



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Caractérisation des gradients et des flux entre la nappe de la craie et les tourbières alcalines de Vred et Marchiennes

Rapport final

BRGM/RP- 75015-FR

Version 2 du 8 juin 2026

Étude réalisée dans le cadre des projets de recherche et développement

M. Parmentier, T. Diaraw, A. Bonnière, F. Joublin

AGENCE DE L'EAU
ARTOIS PICARDIE


Parc
naturel
régional
Scarpe - Escout
Une autre vie s'invente ici

Ce rapport a été vérifié le 31/03/2026 et approuvé le 08/06/2026 selon la procédure interne en vigueur au sein du BRGM, qui garantit le respect de ses engagements contractuels, de l'intégrité et de l'impartialité du contenu scientifique et technique du présent rapport, de l'éthique et de la déontologie du BRGM, ainsi que des dispositions réglementaires et législatives auquel il est soumis pour l'exercice de son activité.

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr

Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu contractuellement.

Le demandeur assure lui-même la diffusion qu'il souhaite des exemplaires de ce tirage initial, dont il est seul propriétaire.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur, ainsi que par les termes de la convention.

Les justificatifs du contrôle qualité de ce rapport (auteur, vérificateur, approbateur) peuvent être communiqués à titre confidentiel au destinataire du rapport, à sa demande et dans le strict respect de la réglementation applicable au traitement des données à caractères personnels.

Le BRGM ne saurait être tenu responsable de la divulgation du contenu total ou partiel de ce rapport à un tiers non-autorisé qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq> ou par ce code :



Mots clés : Vred, Marchiennes, nappe de la craie, nappe alluviale, tourbière

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

M. Parmentier, T. Diaraw, A. Bonnière, F. Joublin 2026. Caractérisation des gradients et des flux entre la nappe de la craie et les tourbières alcalines de Vred et Marchiennes. Rapport final V2. BRGM/RP- 75015-FR, 94 p.

© BRGM, 2026, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
M-P2-12 – 13/03/2025

Synthèse

Le Parc Naturel Régional Scarpe Escaut et l'Agence de l'Eau Artois Picardie s'associent avec le BRGM Hauts-de-France pour améliorer la connaissance des gradients et des flux d'eau existant entre la nappe de la craie et les tourbières alcalines de Vred et Marchiennes.

L'étude éco-hydrologique de la tourbière alcaline de Vred (Goubet 2015), visant à mieux comprendre le système hydrologique de la tourbière, a émis l'hypothèse que celle-ci est alimentée par les eaux souterraines de la nappe de la craie par l'intermédiaire d'un drainage ascendant. Cette hypothèse s'appuie sur la supposée variation de l'épaisseur de l'argile due aux différents épisodes d'érosion lors de la formation de la plaine de la Scarpe (Deschodt et al. 2012). Cette étude de 2015 concernait la tourbière de Vred, mais un fonctionnement équivalent est suspecté sur les autres tourbières alcalines de la plaine de la Scarpe, dont la tourbière de Marchiennes.

L'objectif de cette étude est de mieux caractériser les gradients hydrauliques et les flux d'eau entre les tourbières de Vred et de Marchiennes et les différents compartiments susceptibles de les alimenter. Cela doit permettre de confirmer, d'infirmer ou de préciser les hypothèses posées en 2015 par Goubet d'une alimentation de la tourbière de Vred par la nappe de la craie.

En 2021, le parc a fait réaliser un doublet de piézomètres sable/ craie au droit de chacune des deux tourbières. Ce doublet consiste en 2 piézomètres de différentes profondeurs, distants de quelques mètres et captant respectivement la nappe de la craie séno-turonienne et la nappe des sables thanétiens.

Les suivis piézométriques des doublets sable/ craie sur 4 ans (2022-2025) ont montré que le niveau dans la craie reste inférieur de 4 à 12 mètres à celui dans les sables. Si une connexion hydraulique existait entre ces deux nappes, ce gradient hydraulique induirait donc un écoulement par un déversement de la nappe des sables vers la nappe de la craie. Par ailleurs, l'analyse des déblais des forages conservés dans les locaux du Parc, a permis d'établir les coupes géologiques interprétées au droit des tourbières. Celles-ci montrent la présence d'argile de Louvil sur une épaisseur de 8 à 12 mètres séparant la nappe des Sables et la nappe de la craie. L'épaisseur des argiles de Louvil est suffisamment importante pour qu'il n'existe, malgré la différence de niveau piézométrique, aucun écoulement ascendant significatif de la nappe de la craie autour des tourbières de Vred et de Marchiennes.

Néanmoins, les analyses géochimiques des eaux de la nappe des sables au-delà de 10 mètres de profondeur, observées sur les forages Vred et Marchiennes (BSS004CFVQ, BSS004CFVX), montrent :

- Une nature bicarbonatée calcique,
- Des temps de résidence supérieurs à 50 ans,
- Une signature isotopique en strontium typique de la craie séno-turonienne (autour de 70,78 pour mille).

