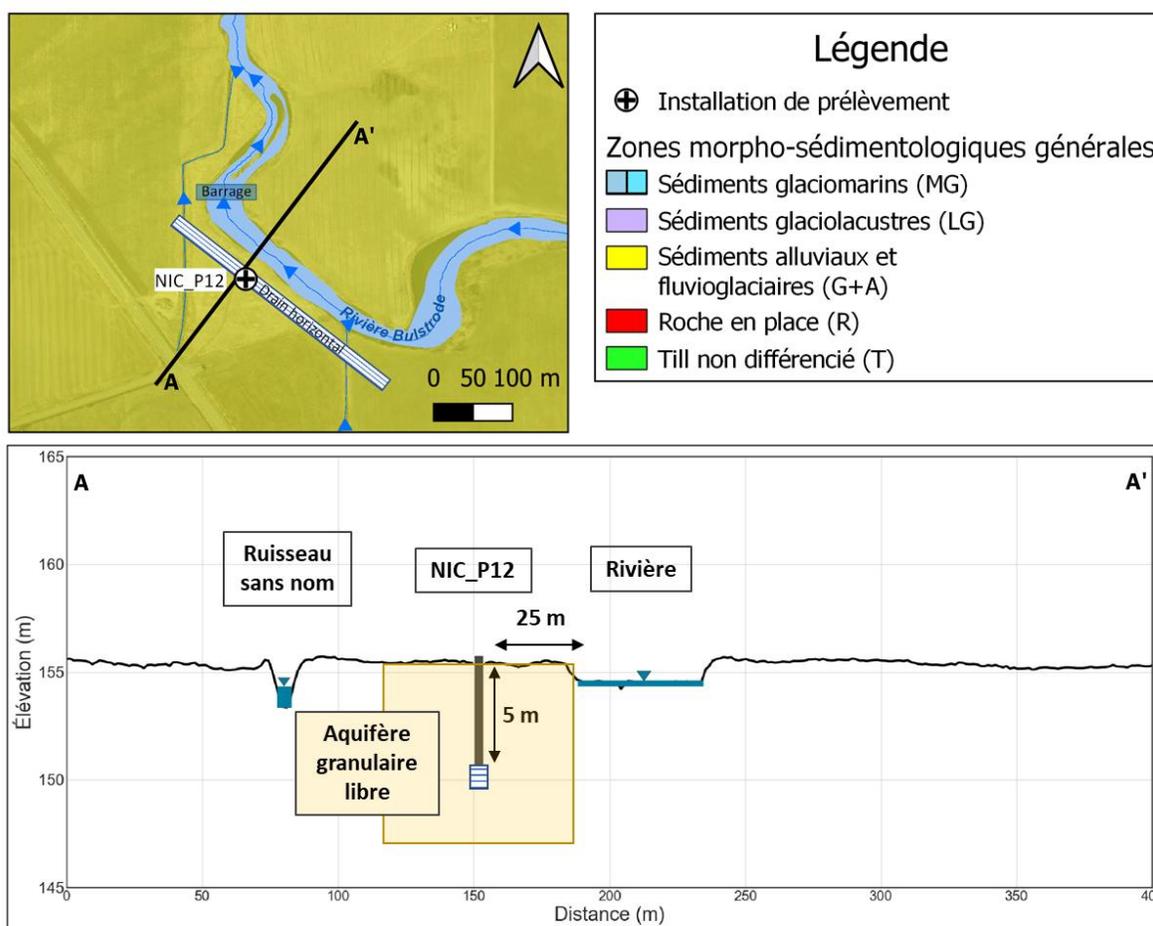


Figure 3-64 Localisation du site de prélèvement NIC_P12 et coupe hydrostratigraphique

Résultats du suivi géochimique et isotopique

- Les données disponibles couvrent une période de 21 mois, de novembre 2019 à juin 2021, pour un total de 61 échantillons. On observe un écart-type (Figure 3-65a) sur les valeurs de $\delta^2\text{H}$ de 5,5 ‰ vs V-SMOW ($n = 61$) et un écart-type pour la conductivité électrique de 21,65 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ($N=61$).
- La distribution large des ratios isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, depuis [-90‰; -13.2‰ vs-VSMOW] à [-68‰; -10‰ vs-VSMOW], telle qu'illustrée dans la Figure 3-65b, se superpose à une partie importante du domaine des eaux de la rivière Nicolet, c.-à.-d. proche de celui des précipitations, mais avec une signature légèrement évaporée.
- L'évolution temporelle du $\delta^2\text{H}$ (Figure 3-65c) est très marquée et correspond sensiblement à celle de la rivière Nicolet: une relative stabilité autour de -80 ‰ vs VSMOW durant les premiers mois d'hiver 2020, suivie d'un appauvrissement marqué qui atteint -90 ‰ vs V-SMOW durant les mois d'avril-mai, d'un enrichissement graduel culminant à -68 ‰ vs V-SMOW pour progressivement retrouver une valeur autour de -74‰ au début de l'hiver 2021. Le pic de valeurs plus appauvries observé dans la rivière Nicolet début / mi-mars 2020 n'est pas visible dans l'eau souterraine, mais cela peut être dû à un pas de temps de mesure plus espacée ou à un taux de mélange différent avec l'eau souterraine.
- Les valeurs de conductivité électrique de l'eau souterraine sont typiquement en deçà de celles de l'eau de surface (Figure 3-65d). Avec une moyenne autour de 170 $\mu\text{S}/\text{cm}$ contre 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ pour la rivière Nicolet, elles correspondent à la gamme des valeurs minimales de l'eau de surface. Malgré un écart-type relativement faible sur les données de conductivité électrique, une évolution similaire à celle de l'eau de surface semble se dessiner, avec possiblement 1 à 2 mois de décalage temporel maximal en moyenne. Les plus basses valeurs sont ainsi observées en mai 2020 (contre mars-avril 2020 pour l'eau de surface) et des pics de valeurs élevées sont observés en juillet et septembre 2020, contre juin et septembre à l'eau de surface, respectivement.

NIC_P12

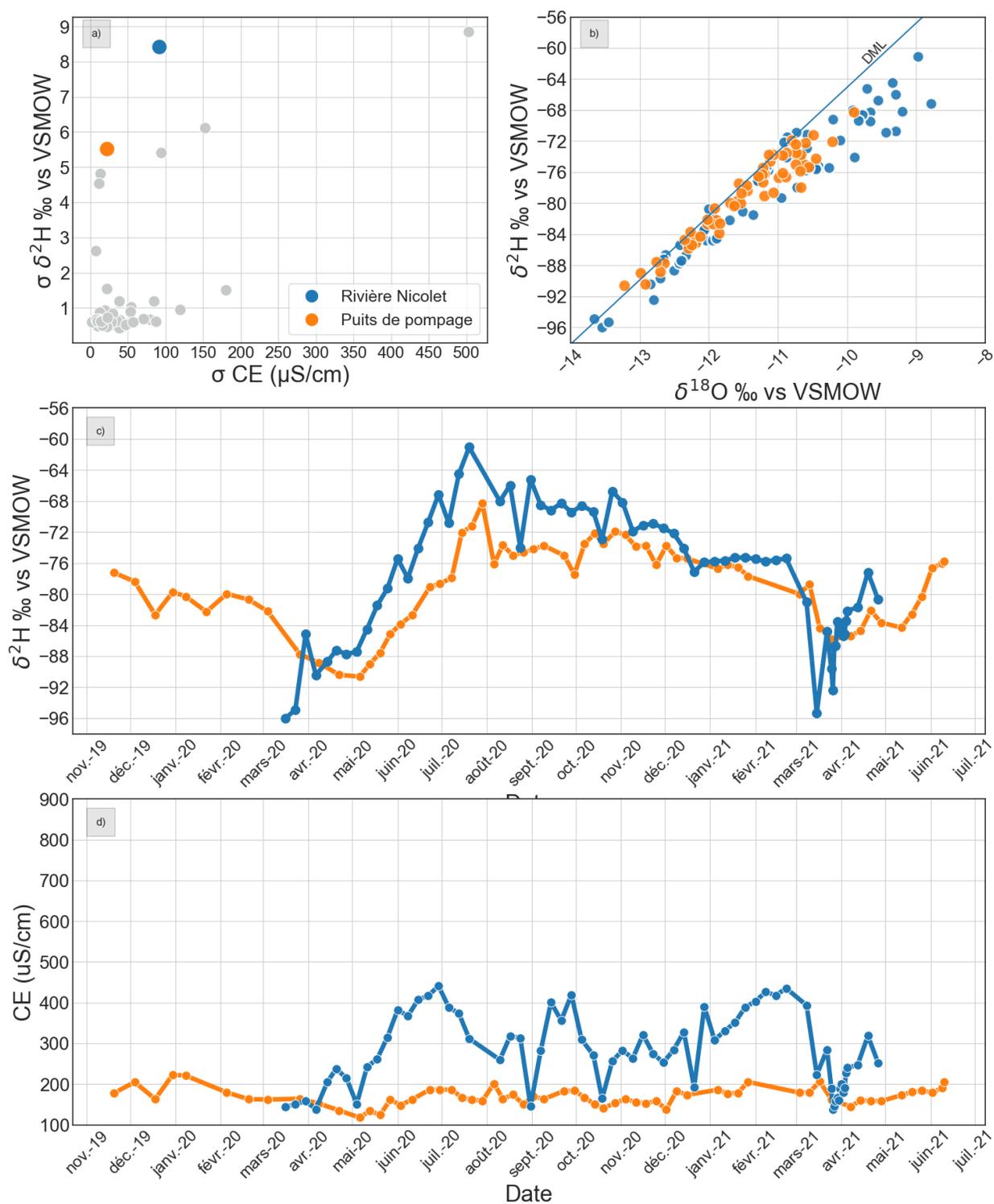


Figure 3-65 : Résultats du suivi géochimique et isotopique pour le prélèvement NIC_P12 : a) écarts-types observés dans le projet pour $\delta^2\text{H}$ et EC; b) diagramme binaire $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$; c) évolution temporelle de $\delta^2\text{H}$; d) évolution temporelle de la conductivité électrique

4 Discussion

4.1 Identification géochimique et isotopique des puits en situation de FSB

À partir des résultats des approches géochimique et isotopique, nous sommes en mesure de proposer une première classification de l'ensemble des puits de prélèvement selon trois modèles conceptuels, dont la description est détaillée dans cette section. Près de 25% des puits étudiés (9/40) montrent une évidence de contribution de l'eau de surface au mélange pompé et sont donc classés comme étant en situation de FSB, qu'elle soit continue (modèle 1) ou plus saisonnière (modèle 2). Environ 50% des autres puits à l'étude (19/40) ne présentent pas d'évidence de contribution d'eau de surface, et sont donc classés comme n'étant pas en situation de FSB (Modèle 3). Enfin, autour de 25% des puits (12/40) n'ont pas pu être classifiés en raison de lacunes dans les données.