L'hypothèse pouvant expliquer ces caractéristiques est que ces eaux (1) ont subi une interaction longue avec la craie et (2) sont ensuite passées de la nappe de la craie à la nappe des sables sans interagir avec les argiles de Louvil (car sinon la signature isotopique du strontium n'aurait pas été conservée). Les mécanismes précis ayant pu aboutir à une telle histoire de ces eaux n'ont pas pu être élucidés et devraient être recherchés à une échelle plus large, comme celle du

bassin d'Orchies. Il est néanmoins intéressant de remarquer que l'âge de ces eaux indiquerait une mise en place de ces mécanismes avant les années 1950, c'est-à-dire à une époque où le niveau de la nappe de la craie était une quinzaine de mètres au-dessus du niveau actuel.

Qui de plus est, les eaux de la nappe des sables semblent stratifiées, avec, en profondeur, des eaux aux caractéristiques proches des eaux de la craie. Ces eaux « profondes » de la nappe des Sables pourraient constituer le réservoir alimentant les tourbières de Vred dans le modèle de Goubet (2015). Il est probable que ces eaux « profondes » de la nappe des Sables aient des vitesses d'écoulement très faibles étant donné les gradients hydrauliques très faibles et l'essentiel de l'écoulement de cette nappe se produisant via les eaux de surface connectées via des écoulements hypodermiques.

Sommaire

1. Introduction	8
2. Contexte.....	9
2.1. Zone d'étude	9
2.2. Contexte climatique.....	10
2.3. Contexte géologique	11
2.4. Contexte hydrogéologique.....	15
2.5. Contexte hydrologique	17
2.6. Exploitation de la ressource	18
2.7. Géochimie de la craie.....	19
3. Matériels et méthodes	21
3.1. Les nouveaux forages	21
3.2. Les suivis continus	24
3.3. Les points de prélèvement	27
3.4. Les campagnes de prélèvements.....	29
3.5. Méthodologie.....	30
3.5.1. <i>Isotopes stables de la molécule d'eau</i>	31
3.5.2. <i>Isotopes du strontium</i>	32
3.5.3. <i>Isotopes du bore (¹¹B, ¹⁰B)</i>	33
3.5.4. <i>Estimation des temps de résidence des eaux souterraines par les teneurs en CFCs et SF6</i>	33
3.6. Méthodes analytiques	35
4. Résultats	37
4.1. Les suivis continus	37
4.2. Les isotopes.....	39
5. Discussion.....	41
5.1. Les niveaux piézométriques	41
5.2. La géochimie.....	44
5.3. L'estimation des temps de résidence	47
5.4. Les isotopes stables de la molécule d'eau	49
5.5. Les isotopes du strontium.....	52
5.6. Les isotopes du bore.....	56
6. Conclusions et perspectives	58
6.1. Perspectives	59
7. Références bibliographiques	61

Liste des figures

Figure 1 : Le secteur d'étude autour des deux tourbières de Vred et de Marchiennes et les principales voies d'eau.....	9
Figure 2 : Pluviométrie mensuelle moyenne à la station de Douai sur la période 2013-2021....	10
Figure 3 : Moyenne sur la période 2013-2020 des cumuls mensuels de l'évapotranspiration potentielle mesurée sur 4 stations Météo-France.	11

Figure 4 : Carte géologique 1 :50 000ème harmonisée (Desoignies et al., 1973) montrant les terrains affleurants autour de la zone d'étude (cadre de la Figure 1) et des tourbières de Marchiennes et de Vred.	12
Figure 5: Coupe géologique de référence (forage 00281X0107/S66405 situé à Vred).	14
Figure 6 : Coupe géologique de Vred à Saint-Amand longeant le canal de la Scarpe. (Rossignol et al., 1963; Clevenot et al., 1991).	14
Figure 7: Cartes piézométriques à la craie durant les Basses-eaux (gauche) et Hautes-eaux (droite) de 2009.	15
Figure 8 : Chronique piézométrique historique du piézomètre de Rieulay (BSS000CSUH).	17
Figure 9 : Chroniques piézométriques historiques au piézomètre d'Abscon (BSS000CSUK)...	17
Figure 10 : Carte des prélèvements en eau souterraine pour l'année 2023 avec les volumes, les usages et l'origine de l'eau (source : base de redevance de l'Agence de l'eau Artois Picardie). Fond cartographique : carte géologique harmonisée (cf Figure 4 pour la légende complète de la carte géologique) et carte piézométrique à la craie des hautes eaux de 2001.	19
Figure 11 : Photographies prises le 31/05/2021 lors de la foration du piézomètre dans la craie en bordure de la tourbière de Vred (BSS004CFVG). Plan général à gauche, argiles de Louvil sur la tarière à droite.	21
Figure 12 : Coupe géologique interprétée au droit de la tourbière de Marchiennes issue du forage à la craie BSS004CFVR (le forage au sable BSS004CFVX montre la même géologie). Le trait bleu indique le niveau piézométrique de la nappe de la Craie.	22
Figure 13 : Coupe géologique au droit de la tourbière de Vred issue du forage à la craie BSS004CFVG (le forage au sable BSS004CFVQ montre la même géologie). Le trait bleu indique le niveau piézométrique de la nappe de la Craie.	23
Figure 14 : Coupes géologiques et coupes techniques des doublets de forages de Vred et Marchiennes.	24
Figure 15 : Carte des points de prélèvements de l'étude.	27
Figure 16 : Évolution des ions majeurs suivis dans le forage P100 (00215X0187) par l'Agence de l'Eau Artois Picardie (Données sources : www.ades.eaufrance.fr).	29
Figure 17 : Temporalité des différentes campagnes de prélèvements en fonction des niveaux de la nappe de la craie (en haut) et de la nappe des Sables (en bas).	30
Figure 18 : Courbes des concentrations atmosphériques des gaz synthétiques CFC et SF ₆ depuis leur première émission par l'homme.	34
Figure 19 : Principe de l'estimation du temps de résidence à partir des teneurs en gaz atmosphériques (CFCs et SF ₆)	34
Figure 20 : Schéma d'un modèle de recharge correspondant à celui retenu pour la craie de la Somme : Recharge à travers une zone non saturée épaisse puis transfert par des cheminements plus ou moins longs jusqu'à l'ouvrage prélevé. Le « déclenchement du chronomètre » correspond au moment où l'eau d'infiltration est isolée de l'atmosphère.	35
Figure 21 : Localisation des points de suivis piézométriques sur une carte piézométrique à la craie (hautes-eaux 2001) et des pompages annuels (2023, cf. Figure 10 pour la légende complète sur les pompages). Les prélèvements et la dépression piézométrique visibles au Nord-Ouest correspondent au champ captant de Pecquencourt et à son cône de rabattement.	37
Figure 22 : Suivis continus de cette étude et suivis piézométriques de Rieulay (BSS000CSUH) et d'Abscon (BSS000CSUK). Conductivité en µS/cm, niveau en m NGF et température en °C. ...	38

Figure 23 : Suivi des niveaux d'eau dans la tourbière de Marchiennes et comparaison avec le suivi piézométrique de la nappe des sables au droit de la tourbière. Le niveau normal de navigation du canal de la Scarpe à proximité de la tourbière est indiqué pour mémoire.	42
Figure 24 : Suivi des niveaux d'eau dans la tourbière de Vred et comparaison avec le suivi piézométrique de la nappe des sables au droit de la tourbière. Le niveau normal de navigation du canal de la Scarpe à proximité de la tourbière est indiqué pour mémoire.	42
Figure 25 : Gradients hydrauliques verticaux entre la nappe des sables et la nappe de la craie au droit des doublets de piézomètres de Vred et de Marchiennes.....	43
Figure 26 : Diagramme de Piper de l'ensemble des prélèvements d'eau.	44
Figure 27 : Concentrations en sulfates mesurées durant les 3 campagnes. Les noms des points d'échantillonnage commencent par un M pour Marchiennes et un V pour Vred. La droite noire indique la limite de quantification (LQ) ; les croix indiquent des prélèvements non effectués....	45
Figure 28 : Diagramme binaire des ratios des concentrations molaires des cations majeurs : calcium sur magnésium en fonction de sodium sur potassium. Notez l'échelle logarithmique de l'axe des abscisses.	46
Figure 29 : Résultats de datation des eaux dans les doublets sable/ craie au droit de Marchiennes et de Vred prélevés en hautes eaux 2022. Les trois modèles correspondent à différents modes de recharge et de contextes hydrogéologiques.	48
Figure 30 : Résultats des isotopes stables de la molécule d'eau par rapport à la droite météoritique mondiale (DMM) et une droite météoritique locale (DML de Fontainebleau, cf. texte). Esu : eaux de surface.....	50
Figure 31 : (Millot et al., 2010) Iso valeurs de la composition isotopique moyenne annuelle de l'oxygène ($\delta^{18}\text{O}$) de l'eau de pluie en France. Cette carte s'appuie sur des données relatives à l'eau de pluie, aux eaux souterraines, aux lacs (corrigées pour tenir compte de l'évaporation) et aux coquilles d'escargots terrestres. L'emplacement des stations de prélèvement d'eau de pluie pour le $\delta^{18}\text{O}$ par rapport au δD est également indiqué sur cette carte (bleu : surveillance à court terme ; rouge : surveillance à long terme).....	51
Figure 32 : Rapport isotopiques du strontium en fonction du rapport Ca/Sr (mol/mol) des eaux échantillonnées. Les gammes de valeurs de référence pour les eaux de pluies et des argiles yprésiennes sont issues de Drouet et al. (2005), et les valeurs pour les sables d'Ostricourt et la craie séno-turonienne locale sont issus de Cary et al. (2014).....	53
Figure 33 : Diagramme binaire des concentrations en strontium et en sulfates.	54
Figure 34 : Diagramme binaire des concentrations en strontium et en magnésium.	55
Figure 35 : Composition isotopique en bore en fonction de la concentration en bore dans les eaux échantillonnées (à gauche). Représentation en 1/B (à droite) montrant la droite de mélange théorique entre un pôle eaux de pluie et un pôle « Terril ».	57