4.1.1 Modèle conceptuel 1 : FSB permanente

Cinq installations de prélèvement ont été identifiées comme induisant de la filtration sur berge de façon permanente, soit les puits de NIC_P10, NIC_P11, NIC_P12, RDN_P14 et RDN_P15. Ils sont tous installés dans des **aquifères granulaires libres**, à des **distances de 6 à 50 mètres** d'une rivière et de **profondeurs de 5 à 14 mètres**.

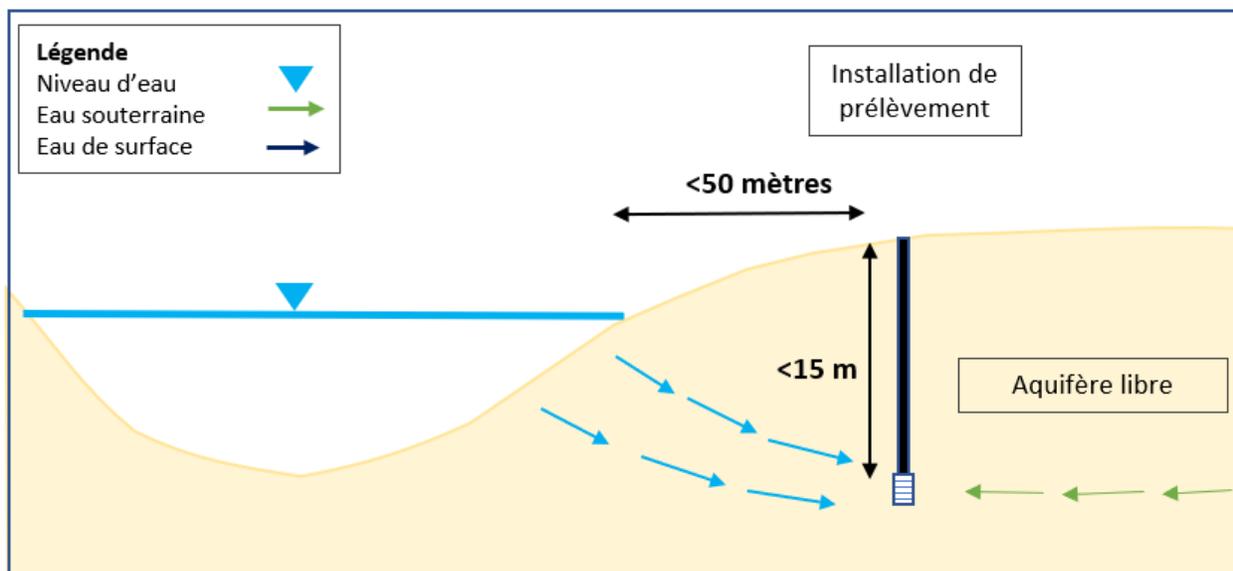


Figure 4-1 Schéma conceptuel; Modèle 1: FSB permanente

Les caractéristiques isotopiques de l'ensemble de ces installations de prélèvement sont marquées par une forte variabilité temporelle du signal isotopique à l'eau pompée. De plus, la comparaison entre le signal de l'eau de surface et le signal au puits indique :

- Une faible **atténuation**, signe d'un faible taux de mélange avec l'eau souterraine;
- Un faible **déphasage (Δt)**, signe d'une propagation du signal vers le puits de pompage.

Les caractéristiques géochimiques sont marquées par une faible variabilité temporelle de la conductivité électrique (CE), dont la moyenne est semblable à celle des eaux de surface (NIC_P10, NIC_P11 et NIC_P12). Dans le cas des prélèvements RDN_P14 et RDN_P15, la moyenne de la CE est plus faible que celle des eaux de surface. Cela étant, il convient de rappeler que la rivière du Nord a été échantillonnée systématiquement à un seul point de mesure. La CE d'une rivière étant contrôlée par les différentes sources d'alimentation (décharges d'eaux souterraines, ruissellement de surface, apports anthropiques), il est attendu qu'il y ait une variation des valeurs de l'amont à l'aval. La représentativité du point d'échantillonnage en surface pourrait donc être à étudier.

Les caractéristiques des 5 prélèvements du modèle conceptuel 1 sont présentées au Tableau 4-1.

Tableau 4-1 Caractéristiques des installations de prélèvement du modèle conceptuel 1 : FSB permanente

Puits	NIC_P10	NIC_P11	NIC_P12	RDN_P14	RDN_P15
Distance à l'eau de surface (m)	31	50	25	6	29
Profondeur du sommet de la crépine (m)	8	14	5	6	10
Type de captage	Tubulaire	Drains horizontaux	Drains horizontaux	Pointes filtrantes	Tubulaire
Type d'aquifère au droit du puits	Granulaire libre	Granulaire libre	Granulaire libre	Granulaire libre	Granulaire libre
Type de dépôt de surface	Alluvion de terrasse fluviale	Alluvion de terrasse fluviale ancienne	Alluvion de terrasse fluviale ancienne	Sédiment juxtaglaciaire	Alluvion de terrasse fluviale
Indice DRASTIC	200	200	145	203	191
Débit moyen pompé (m ³ /h)	125	416	117	119	24
Écart-type CE	13,56	11,68	21,65	22,13	7,44
Moyenne CE	286,89	265,59	169,59	135,37	136,59
Écart-type $\delta^2\text{H}$	4,78	4,34	5,29	2,40	2,63
Moyenne $\delta^2\text{H}$	-76,14	-75,31	-78,19	-76,48	-76,99
Écart-type $\delta^{18}\text{O}$	0,74	0,67	0,77	0,46	0,45
Moyenne $\delta^{18}\text{O}$	-10,97	-10,84	-11,36	-10,85	-10,97

4.1.2 Modèle conceptuel 2 : FSB saisonnière

Une connexion saisonnière avec les eaux de surface a été identifiée sur quatre puits : MIL_P01, NIC_P09, RDN_P03 et RDN_P04. Ces quatre puits sont installés dans différents types d'aquifères (**granulaires captifs, granulaire libre et roc captif**), à des **distances de 20 à 117 mètres** à l'eau de surface allant et à des **profondeurs de 18 à 38 mètres**.

Les caractéristiques isotopiques et géochimiques de l'ensemble de ces installations de prélèvement sont marquées par :

- Un écart-type sur la CE plus élevée que $25\mu\text{S}/\text{cm}$, indice de la variation du taux de mélange entre l'eau souterraine régionale et l'eau de surface infiltrée au puits;
- Une composition isotopique stable, sauf durant la période du dégel printanier, où elle se retrouve ponctuellement appauvrie;

Cette variation saisonnière s'interprète comme une **contribution temporaire** des eaux de surface à l'eau pompée dans le forage, détectable uniquement au dégel par l'approche géochimique et isotopique. Le mécanisme principal proposé pour expliquer ces apports saisonniers est une augmentation ou l'établissement temporaire d'un gradient hydraulique entre l'eau de surface et le puits, attribuable à plusieurs facteurs :

1. Forçage hydrologique

- a. Augmentation du niveau d'eau de la rivière dans un aquifère granulaire ou au roc libre. La connectivité hydraulique, bien que présente à l'année, n'est visible avec les outils géochimiques et isotopiques que lorsqu'elle est intensifiée, c.-à-d. au printemps.

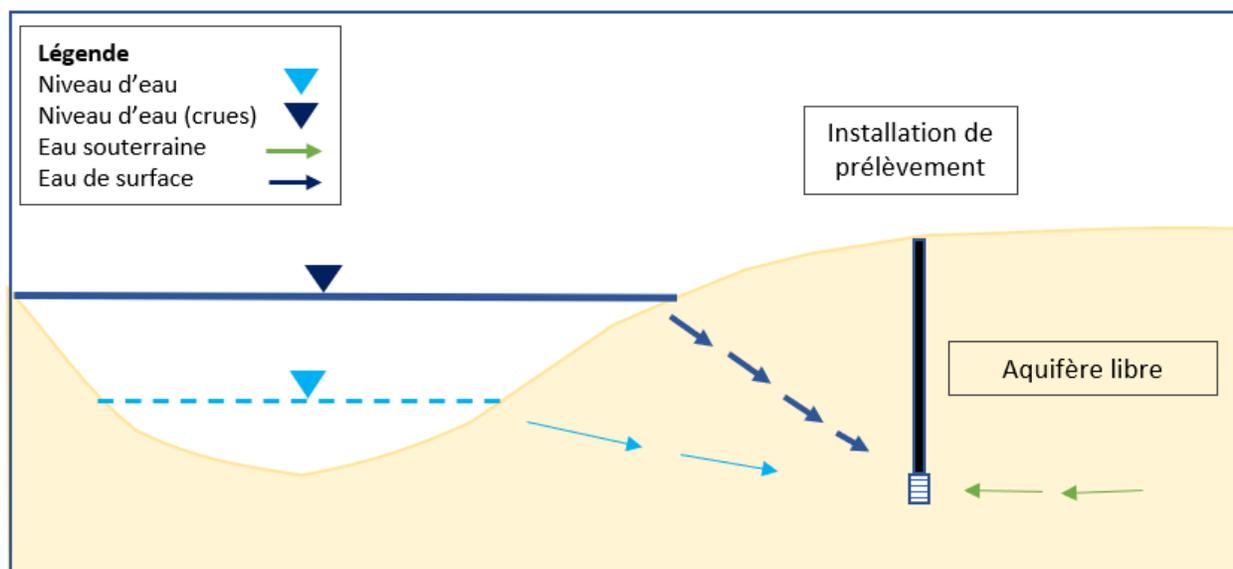


Figure 4-2 Schéma conceptuel; Modèle 2: FSB saisonnière-Impact de l'augmentation du niveau d'eau de l'eau de surface dans un aquifère granulaire libre

- b. Augmentation du niveau d'eau de la rivière permettant l'infiltration de l'eau dans un aquifère granulaire ou au roc captif. La connectivité hydraulique n'est présente qu'au printemps.

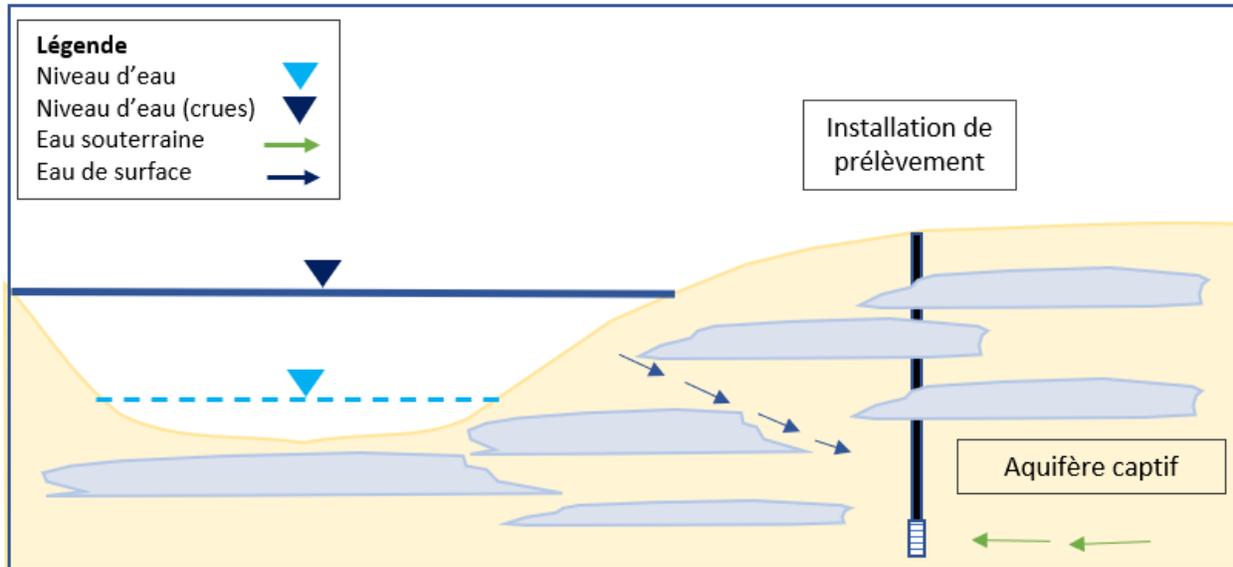


Figure 4-3 Schéma conceptuel; Modèle 2: FSB saisonnière-Impact de l'augmentation du niveau d'eau de l'eau de surface dans un aquifère granulaire captif

2. Forçage anthropique

- a. Augmentation temporaire du débit de pompage établissant un inversement de la direction d'écoulement dans un aquifère granulaire ou au roc libre. La connexion hydraulique est détectable uniquement lors des périodes de haute demande en eau.

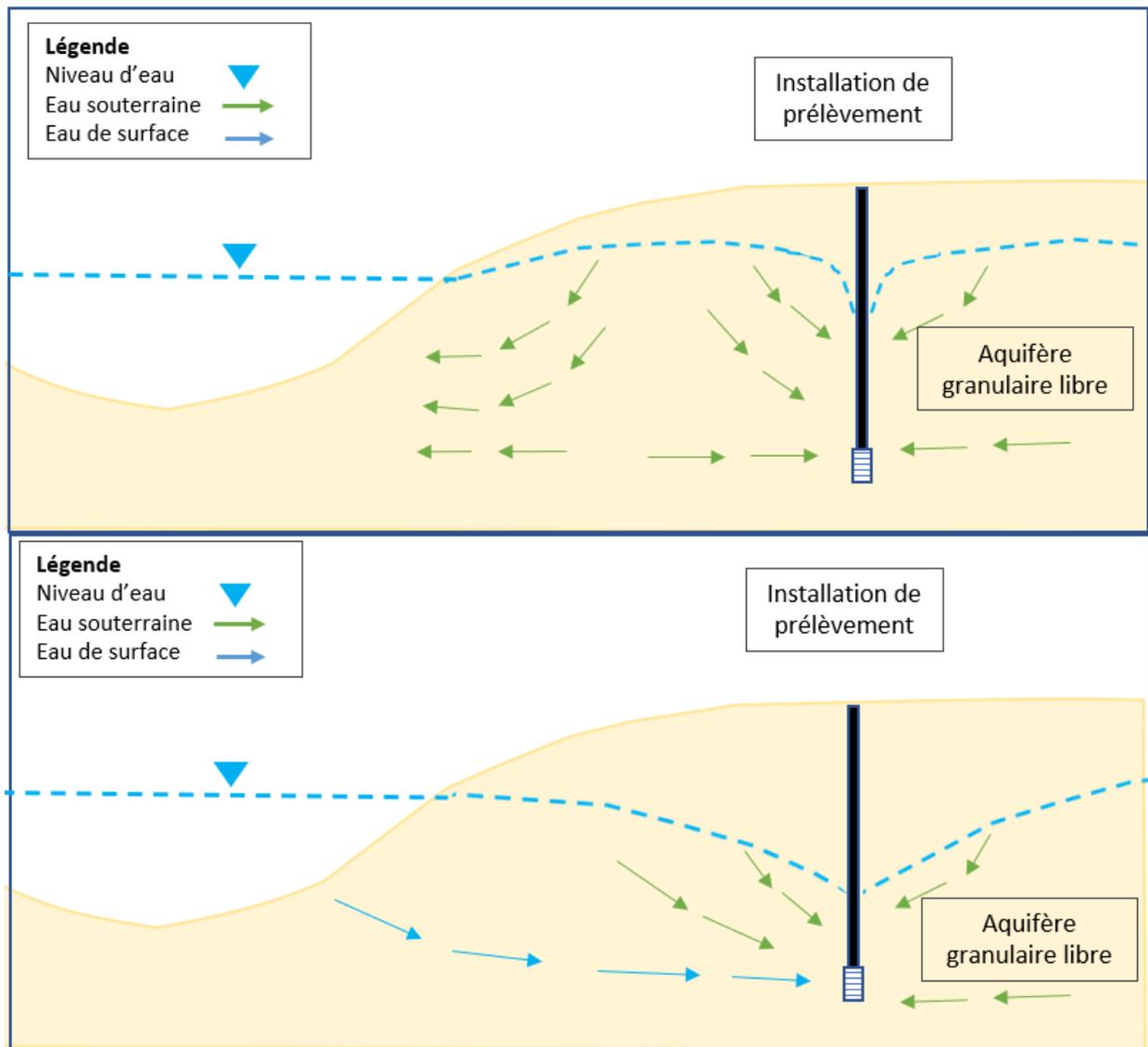


Figure 4-4 Schéma conceptuel; Modèle 2: FSB saisonnière-Impact de l'augmentation du débit de pompage sur les écoulements souterrains.

Les caractéristiques des 4 prélèvements du modèle conceptuel 2 sont présentées au Tableau 4-2.

Tableau 4-2 Caractéristiques des installations de prélèvement du modèle conceptuel 2 : FSB saisonnière

	MIL_P01	NIC_P09	RDN_P03	RDN_P04
Distance à l'eau de surface (m)	38	20	117	117
Profondeur du sommet de la crépine (m)	38	22	21	18
Type de captage	Tubulaire	Tubulaire	Tubulaire	Tubulaire
Type d'aquifère au droit du puits	Roc captif	Granulaire libre	Granulaire captif	Granulaire captif
Type de dépôt de surface	Sédiment glaciomarin fin d'eau profonde	Sédiment d'épandage proglaciaire subaquatique	Alluvion de terrasse fluviale	Alluvion de terrasse fluviale
Indice DRASTIC	92	187	120	120
Débit moyen pompé (m ³ /h)	NA	84	80	80
Écart-type CE	84,60	180,51	38,68	70,43
Moyenne CE	658,28	379,95	759,80	827,37
Écart-type $\delta^2\text{H}$	1,18	1,50	1,19	0,72
Moyenne $\delta^2\text{H}$	-75,19	-79,20	-75,22	-75,35
Écart-type $\delta^{18}\text{O}$	0,17	0,37	0,28	0,24
Moyenne $\delta^{18}\text{O}$	-11,20	-11,29	-11,18	-11,07

4.1.3 Modèle conceptuel 3 : Non-FSB

En l'absence d'indices de l'influence des eaux de la rivière sur le signal de l'eau pompée, 19 installations de prélèvement sont identifiées comme n'induisant *a priori* pas de FSB à partir des données disponibles. Les caractéristiques des installations de ce modèle conceptuel sont présentées à l'Annexe III: Caractéristiques des installations de prélèvement – Modèle conceptuel 3. Ces prélèvements sont installés dans différents types d'aquifères (**granulaire captif, granulaire libre, roc captif et roc libre**), à des **distances à l'eau de surface allant de 19 à 573 mètres** et des **profondeurs de 9 à 46 mètres**. Aucune propagation nette des signaux géochimiques et isotopiques n'est observée entre l'eau de surface et les puits de pompage. De plus, la distribution isotopique aux puits ne couvre pas le domaine des eaux de surface.

Des variations significatives de la CE ont certes été observées dans certains puits, mais l'effet des pompages sur la distribution verticale de la minéralisation des eaux souterraines au sein d'un aquifère pourrait suffire à les expliquer, comme l'illustrent les deux exemples suivants:

- Au puits RDN_P01, l'atteinte rapide d'un palier de CE avec une valeur 30% plus élevée durant une période d'intensification des pompages (Figure 4-6) pourrait s'expliquer par

la remobilisation temporaire d'eaux plus minéralisées. Ces eaux de conductivité électrique plus élevée correspondraient à des eaux souterraines plus anciennes et/ou marquées par une contamination anthropique (ex.: sels de déglçage).

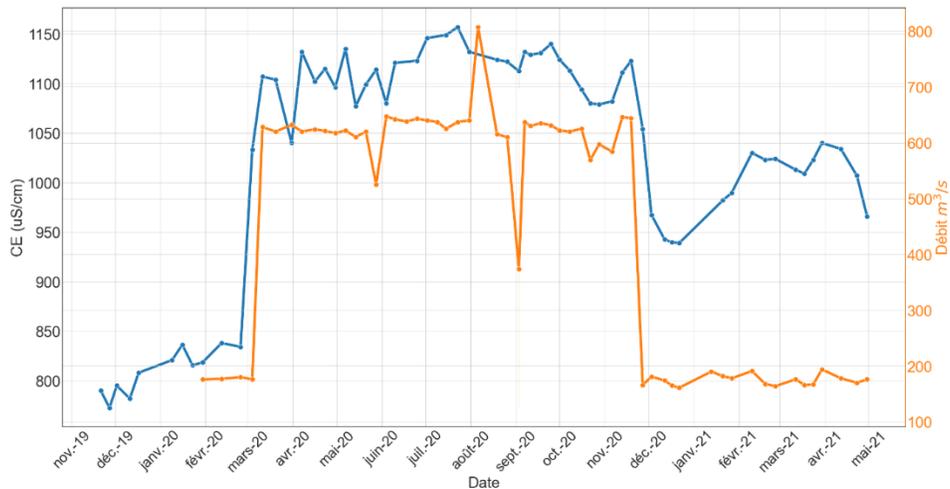


Figure 4-5 Corrélation entre la variation de la CE et le débit de pompage à l'installation de prélèvement RDN_P01

- L'impact respectif des pompages de différents puits localisés à proximité pourrait causer les évolutions de CE observées aux puits RDN_P11, RDN_P12 et RDN_P13 (Figure 4-6). Dans les cas où plusieurs puits se trouvent dans un même secteur (voir Figure 3-18), il apparaît donc important d'échantillonner chaque puits séparément pour pouvoir évaluer si un tel phénomène est en place.