Liste des annexes

Annexe 1	Cartographies des concentrations en traces	65
----------	--	----

1. Introduction

Le Parc Naturel Régional Scarpe Escaut et l'Agence de l'Eau Artois Picardie se sont associés avec le BRGM pour améliorer la connaissance des gradients et des flux d'eau existants entre la nappe de la craie et les tourbières alcalines de Vred et Marchiennes.

L'étude éco-hydrologique de la tourbière alcaline de Vred (Goubet, 2015), visant à mieux comprendre le système hydrologique de la tourbière, a émis l'hypothèse que celle-ci est alimentée par les eaux souterraines de la nappe de la craie par l'intermédiaire d'un drainage ascendant. Cette hypothèse s'appuie sur la supposée variation de l'épaisseur de l'argile due aux différents épisodes d'érosion lors de la formation de la plaine de la Scarpe (Deschodt *et al.*, 2012). Cette étude de 2015 concernait la tourbière de Vred, mais un fonctionnement équivalent est suspecté sur les autres tourbières alcalines de la plaine de la Scarpe, dont la tourbière de Marchiennes.

L'objectif de la présente étude est de mieux caractériser les gradients hydrauliques et les flux d'eau entre les tourbières de Vred et de Marchiennes et les différents compartiments susceptibles de les alimenter. Cela avait pour but de confirmer, d'infirmer ou de préciser les hypothèses posées par Goubet 2015 d'une alimentation de la tourbière de Vred par la nappe de la craie.

En 2021, le Parc a fait réaliser un doublet de piézomètres Sable/ craie au droit de chacune des deux tourbières. Ce doublet consiste en 2 piézomètres de différentes profondeurs, distants de quelques mètres et captant respectivement la nappe de la craie séno-turonienne et la nappe des sables thanétiens.

Cette étude comprenait (1) des suivis piézométriques des doublets sable/ craie, (2) une analyse des déblais des forages conservés dans les locaux du Parc afin d'établir les coupes géologiques interprétées au droit des tourbières et (3) des analyses géochimiques des eaux des différents compartiments (eaux de la nappe de la craie, de la nappe des sables, des alluvions quaternaires, de la tourbe, des eaux superficielles de la tourbière, du canal et d'autres eaux superficielles). Des outils isotopiques sont mobilisés afin de mieux comprendre l'origine et l'histoire des différents compartiments de l'hydrosystème.

2. Contexte

2.1. ZONE D'ETUDE

La zone d'étude s'étend à quelques kilomètres autour des deux tourbières de Marchiennes et de Vred (Figure 1). Celles-ci sont séparées d'environ 2 km. La zone d'étude s'étend principalement sur les communes de Vred, Marchiennes, Pecquencourt et Rieulay.

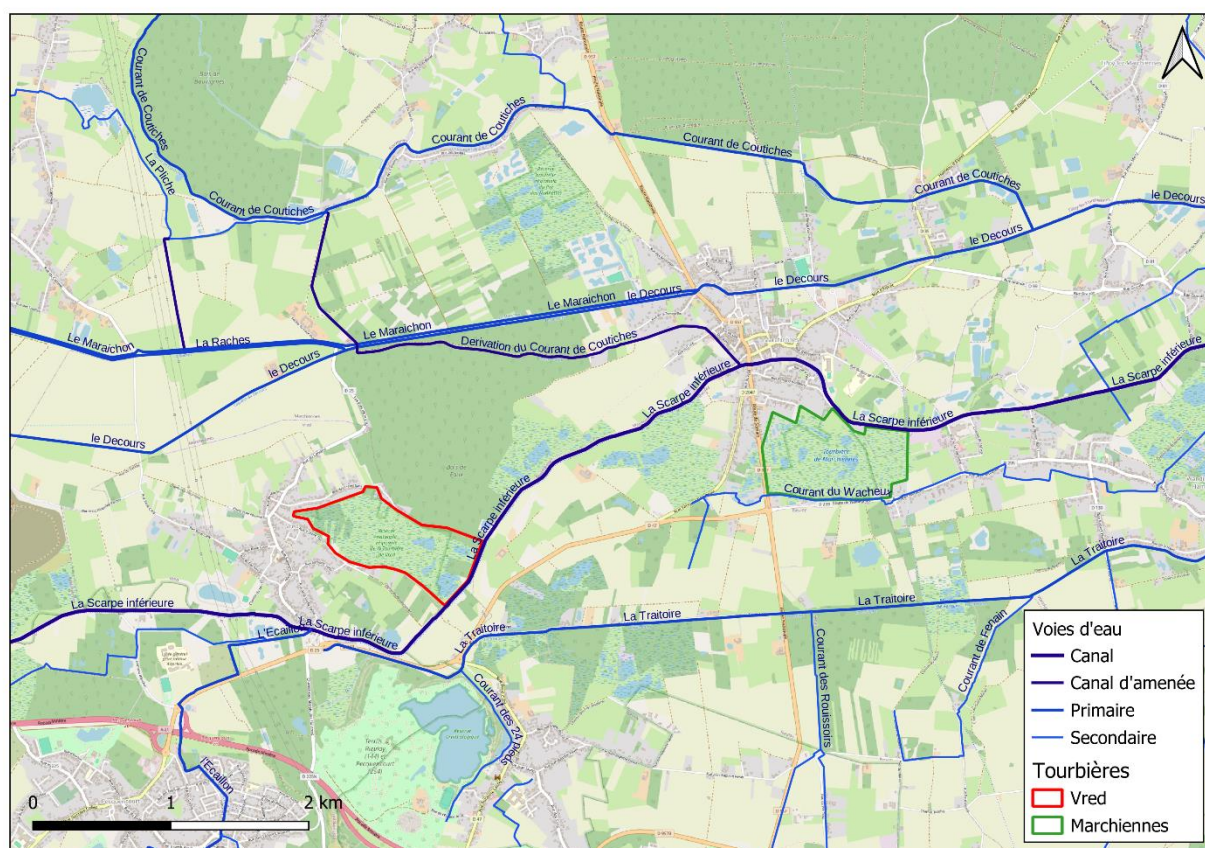


Figure 1 : Le secteur d'étude autour des deux tourbières de Vred et de Marchiennes et les principales voies d'eau.

2.2. CONTEXTE CLIMATIQUE

Les données pluviométriques à la station MétéoFrance de Douai montrent un cumul moyen annuel d'environ 700 mm pour la période 2013-2021. Cela représente une moyenne mensuelle d'environ 60 mm avec une variabilité relativement importante (Figure 2).

Les données d'évapotranspiration potentielle aux stations MétéoFrance proches de la zone d'étude (Figure 3) montrent une dynamique saisonnière régulière avec assez peu de variations spatiales et assez peu de variations interannuelles.