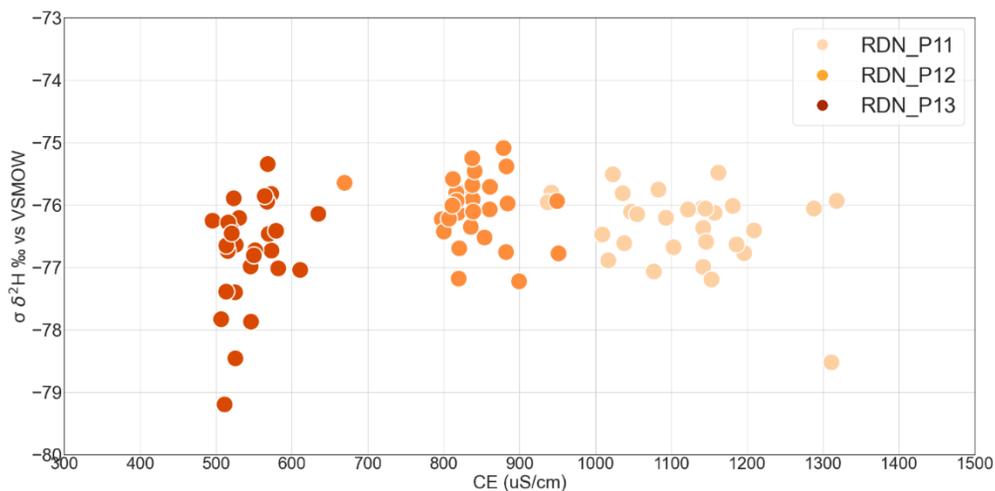


Figure 4-6: Évolution temporelle des traceurs des puits RDN_P11, RDN_P12 et RDN_P13, tous situés à proximité (voir Figure 3-18)

4.2 Grille de lecture simplifiée

4.2.1 Présentation

Afin de simplifier l'interprétation et de rendre les outils isotopique et géochimique accessibles aux non-spécialistes, une grille de lecture simplifiée a été proposée. Elle est basée sur les écarts-types sur $\delta^2\text{H}$ et sur la CE pour l'ensemble des séries temporelles aux sites de prélèvements municipaux étudiés. La sélection de $\delta^2\text{H}$ comme proxy de la signature isotopique (au lieu de $\delta^{18}\text{O}$) est due à sa meilleure précision analytique au regard des variations attendues. De plus, $\delta^2\text{H}$ est moins sensible aux processus de fractionnement isotopique comme l'évaporation. La Figure 4-7 illustre cette grille de lecture simplifiée, qui est basée sur les critères simples suivants :

- Les puits en situation de FSB permanente (modèle conceptuel 1) sont tous caractérisés par des écarts-types sur $\delta^2\text{H}$ et CE supérieurs à 1 ‰ vs VSMOW et inférieurs à 25 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivement;
- Les sites en situation de FSB saisonnière (modèle conceptuel 2) sont à 75 % caractérisés par des écarts-types sur $\delta^2\text{H}$ et CE supérieurs à 1 ‰ vs VSMOW et supérieur à 25 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivement;
- Les sites de prélèvements qui ne sont pas en situation de FSB (modèle conceptuel 3) montrent typiquement des écarts-types sur $\delta^2\text{H}$ inférieurs à 1 ‰ vs VSMOW.

Des seuils de 1 ‰ vs VSMOW et de 25 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour les écarts-types sur $\delta^2\text{H}$ et pour la CE, respectivement, apparaissent donc déterminants pour discriminer les sites de prélèvement en situation de FSB (permanente et saisonnière) de ceux qui ne le sont pas. Ces valeurs correspondent à l'erreur absolue sur la mesure sur chacun des traceurs. Les séries temporelles pour lesquelles la distribution des valeurs est telle que les écarts-types sont supérieurs à ces seuils témoignent, sans équivoque, de l'influence d'un processus naturel, ici la FSB.

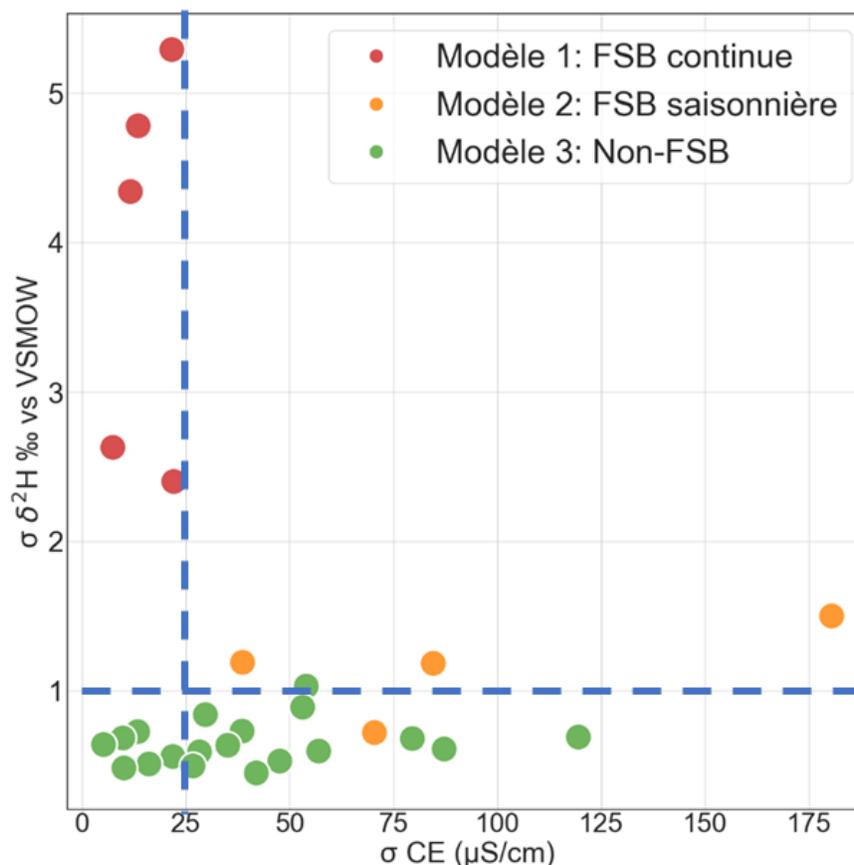


Figure 4-7 : Relation entre les écarts-types sur les séries temporelles de $\delta^2\text{H}$ et CE aux sites de prélèvement.

4.2.2 Conditions d'application

L'application de cette grille de lecture simplifiée pour l'identification des puits en situation de FSB présente l'avantage de ne pas requérir de connaissances ni de compétences avancées en géochimie isotopique, ce qui rend leur utilisation pratique pour l'ensemble des professionnels impliqués dans la gestion des sites de prélèvements. Elle requiert toutefois que certaines conditions soient respectées (Figure 4-8). Sachant que la mesure de l'écart-type est sensible à la fréquence de l'échantillonnage, il est important que :

1. les séries temporelles comportent ≥ 1 échantillon/mois; et
2. la durée d'échantillonnage couvre au moins 12 mois.

Une fréquence d'échantillonnage < 1 échantillon/mois et/ou une durée d'échantillonnage couvrant < 1 année hydrologique pourrait ne pas rendre compte de la saisonnalité du signal. Un total de 12 installations de prélèvement n'ont pas atteint ces conditions, ils n'ont donc pas pu être classés dans la grille de lecture et selon les modèles conceptuels (Annexe IV: Caractéristiques des installations de prélèvement – Sites non retenus). Toutefois, si une série temporelle ne

respecte pas ces deux critères, mais que les écarts-types sont supérieurs à 1 ‰ vs VSMOW et/ou supérieurs à 25 µS/cm, il est possible de conclure que le site de prélèvement est en situation de FSB. D'autre part, il est nécessaire de s'assurer de la rigueur (erreurs analytiques) des laboratoires pour ces mesures.

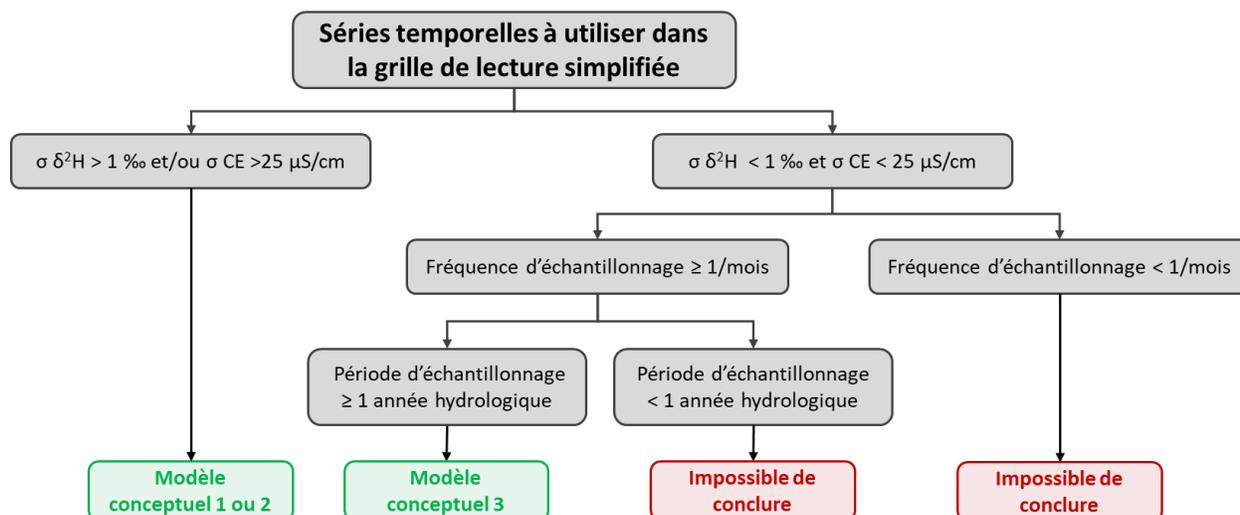


Figure 4-8 : Conditions d'application de la grille de lecture simplifiée

4.3 Sensibilité des sites de FSB aux changements climatiques

Comparativement aux installations de prélèvement d'eau souterraine, les sites de FSB sont particulièrement sensibles aux changements de contexte hydroclimatique, car leur capacité d'atténuation des contaminants dépend entre autres du gradient hydraulique entre l'eau de surface et le site de prélèvement. Dans le contexte des changements climatiques, il est attendu que le cycle de l'eau s'intensifie, particulièrement dans les régions froides, comme au Québec. Ces modifications hydroclimatiques mèneront à une période de dégel plus hâtive et des crues printanières de plus grande intensité (Barnett et al., 2005; Leveque et al., 2021; Rouhani & Leconte, 2018). Lors de ces périodes de crues, il est ainsi anticipé que les cas de FSB saisonnière s'intensifient et deviennent plus nombreux. Il est aussi attendu que l'évolution des conditions hydroclimatiques entraîne des périodes d'étiage plus importantes, à même d'affecter la direction et l'intensité des écoulements souterrains aux sites identifiés comme FSB permanente. **L'identification de l'ensemble des sites de FSB au Québec est donc indispensable pour être à même d'anticiper les implications des changements climatiques sur la vulnérabilité de ces sites.**

4.3.1 Critères complémentaires pour l'identification préliminaire des prélèvements FSB

Pour permettre une identification des prélèvements hybrides à l'échelle de la province, il s'avère nécessaire d'établir des critères complémentaires, pouvant être utilisés sur l'ensemble des

installations de prélèvement d'eau souterraine au Québec. Trois paramètres simples, pour lesquels des données sont typiquement disponibles pour chaque site de prélèvement, ont été testés :

1. La profondeur du sommet de la crépine ;
2. La distance horizontale du site de prélèvement à l'eau de surface ;
3. Le type d'aquifère au droit du puits.

La Figure 4-9 illustre la relation entre la profondeur du puits et la distance à l'eau de surface pour l'ensemble des puits étudiés et classés dans les modèles conceptuels 1 à 3. Il apparaît rapidement que les installations qui correspondent au Modèle conceptuel 1 : FSB continue peuvent être identifiées par les trois critères suivants :

1. Profondeur < **15m**,
2. Distance à l'eau de surface < **50m** et
3. Aquifère **granulaire libre**.

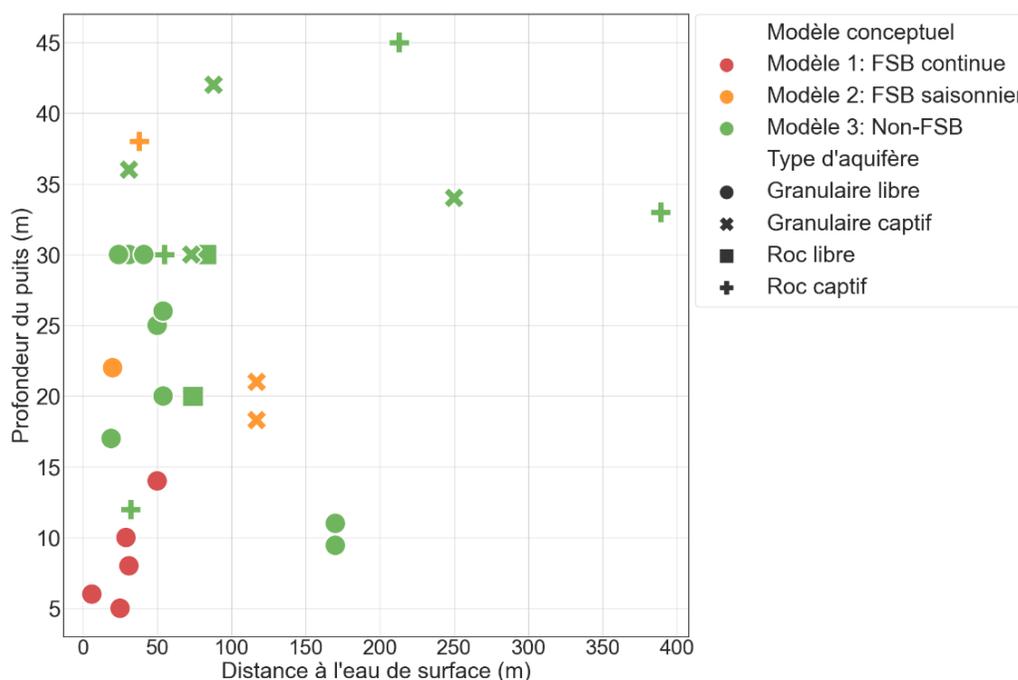


Figure 4-9 : Distribution des puits correspondant aux différents modèles conceptuels en fonction de leur profondeur et de leur distance à l'eau de surface

Pour assurer une robustesse dans l'identification préliminaire des sites en situation de FSB à l'échelle du Québec, d'autres critères basés sur les contextes hydrogéomorphologiques devront être couplés aux trois critères identifiés ci-haut. Pour ce faire, il serait adapté d'utiliser les informations contenues dans les analyses de vulnérabilité des installations de prélèvement de

catégorie 1: distance verticale entre la crépine du puits et le plan d'eau de surface, indice DRASTIC au droit du puits et dans les différentes aires de protection des prélèvements, types de dépôts quaternaires, débits pompés ou type d'eau de surface.

4.3.2 Vulnérabilité des sites de prélèvement en situation de FSB

Les résultats des suivis isotopiques et géochimiques ont démontré la présence d'un lien hydraulique entre l'eau de surface et les installations de prélèvements dans 9 des 41 sites étudiés. Ce lien hydraulique n'est cependant pas nécessairement synonyme de vulnérabilité à la contamination, la FSB étant précisément utilisée à grande échelle pour sa capacité d'atténuation des contaminants. Deux paramètres permettent de préciser le degré de vulnérabilité des sites de prélèvements étudiés: la présence de contamination microbiologique à l'eau brute et l'intersection des aires de protections avec une eau de surface (détaillée à la section 4.3.3).

La présence de *Escherichia coli* à l'eau brute est typiquement utilisée comme indicateur de contamination microbiologique, et sert de critère de surveillance mis en place par le RQEP. Les données transmises par le MELCC concernant la présence de *E. coli* à l'eau brute des sites de prélèvement étudiés ont été comparées avec les signaux isotopique et géochimique des sites pour lesquels un lien hydraulique a été identifié, c'est-à-dire les puits classés dans les modèles conceptuels 1 et 2. Seuls les prélèvements NIC_P12, NIC_P10 (Modèle 1), RDN_P03 et RDN_P04 (Modèle 2) avaient un historique de contamination bactériologique dans les 5 dernières années. La Figure 4-10 présente les dates où une telle contamination a été mesurée dans ces prélèvements pendant la durée du projet (novembre 2019 à juin 2021).

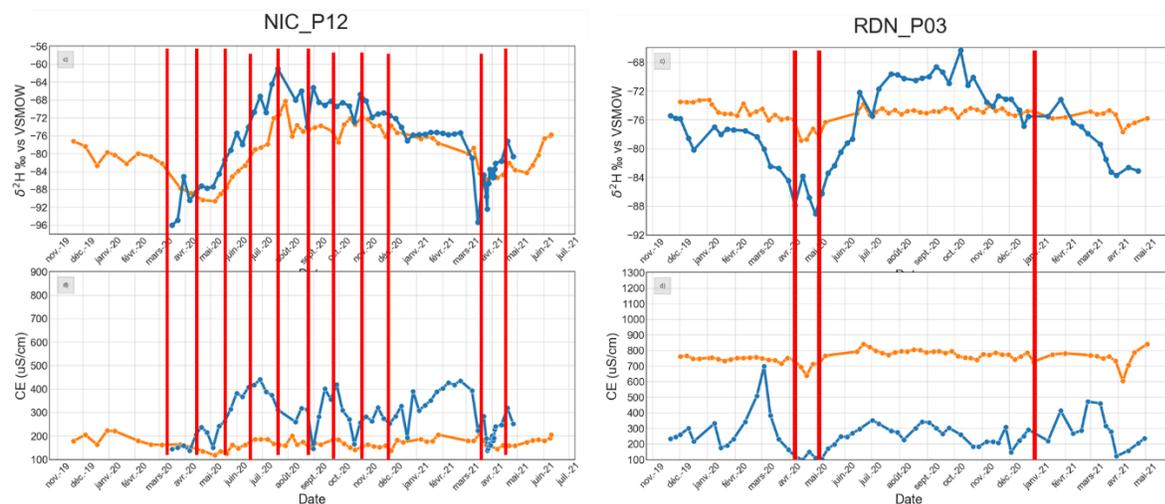


Figure 4-10 Historiques de contamination aux installations NIC_P12 (FSB continue) et RDN_P03 (FSB saisonnière). Les lignes rouges correspondent aux épisodes de contamination à la bactérie *E.Coli*.

Le site NIC_P12 (modèle conceptuel 1), qui est le seul prélèvement classé ESSIDES du projet, présente un historique de contamination durant toute l'année, sauf pendant les mois d'hiver. Le site RDN_P03 (modèle conceptuel 2), présente une contamination au printemps, c.-à-d. justement la période pour laquelle les outils isotopique et géochimique ont révélé la mise en place d'une FSB saisonnière. **L'approche géochimique et isotopique développée dans le présent projet démontre donc sa pertinence pour anticiper les conditions propices à une contamination microbiologique entraînée par l'infiltration de l'eau de surface.**

L'efficacité de ce prétraitement naturel qu'est la FSB est contrôlée à la fois par le taux de mélange entre eau de surface et eau souterraine (effet de dilution des contaminants) et par le temps de transport de l'eau de surface dans les berges jusqu'au puits de pompage. Dans le cadre de cette étude, lorsque cela était possible, une analyse préliminaire des temps de transport de l'eau infiltrée dans les berges a été réalisée à l'aide de la méthode graphique « pic à pic » (p.ex. Massmann et al., 2008). Elle permet d'obtenir une première approximation en estimant le décalage temporel entre les extrema du signal de l'eau de surface et celui de l'eau pompée. Ces valeurs correspondent au temps de transport moyen de l'eau dans les berges. L'analyse (Figure 4-11) pour 4 sites de prélèvement en situation de FSB permanente mène à des temps de transport approximatifs de **45 jours** (RDN_P15), **30 jours** (NIC_P10 et NIC_P11) et **15 jours** (NIC_P12).