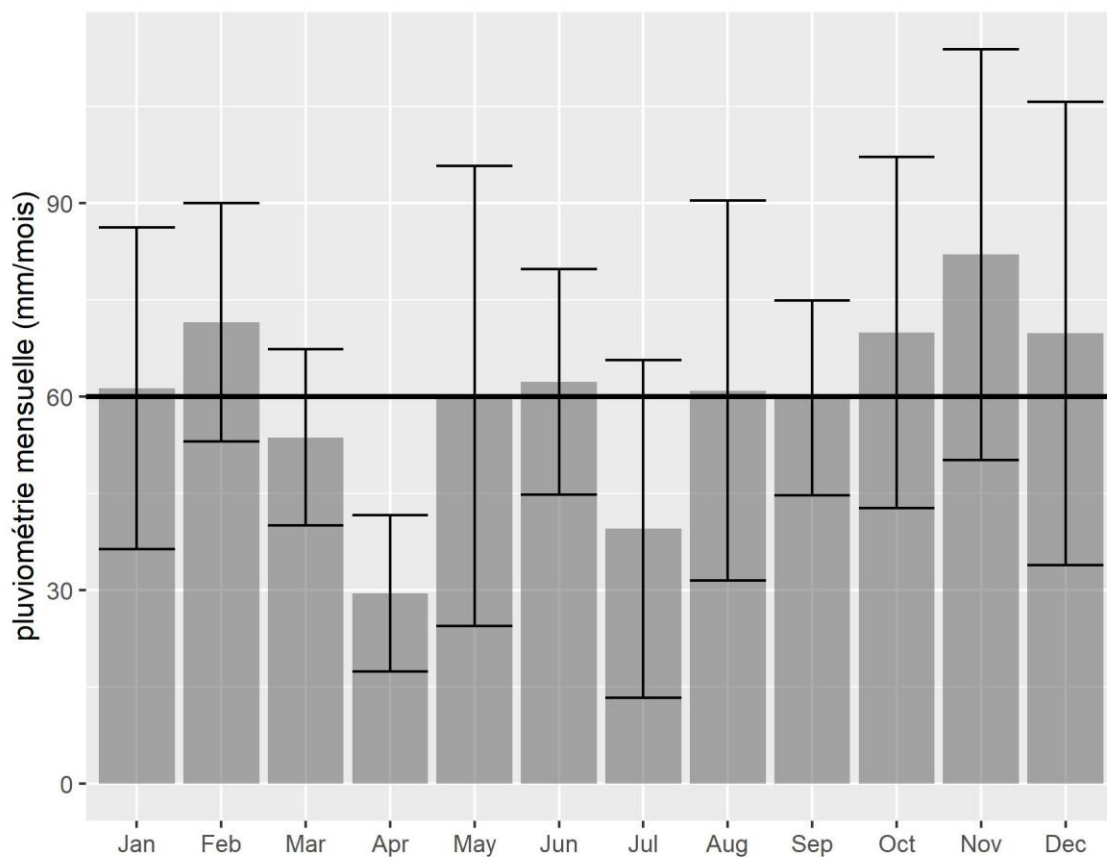


Figure 2 : Pluviométrie mensuelle moyenne à la station de Douai sur la période 2013-2021.

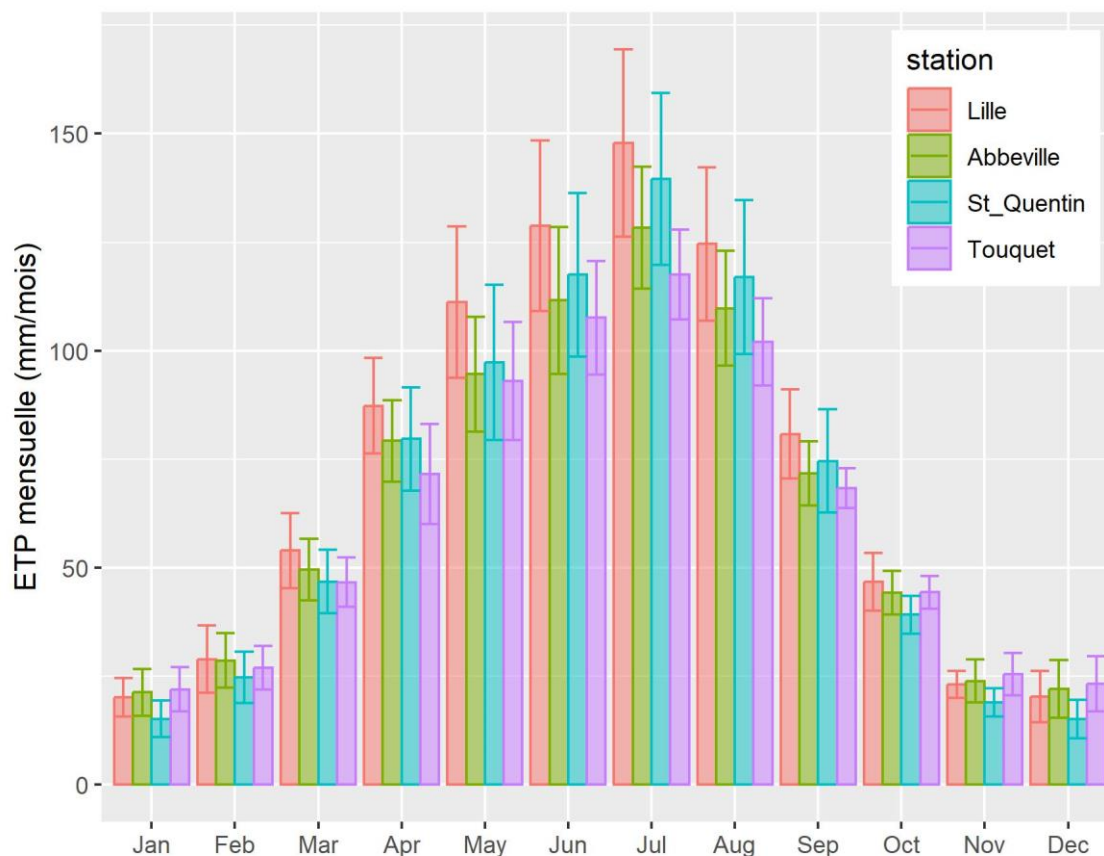
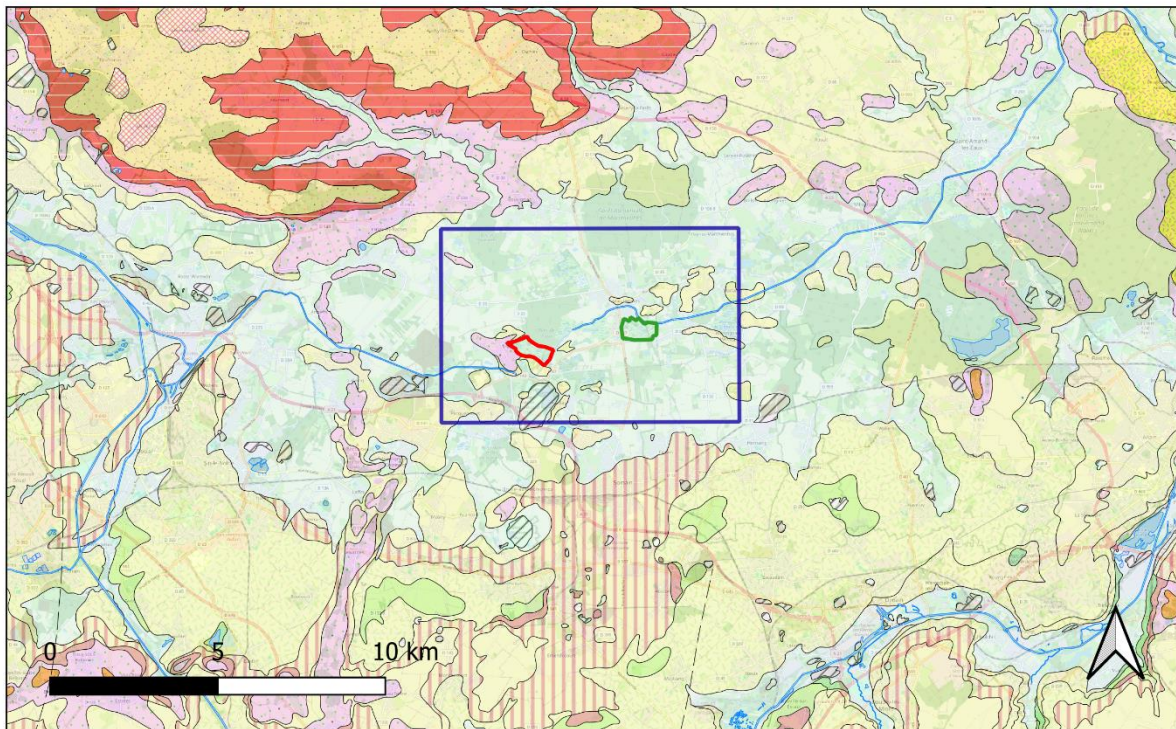