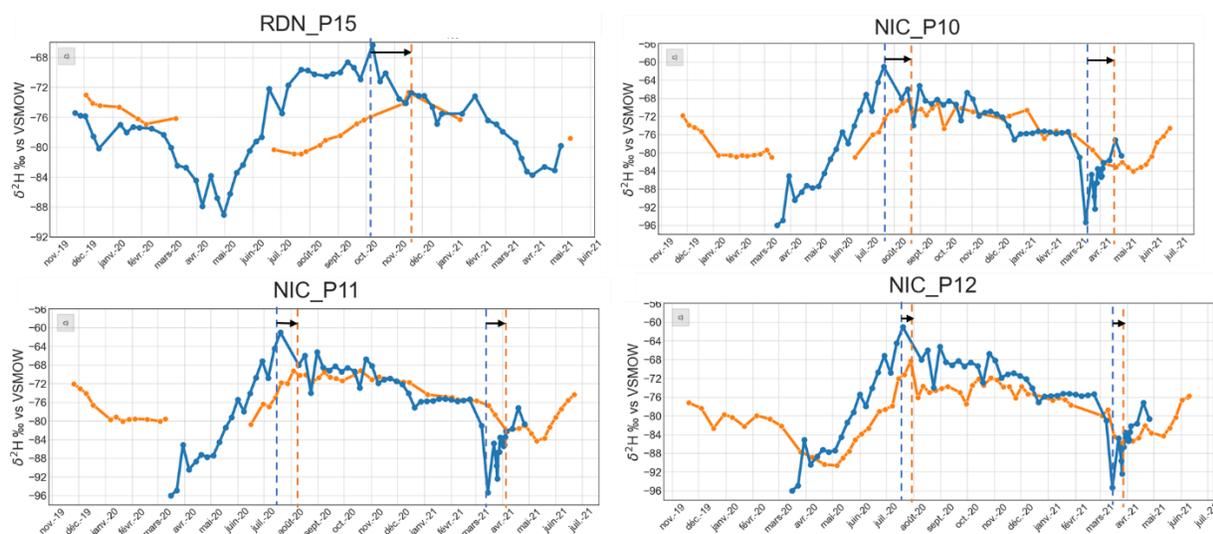


Figure 4-11 Méthode graphique d'estimation des temps de transport de l'eau dans les berges pour les prélèvements RDN_P15, NIC_P10, NIC_P11 et NIC_P12

4.3.3 Implications pour la protection des sources d'eau potable en situation de FSB

Au Québec, la détermination des aires de protection intermédiaires (bactériologique et virologique) pour les prélèvements d'eau souterraine de catégorie 1 se base sur des temps de

transport (200 et 550 jours, respectivement), établis sur la base d'une estimation du temps de survie maximal des bactéries pathogènes et des virus en zone saturée. Cette étude montre donc que dans le cas particulier de la FSB, **une atténuation adéquate des contaminants bactériologiques et virologiques est permise malgré des temps de transport inférieurs à ceux définis par les aires de protection intermédiaires**. De fait, pour l'ensemble des sites de prélèvement étudiés, les aires de protection intermédiaire qui ont pu être consultées dans les rapports d'analyse de vulnérabilité intersectaient une eau de surface dans 75% des cas, soit dans l'ensemble des 9 prélèvements des modèles conceptuels 1 et 2, et dans 22 installations du modèle conceptuel 3. L'intersection de l'aire de protection intermédiaire avec une eau de surface, qu'utilisent certaines juridictions internationales comme critère préalable d'identification de puits sous influence directe de l'eau de surface (p. ex. la Nouvelle-Zélande (Ministry for the Environment, 2019) n'est donc pas nécessairement signe d'une vulnérabilité associée aux rivières et lacs adjacents. Les méthodes actuelles de délimitation des aires de protection des installations de prélèvement d'eau souterraine ne sont donc pas adaptées pour prendre en compte la spécificité des processus impliqués lors de la FSB.

L'approche géochimique et isotopique, telle que développée dans ce projet, est dimensionnée pour révéler l'infiltration récente d'une eau de surface, qui proviendrait d'un lac ou d'une rivière voire de l'apparition temporaire d'une accumulation d'eau de fonte de neige dans un bas-fond à proximité d'un puits. Elle ne vise cependant pas à identifier l'infiltration locale d'eau de surface qui serait, par exemple, issue d'une fosse septique ou d'un chemin d'écoulement préférentiel le long d'un puits mal aménagé. En effet, l'infiltration de ces masses d'eau représenterait des volumes probablement trop faibles avec un signal isotopique trop peu marqué pour influencer visiblement celui de l'eau souterraine prélevée au puits. Pour identifier ce type de contamination, entraînant un classement ESSIDES, un suivi microbiologique reste plus adapté.

5 Conclusion et recommandations

Ce projet pilote a exploré la possibilité **d'identifier les sites de prélèvements municipaux en situation de filtration sur berges (FSB)** à partir de critères simples basés sur la dispersion des signaux géochimiques et isotopiques entre l'eau de surface et les puits de pompage. L'hypothèse sous-jacente était que le signal temporel des traceurs dans l'eau de surface se propage avec l'infiltration de celle-ci dans l'aquifère et se retrouve à l'eau pompée, bien qu'atténué et déphasé.

Un suivi temporel à un pas de temps mensuel à hebdomadaire de la composition isotopique de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) et de la conductivité électrique (CE) a été mis en place durant une période de 6 à 18 mois pour 40 sites de prélèvement d'eau souterraine municipaux et 4 rivières adjacentes au Québec. L'échantillonnage à pas de temps mensuel des eaux de surface a permis de constater la large amplitude saisonnière des signaux géochimique et isotopique, qui s'est révélée cruciale pour l'identification de la connexion surface/souterrain.

Les données issues des eaux souterraines ont ensuite mis en évidence trois modèles conceptuels d'écoulement des eaux souterraines en lien avec la FSB. Un lien hydraulique clair a été identifié dans un quart des puits ($n = 9$), qu'il soit permanent ou saisonnier, tandis que la moitié ($n = 19$) des puits ont été classés comme non-FSB. Les bases de données du quart restant ($n = 12$) ne couvraient pas toute la temporalité saisonnière nécessaire (1 échantillon/mois pendant 12 mois), des installations n'ont donc pas été prises en compte dans le classement.

Dans le **modèle conceptuel 1** (FSB permanente) :

- Une propagation claire du signal isotopique de l'eau de la rivière aux eaux souterraines pompées a permis d'identifier une connexion hydraulique à longueur d'année.
- Les 5 puits de cette catégorie sont tous aménagés dans des **aquifères granulaires libres**, à **moins de 50 mètres d'une rivière** et un maximum de **15 mètres de profondeur**.

Dans le **modèle conceptuel 2** (FSB saisonnière) :

- L'identification de la propagation du signal de la rivière dans le puits était limitée à la période du dégel printanier. Le mécanisme principal proposé pour expliquer ces apports saisonniers en eau de surface est un changement de gradient hydraulique entre l'eau de surface et le puits, permettant une recharge locale via l'augmentation ou l'établissement temporaires de la contribution de l'eau de surface infiltrée à l'eau brute pompée. Ces changements de gradient hydraulique peuvent être causés par des :
 - Forçages hydrologiques : modification du niveau d'eau dans l'eau de surface
 - Forçage anthropique : modification du débit de pompage au prélèvement

- Les quatre prélèvements de ce modèle sont installés dans **différents types d'aquifères (granulaires captifs, granulaire libre et roc captif)**, à des **distances à l'eau de surface allant de 20 à 117 mètres** et des **profondeurs de 18 à 38 mètres**.

Enfin, dans le **modèle conceptuel 3** (non-FSB):

- L'absence de propagation nette des signaux a pointé vers une absence apparente d'influence des rivières et lacs adjacents sur le prélèvement.
- Les 19 puits du modèle 3 se retrouvent entre **25 et 390 mètres de distance** d'une eau de surface et sont construits **entre 10 mètres et 50 mètres de profondeur**. Tous les contextes hydrogéologiques sont représentés (aquifère granulaire libre, captif et roc fracturé).

Afin de faciliter l'interprétation et de rendre ces outils accessibles au plus grand nombre, une grille de lecture simplifiée a été proposée. À partir de l'écart-type respectif du $\delta^2\text{H}$ et de la CE, elle permet d'identifier rapidement un puits en situation de FSB permanente et de distinguer les puits en situation de FSB saisonnière. Sachant que la mesure de l'écart-type est sensible à la densité et à la fréquence de l'échantillonnage, une matrice a été proposée pour encadrer l'utilisation la grille de lecture. Elle peut se résumer par les critères suivants :

- Les séries temporelles comportent **≥ 1 échantillon/mois**;
- La période d'échantillonnage couvre au moins **12 mois consécutifs** pour rendre compte de la saisonnalité du signal (s'il y a lieu).

L'identification de la typologie des puits selon trois modèles conceptuels a permis de définir ceux qui seront les plus sensibles aux changements climatiques. En effet, les écoulements aux sites de FSB seront amenés à évoluer en lien avec des étiages plus prononcés, des crues plus fréquentes et plus intenses ainsi que des périodes de gel et dégel modifiées, qui n'affecteront pas tous les modèles conceptuels de la même manière.

Des éléments de discussion en lien avec la protection des sources des sites en situation de FSB ont également été amenés. Tout d'abord, les prélèvements du modèle conceptuel 1 (FSB permanente) se distinguent facilement des autres prélèvements d'eau souterraine en cumulant trois critères simples :

- **Profondeur < 15m,**
- **Distance à l'eau de surface < 50m et**
- **Aquifère granulaire libre**

Aucun critère hydrogéologique, de profondeur ou de distance n'a permis d'identifier facilement les prélèvements du modèle conceptuel 2 (FSB saisonnière). **Une analyse plus approfondie des**

liens entre des critères hydrogéomorphologiques comme la distance verticale entre la crépine du puits et le plan d'eau de surface, l'indice DRASTIC au droit du puits et dans les différentes aires de protection des prélèvements, les types de dépôts quaternaires, les débits pompés ou le type d'eau de surface permettrait d'établir des critères d'identification plus fins.

Le contour des aires de protection intermédiaire, déterminé par modélisation et présenté dans les analyses de vulnérabilité des sites de prélèvement, interceptait généralement les eaux de surface. Lorsque les données géochimiques et isotopiques du présent projet en ont permis le calcul, le temps de transport dans les berges entre l'eau de surface et les puits s'est révélé largement inférieur au seuil de 200 jours qui délimite le contour de l'aire de protection intermédiaire bactériologique. Cependant, les données bactériologiques des prélèvements et leur non-classement ESSIDES (hormis pour un) démontrent l'efficacité de la FSB permanente comme prétraitement naturel contre la contamination bactérienne de l'eau de surface. Aux puits de FSB saisonnière, il est attendu que la propagation éventuelle de contaminants bactériologiques est aussi rapide que discontinue. Un suivi moins récurrent qu'une fois par mois pendant un an, à l'instar du présent projet, pourrait ne pas être à même d'identifier les périodes clés de l'année durant lesquelles une contamination bactériologique est susceptible de se propager à l'eau brute.

Finalement, ce type d'approche basé sur une lecture des informations in situ provenant de l'eau a démontré être très prometteur pour identifier les sites de FSB et en développer une typologie de vulnérabilité dans un contexte de changement climatique. Qui plus est, le choix des traceurs ainsi que la définition du protocole d'échantillonnage et de conservation a comporté plusieurs avantages :

- Coût analytique faible
- Pas de préoccupation de contamination
- Simple à échantillonner par les employés municipaux
- Pas de problème de conservation

Une validation à plus long terme des interprétations est cependant indispensable, afin d'élargir la base de données et surtout, de compléter les séries temporelles interrompues par le contexte sanitaire de 2020. Elle devrait prendre en compte la taille des populations d'échantillons (fréquence et nombre d'analyses par site), afin d'assurer une homogénéité dans l'interprétation. Il faudrait également veiller à ce que les analyses soient réalisées dans un laboratoire de référence internationale, comme celui du Geotop où ont été effectuées les analyses de ce projet, afin que les incertitudes de mesure isotopiques soient les plus basses possible. Des tests statistiques sur de plus grandes chroniques, obtenues dans le cadre d'un suivi à long terme, permettraient ainsi de recommander par sous-échantillonnage des stratégies optimales pour

anticiper les effets des changements climatiques sur la vulnérabilité des prélèvements d'eau potable en filtration sur berge.

Également, les données acquises dans le cadre de ce projet pourraient servir de base à une caractérisation hydrogéochimique spécifique à chacun des puits étudiés. Combinés à des paramètres opérationnels (p. ex. les schémas de pompage), des paramètres hydrodynamiques, ou des prélèvements d'échantillons d'eau souterraine en amont du puits de pompage, de tels travaux pourraient aider sensiblement les municipalités à **optimiser la qualité de l'eau pompée** et à être **plus résilient dans un contexte de changement climatique**, à l'instar de travaux récents au Québec ((Masse-Dufresne, et al., 2021; Masse-Dufresne et al., 2021).

6 Références

- Arnoux, M., Barbecot, F., Gibert-Brunet, E., Gibson, J., Rosa, E., Noret, A., & Monvoisin, G. (2017). Geochemical and isotopic mass balances of kettle lakes in southern Quebec (Canada) as tools to document variations in groundwater quantity and quality. *Environmental Earth Sciences*, 76(3), 106. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6410-6>
- Arnoux, M., Gibert-Brunet, E., Barbecot, F., Guillon, S., Gibson, J., & Noret, A. (2017). Interactions between groundwater and seasonally ice-covered lakes : Using water stable isotopes and radon-222 multilayer mass balance models. *Hydrological Processes*, 31(14), 2566-2581. <https://doi.org/10.1002/hyp.11206>
- Barbecot, F., Larocque, M. and Horoi, V. (2019). *Infrastructure de recherche sur la recharge des eaux souterraines (IRRES)*. Montréal, Québec. <https://www.geotop.ca/fr/laboratoires/IRRES>
- Barnett, T. P., Adam, J. C., & Lettenmaier, D. P. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438(7066), 303-309. <https://doi.org/10.1038/nature04141>
- CCME. (2004). *De la source au robinet : Guide d'application de l'approche à barrières multiples pour une eau potable saine*.
- Clark, I. (2015). *Groundwater Geochemistry and Isotopes*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18347>
- Eckert, P., & Irmscher, R. (2006). Over 130 years of experience with Riverbank Filtration in Düsseldorf, Germany. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 55(4), 283-291. <https://doi.org/10.2166/aqua.2006.0012>
- Gagné, S., Larocque, M., Meyzonnat, G., Barbecot, F., & Pinti, D. (2013). *Projet de connaissances des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François*.
- Gibson, J. J., Birks, S. J., Jeffries, D., & Yi, Y. (2017). Regional trends in evaporation loss and water yield based on stable isotope mass balance of lakes : The Ontario Precambrian Shield surveys. *Journal of Hydrology*, 544, 500-510. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.11.016>
- Hughes, C., & Crawford, J. (2012). A new precipitation weighted method for determining the meteoric water line for hydrological applications demonstrated using Australian and global GNIP data. *Journal of Hydrology*, 464. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.07.029>
- Kármán, K., Maloszewski, P., Deák, J., Fórizs, I., & Szabó, C. (2014). Transit time determination for a riverbank filtration system using oxygen isotope data and the lumped-parameter model. *Hydrological Sciences Journal*, 59(6), 1109-1116. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.808345>
- Leveque, B., Burnet, J.-B., Dorner, S., & Bichai, F. (2021). Impact of climate change on the vulnerability of drinking water intakes in a northern region. *Sustainable Cities and Society*, 66, 102656. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102656>
- Masse-Dufresne, J. (2021). Quantifying floodwater impacts on a lake water budget via volume-dependent transient stable isotope mass balance [Review of *Quantifying floodwater impacts on a lake water budget via volume-dependent transient stable isotope mass*

- balance*, par F. Barbecot, P. Baudron, & J. Gibson]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(6), 3731-3757. <https://doi.org/10.5194/hess-25-3731-2021>
- Masse-Dufresne, J., Baudron, P., Barbecot, F., Pasquier, P., & Barbeau, B. (2021). Optimizing short time-step monitoring and management strategies using environmental tracers at flood-affected bank filtration sites. *Science of The Total Environment*, 750, 141429. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141429>
- Masse-Dufresne, J., Baudron, P., Barbecot, F., Patenaude, M., Pontoreau, C., Proteau-Bédard, F., Menou, M., Pasquier, P., Veuille, S., & Barbeau, B. (2019). Anthropogenic and Meteorological Controls on the Origin and Quality of Water at a Bank Filtration Site in Canada. *Water*, 11, 2510. <https://doi.org/10.3390/w11122510>
- Massmann, G., Sültenfuß, J., Dünnbier, U., Knappe, A., Taute, T., & Pekdeger, A. (2008). Investigation of groundwater residence times during bank filtration in Berlin : A multi-tracer approach. *Hydrological Processes*, 22(6), 788-801. <https://doi.org/10.1002/hyp.6649>
- MELCC. (2018). *Guide de réalisation des analyses de la vulnérabilité des sources destinées à l'alimentation en eau potable au Québec*. 189.
- MELCC. (2019). *Détermination des aires de protection des prélèvements d'eau souterraine et des indices de vulnérabilité DRASTIC – Guide technique* (p. 86). <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/drastic/>
- Ministry for the Environment. (2019, juillet 1). *Technical guidelines for drinking water source protection zones*. Ministry for the Environment. <https://environment.govt.nz/publications/technical-guidelines-for-drinking-water-source-protection-zones/>
- Moeck, C., Radny, D., Auckenthaler, A., Berg, M., Hollender, J., & Schirmer, M. (2017). Estimating the spatial distribution of artificial groundwater recharge using multiple tracers. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 53(5), 484-499. <https://doi.org/10.1080/10256016.2017.1334651>
- Nixdorf, E., & Trauth, N. (2018). Evaluating the reliability of time series analysis to estimate variable riparian travel times by numerical groundwater modelling. *Hydrological Processes*, 32(3), 408-420. <https://doi.org/10.1002/hyp.11428>
- Patenaude, M., Baudron, P., Labelle, L., & Masse-Dufresne, J. (2020). Evaluating Bank-Filtration Occurrence in the Province of Quebec (Canada) with a GIS Approach. *Water*, 12(3), 662. <https://doi.org/10.3390/w12030662>
- Ray, C., Grischek, T., SCHUBERT, J., WANG, J., & SPETH, T. (2002). A perspective of riverbank filtration. *Journal American Water Works Association - J AMER WATER WORK ASSN*, 94, 149-160. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2002.tb09459.x>
- Rouhani, H., & Leconte, R. (2018). A methodological framework to assess PMP and PMF in snow-dominated watersheds under changing climate conditions – A case study of three watersheds in Québec (Canada). *Journal of Hydrology*, 561, 796-809. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.047>
- Sheets, R. A., Darner, R. A., & Whitteberry, B. L. (2002). Lag times of bank filtration at a well field, Cincinnati, Ohio, USA. *Journal of Hydrology*, 266(3), 162-174. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00164-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00164-6)

- Sprenger, C. (2016). *Hydraulic characterisation of managed aquifer recharge sites by tracer techniques*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4332.9042>
- Sprenger, C., Hartog, N., Hernández, M., Vilanova, E., Grützmacher, G., Scheibler, F., & Hannappel, S. (2017). Inventory of managed aquifer recharge sites in Europe : Historical development, current situation and perspectives. *Hydrogeology Journal*, 25(6), 1909-1922. <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1554-8>
- Sprenger, C., Lorenzen, G., Hülshoff, I., Grützmacher, G., Ronghang, M., & Pekdeger, A. (2011). Vulnerability of bank filtration systems to climate change. *Science of The Total Environment*, 409(4), 655-663. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.11.002>
- Stefan, C., & Ansems, N. (2018). Web-based global inventory of managed aquifer recharge applications. *Sustainable Water Resources Management*, 4(2), 153-162. <https://doi.org/10.1007/s40899-017-0212-6>
- Vogt, T., Hoehn, E., Schneider, P., Freund, A., Schirmer, M., & Cirpka, O. A. (2010). Fluctuations of electrical conductivity as a natural tracer for bank filtration in a losing stream. *Advances in Water Resources*, 33(11), 1296-1308. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.02.007>

7 Annexe I: Échantillons prélevés

Tableau 7-1 Périodes d'échantillonnage, pas de temps et nombre d'échantillons des sites étudiés

Bassin versant	Code projet	Début et fin d'échantillonnage	Durée de l'échantillonnage (mois)	Nombre d'échantillons
Rivière des Mille îles	MIL_P01	11/19 — 05/21	18	62
Rivière des Mille îles	MIL_P02	11/19 — 05/21	18	62
Rivière du Nord	RDN_P01	11/19 — 05/21	18	67
Rivière du Nord	RDN_P02	11/19 — 05/21	18	63
Rivière du Nord	RDN_P03	12/19 — 05/21	17	64
Rivière du Nord	RDN_P04	12/19 — 05/21	17	63
Rivière du Nord	RDN_P05	11/19 — 02/21	17	25
Rivière du Nord	RDN_P06	10/19 — 04/21	17	46
Rivière du Nord	RDN_P07	10/19 — 04/21	17	46
Rivière du Nord	RDN_P08	10/19 — 04/21	17	46
Rivière du Nord	RDN_P09	11/19 — 12/20	12	10
Rivière du Nord	RDN_P10	11/19 — 12/20	12	10
Rivière du Nord	RDN_P11	11/19 — 05/21	18	42
Rivière du Nord	RDN_P12	11/19 — 05/21	18	43
Rivière du Nord	RDN_P13	11/19 — 05/21	18	42
Rivière du Nord	RDN_P14	12/19 — 05/21	17	49
Rivière du Nord	RDN_P15	12/19 — 05/21	17	29
Rivière du Nord	RDN_P16	12/19 — 05/21	17	29
Rivière du Nord	RDN_P17	12/19 — 05/21	17	29
Rivière du Nord	RDN_P18	12/19 — 05/21	17	29
Rivière du Nord	RDN_P19	12/19 — 02/21	15	27
Rivière du Nord	RDN_P20	12/19 — 02/21	15	27
Rivière Rouge	ROU_P01	12/19 — 07/20	8	9
Rivière Rouge	ROU_P02	12/19 — 04/21	16	22
Rivière Rouge	ROU_P03	11/19 — 03/21	16	24
Rivière Rouge	ROU_P04	11/19 — 03/21	16	27
Rivière Rouge	ROU_P05	11/19 — 03/21	16	17
Rivière Rouge	ROU_P06	11/19 — 03/21	16	18
Rivière Nicolet	NIC_P01	12/19 — 03/21	16	54
Rivière Nicolet	NIC_P02	11/19 — 07/22	8	16
Rivière Nicolet	NIC_P03	11/19 — 07/22	8	16
Rivière Nicolet	NIC_P04	11/19 — 07/22	8	16
Rivière Nicolet	NIC_P05	11/19 — 04/21	17	61
Rivière Nicolet	NIC_P06	11/19 — 04/21	17	61