Figure 3 : Moyenne sur la période 2013-2020 des cumuls mensuels de l'évapotranspiration potentielle mesurée sur 4 stations Météo-France.

2.3. CONTEXTE GEOLOGIQUE

La zone d'étude se situe dans le bassin d'Orchies. La carte géologique harmonisée (Desoignies et al., 1973) permet de visualiser la lithologie des terrains affleurants (Figure 4). Le profil géologique du forage BSS000CSYS situé dans la commune de Vred, et la coupe géologique de 1963 peuvent être utilisés comme référence sur le secteur (Figure 5 et Figure 6).



- | | |
|---|---|
| /// X, Terrils, crassiers et remblais indifférenciés | e3sgl, Sables d'Ostricourt, Grandglise, glauconieux et de Bracheux, Thanétien supérieur |
| Fz, Alluvions récentes, Holocène | e3at, Argiles, argiles sableuses et tuffeaux, Thanétien inférieur |
| OE-Gr(SRe3-4)/e3sgl, Limon loessique avec cailloutis de base à silex et vestiges yprésiens, sparnaciens et Thanétien / Sables et grès d'Ostricourt, Grandglise, glauconieux et de Bracheux (Thanétien sup), Quaternaire | c3-4Cr, Craie du Coniacien moyen à supérieur |
| OE-Gr(SRe3-4)/e3at, Limon loessique avec cailloutis de base à silex et vestiges yprésiens, sparnaciens et landéniens reposant sur les argiles et tuffeaux du Thanétien inférieur indifférenciés, Quaternaire | c2c-3Cr, Craie Turonien supérieur |
| OE-RS/c3-4Cr, Limon + RS / Craie blanche du Coniacien | c2b-cCr, Craie à silex et bancs marneux, Turonien moyen à supérieur |
| Re-pS, Formations sableuses tertiaires résiduelles, Cénozoïque | c2Cr, Craie du Turonien supérieur, Marnes du Turonien moyen et inf. |
| pGrS/e3-5, Cailloutis à silex en épandage au sommet des buttes tertiaires, Plio-Pléistocène | c2bCr, Marnes à Terebratulina rigida, Turonien moyen |
| e4YFI, Yprésien argileux | c2b-aCr, Marnes blanc verdâtre ("Dièves"), Turonien moyen et inférieur |
| e4YMPCu, Sable de Mons-en-Pévèle, Yprésien | c2aCr, Marnes à Inoceramus labiatus, Turonien inférieur |
| e4SQsgm, Sables du Quesnoy, Sables blancs et Grès mamelonnés, Sparnacien (ex-Landénien supérieur continental, pro parte altérites des dépôts sableux thanétiens antérieurs) | □ Vred |
| | □ Marchiennes |
| | □ zone d'étude |

Figure 4 : Carte géologique 1 :50 000ème harmonisée (Desoignies et al., 1973) montrant les terrains affleurants autour de la zone d'étude (cadre de la Figure 1) et des tourbières de Marchiennes et de Vred.