Rivière Nicolet	NIC_P07	12/19 – 05/21	18	76
Rivière Nicolet	NIC_P08	11/19 – 11/20	12	12
Rivière Nicolet	NIC_P09	11/19 – 11/20	12	12
Rivière Nicolet	NIC_P10	11/19 – 06/21	19	47
Rivière Nicolet	NIC_P11	11/19 – 06/21	19	52
Rivière Nicolet	NIC_P12	12/19 – 06/21	19	61
Total	40	-	-	1511

Tableau 7-2: Eaux de surface échantillonnées

Bassin versant	Rivière échantillonnée	Début et fin d'échantillonnage	Durée échantillonnage (mois)	Nombre d'échantillons
Rivière des Mille îles	La Belle Rivière	11/19 – 05/21	18	63
	Rivière Mascouche	11/19 – 05/21	18	67
Rivière du Nord	Rivière du Nord	11/19 – 05/21	18	62
Rivière Nicolet	Rivière Nicolet	02/20 – 06/21	14	37
	Rivière Nicolet	03/20 – 04/21	13	66
Total	5	-	-	295

8 Annexe II: Protocole d'échantillonnage

PROJET FILTRATION SUR BERGES Protocole d'échantillonnage



Protocole d'échantillonnage **un seul puits (eau brute)**

- Purger l'eau du tuyau pendant 2 minutes
- Remplir **trois flacons par puits** directement à la sortie du tuyau
 - ↪ Ne pas rincer les flacons
 - ↪ Veiller à ce qu'il n'y ait plus **aucune bulle d'air à l'intérieur**
 - ↪ Noter sur le flacon : la date + le numéro du puits
 - ↪ **À conserver à l'abris d'une lumière directe**
 - ↪ **Ne pas conserver au réfrigérateur**

Protocole d'échantillonnage **plusieurs puits (eau brute)**

- Si les puits à échantillonner passent par un seul tuyau, ouvrir les pompes d'un puits à la fois et laisser couler 2 minutes pour éviter les contaminations
- Remplir **trois flacons par puits** directement à la sortie du tuyau
 - ↪ Ne pas rincer les flacons
 - ↪ Veiller à ce qu'il n'y ait plus **aucune bulle d'air à l'intérieur**
 - ↪ Noter sur le flacon : la date + le numéro du puits
 - ↪ **À conserver à l'abris d'une lumière directe**
 - ↪ **Ne pas conserver au réfrigérateur**

****Astuce : Remplir le bouchon et le flacon d'eau séparément, et refermer rapidement pour éviter d'avoir des bulles d'air****

9 Annexe III: Caractéristiques des installations de prélèvement – Modèle conceptuel 3

Puits	MIL_P02	NIC_P01	NIC_P05	NIC_P06	NIC_P07	NIC_P08
Distance à l'eau de surface (m)	55	213	170	170	250	54
Profondeur du sommet de la crépine (m)	30	45	9	11	34	20
Type de captage	Tubulaire	Tubulaire	Tubulaire	Tubulaire	Tubulaire	Puits à drain rayonnant
Type d'aquifère au droit du puits	Roc	Roc captif	Granulaire libre	Granulaire libre	Granulaire captif	Granulaire libre
Type de dépôt de surface	Sédiment glaciomarin fin d'eau profonde	Sédiment glaciomarin littoral et pré littoral	Sédiment glaciomarin littoral et pré littoral	Sédiment glaciomarin littoral et pré littoral	Sédiment glaciomarin fin d'eau profonde	Sédiment glaciomarin fin d'eau profonde
Indice DRASTIC	80	89	186	186	100	203
Débit moyen pompé (m³/h)	95		11,31	12	60	123
Écart-type CE	79,56	10,13	5,21	9,86	42,00	54,03
Moyenne CE	1347,48	776,59	194,38	175,63	438,00	657,43
Écart-type δ²H	0,68	0,48	0,64	0,68	0,45	1,03
Moyenne δ²H	-72,79	-76,25	-84,57	-83,29	-78,55	-77,26
Écart-type δ¹⁸O	0,22	0,15	0,28	0,24	0,20	0,24
Moyenne δ¹⁸O	-10,70	-11,05	-12,34	-12,02	-11,33	-10,88

Puits	RDN_P01	RDN_P02	RDN_P05	RDN_P06	RDN_P07	RDN_P08	RDN_P11
Distance à l'eau de surface (m)	32	389	24	50	54	41	31
Profondeur du sommet de la crépine (m)	12	33	30	25	26	30	36
Type de captage	Tubulaire	Tubulaire	Tubulaire	Tubulaire	Tubulaire	Tubulaire	Tubulaire
Type d'aquifère au droit du puits	Roc captif	Roc captif	Granulaire libre	Granulaire libre	Granulaire libre	Granulaire libre	Granulaire captif
Type de dépôt de surface	Alluvion de terrasse fluviale	Alluvion de terrasse fluviale ancienne	Alluvion de terrasse fluviale				
Indice DRASTIC	62	NA	120	110	110	110	160
Débit moyen pompé (m³/h)	40	213	56	13	13	13	74
Écart-type CE	119,54	26,75	38,57	53,14	13,44	35,12	47,63
Moyenne CE	1036,10	1090,40	463,63	474,29	532,13	615,17	848,47
Écart-type δ^2H	0,69	0,50	0,73	0,89	0,73	0,64	0,53
Moyenne δ^2H	-73,01	-77,19	-74,05	-74,11	-74,18	-74,37	-76,06
Écart-type $\delta^{18}O$	0,20	0,22	0,17	0,33	0,21	0,20	0,14
Moyenne $\delta^{18}O$	-10,79	-11,29	-10,76	-10,76	-10,83	-10,87	-11,04

<i>Puits</i>	RDN_P12	RDN_P13	RDN_P16	RDN_P19	RDN_P20	ROU_P02
<i>Distance à l'eau de surface (m)</i>	73	31	57	83	74	135
<i>Profondeur du sommet de la crépine (m)</i>	30	30	24	30	20	30
<i>Type de captage</i>	Tubulaire	Tubulaire	Tubulaire	Tubulaire	Tubulaire	Tubulaire
<i>Type d'aquifère au droit du puits</i>	Granulaire captif	Granulaire libre	Granulaire libre	Roc libre	Roc libre	Granulaire captif
<i>Type de dépôt de surface</i>	Alluvion de terrasse fluviale	Alluvion de terrasse fluviale	Sédiment juxtaglaciaire	Sédiment d'épandage proglaciaire subaérien	Sédiment d'épandage proglaciaire subaérien	Alluvion de terrasse fluviale ancienne
<i>Indice DRASTIC</i>	160	160	182	150	150	81
<i>Débit moyen pompé (m³/h)</i>	74	74	36	29	10	25
<i>Écart-type CE</i>	29,74	87,22	1,94	57,02	28,31	22,97
<i>Moyenne CE</i>	548,39	1119,54	163,20	435,00	509,55	405,77
<i>Écart-type δ^2H</i>	0,61	0,84	0,54	0,60	0,59	0,73
<i>Moyenne δ^2H</i>	-76,35	-76,36	-76,45	-76,45	-76,31	-76,18
<i>Écart-type $\delta^{18}O$</i>	0,18	0,20	0,16	0,21	0,28	0,33
<i>Moyenne $\delta^{18}O$</i>	-11,20	-11,15	-11,27	-11,44	-11,43	-11,15

Puits	ROU_P05	ROU_P06
<i>Distance à l'eau de surface (m)</i>	88	88
<i>Profondeur du sommet de la crépine (m)</i>	42	42
<i>Type de captage</i>	Tubulaire	Tubulaire
<i>Type d'aquifère au droit du puits</i>	Granulaire captif	Granulaire captif
<i>Type de dépôt de surface</i>	Sédiment glaciomarin deltaïque et prodeltaïque	Sédiment glaciomarin deltaïque et prodeltaïque
<i>Indice DRASTIC</i>	120	120
<i>Débit moyen pompé (m³/h)</i>	28	28
<i>Écart-type CE</i>	21,90	16,14
<i>Moyenne CE</i>	616,54	419,87
<i>Écart-type δ^2H</i>	0,56	0,51
<i>Moyenne δ^2H</i>	-79,29	-80,11
<i>Écart-type $\delta^{18}O$</i>	0,19	0,15
<i>Moyenne $\delta^{18}O$</i>	-11,40	-11,49

10 Annexe IV: Caractéristiques des installations de prélèvement – Sites non retenus

Puits	NIC_P02	NIC_P03	NIC_P04	RDN_P09	RDN_P10	RDN_P17	RDN_P18	ROU_P01
Distance à l'eau de surface (m)	573	573	573	85	97	19	19	135
Profondeur du sommet de la crépine (m)	12	29	16	31	46	17	33	35
Type de captage	Tubulaire	Tubulaire	Tubulaire	Tubulaire	Tubulaire	Tubulaire	Tubulaire	Tubulaire
Type d'aquifère au droit du puits	Granulaire libre	Granulaire libre	Granulaire libre	Granulaire captif	Granulaire captif	Granulaire libre	Granulaire libre	Roc captif
Type de dépôt de surface	Sédiment glaciomarin littoral et pré-littoral	Sédiment glaciomarin littoral et pré-littoral	Sédiment glaciomarin littoral et pré-littoral	Sédiment juxtaglaciaire	Sédiment glaciomarin fin d'eau profonde	Alluvion de terrasse fluviale	Alluvion de terrasse fluviale	Alluvion de terrasse fluviale ancienne
Indice DRASTIC	173	173	173	104	94	195	195	81
Débit moyen pompé (m³/h)	NA	NA	NA	86	3	63	16	39
Écart-type CE	19,21	39,63	17,49	12,68	15,01	12,53	8,44	14,18
Moyenne CE	468,57	590,00	541,10	501,10	551,59	319,06	298,93	414,80
Écart-type δ^2H	0,93	0,65	0,60	0,87	0,57	0,71	0,63	0,62
Moyenne δ^2H	-80,91	-80,98	-80,76	-73,91	-75,27	-76,03	-77,06	-76,12
Écart-type $\delta^{18}O$	0,28	0,27	0,23	0,16	0,21	0,10	0,13	0,22
Moyenne $\delta^{18}O$	-11,59	-11,59	-11,49	-10,53	-10,91	-11,10	-11,35	-11,14

Puits	ROU_P03	ROU_P04
Distance à l'eau de surface (m)	220	220
Profondeur du sommet de la crépine (m)	27	23
Type de captage	Tubulaire	Tubulaire
Type d'aquifère au droit du puits	Granulaire libre	Granulaire libre
Type de dépôt de surface	Sédiment glaciolacustre littoral et pré littoral	Sédiment glaciolacustre littoral et pré littoral
Indice DRASTIC	107	107
Débit moyen pompé (m3/h)	100	100
Écart-type CE	10,23	16,02
Moyenne CE	161,05	251,97
Écart-type δ^2H	0,61	0,64
Moyenne δ^2H	-79,79	-81,01
Écart-type $\delta^{18}O$	0,26	0,19
Moyenne $\delta^{18}O$	-11,76	-11,84