Le bassin d'Orchies correspond à une synforme marquée par des dépôts crétacés d'épaisseur croissante vers le centre. Cette cuvette morphologique correspond à un bassin hydrogéologique de l'aquifère de la craie. La série crétacée (c2-c4) qui s'étend au-delà du bassin d'Orchies, est constituée par les assises crayeuses du Turonien supérieur et du Sénonien surmontant des dépôts plus marneux (Cénomaniens à Turonien moyen).

Sur cette série crétacée se sont déposés les terrains tertiaires (e2-e4) : argile de Louvil ou tuffeau de Valenciennes, sables thanétiens parfois appelés sables landéniens (sable d'Ostricourt), argile d'Orchies. Ainsi, plusieurs domaines se distinguent sur le secteur d'étude :

- Au Nord du bassin alluvial de la Scarpe, la couverture tertiaire est continue,
- Au Sud, elle est sous forme de mosaïque (buttes témoins et lambeaux résiduels), laissant affleurer la craie séno-turonienne, abstraction faite des dépôts quaternaires (alluvions et limons),
- Dans le bassin alluvial de la Scarpe, les alluvions (Fz) reposent sur les sables tertiaires et il est difficile de placer une coupure précise entre les deux formations. Il convient donc de considérer les tracés figurant sur la carte géologique 1 :50000^{ème} avec prudence ; il est possible qu'à l'intérieur même de la zone d'alluvions de la Scarpe quelques îlots tertiaires peu remaniés subsistent sous la couverture superficielle.

La série crétacée repose directement sur les terrains paléozoïques :

- Grès et schistes du Siluro-Dévonien,
- Calcaire carbonifère du Dinantien,
- Grès, schistes et houille du bassin houiller traversant le Nord de la France et le Sud de la Belgique, de part en part.

L'ensemble de ces terrains paléozoïques est très plissé et faillé suivant une direction principale Est-Ouest.

Le secteur d'étude est caractérisé par la présence de terril minier, vestige de l'exploitation minière du Nord de la France (dénomination X sur la Figure 4).

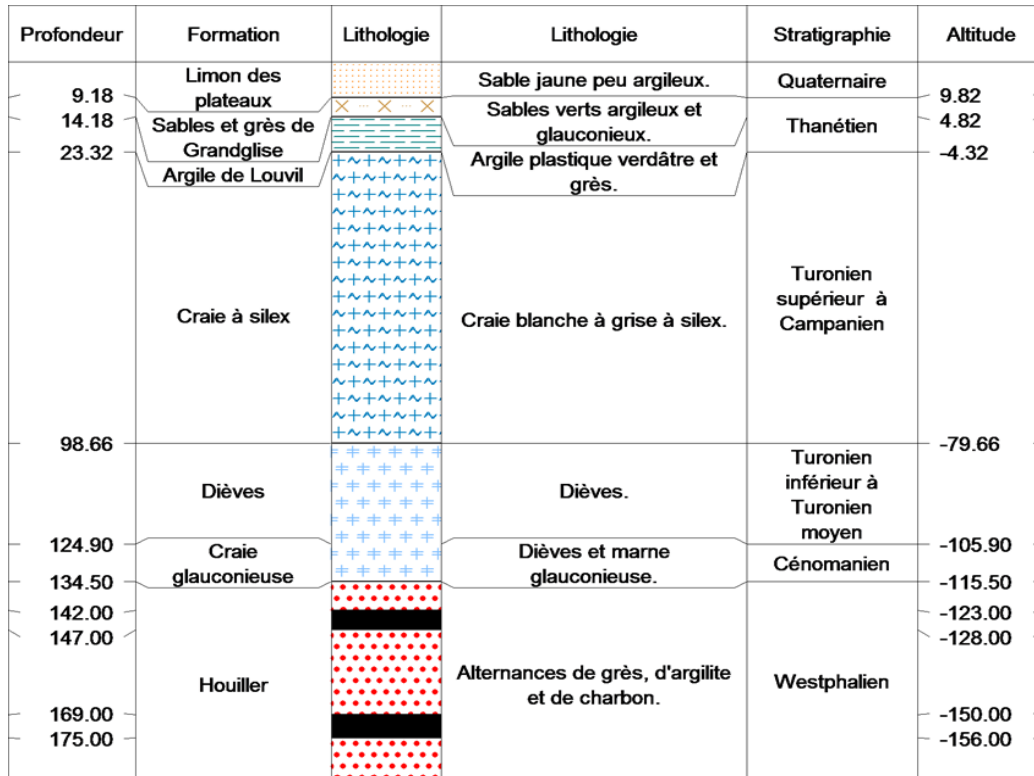


Figure 5: Coupe géologique de référence (forage 00281X0107/S66405 situé à Vred).

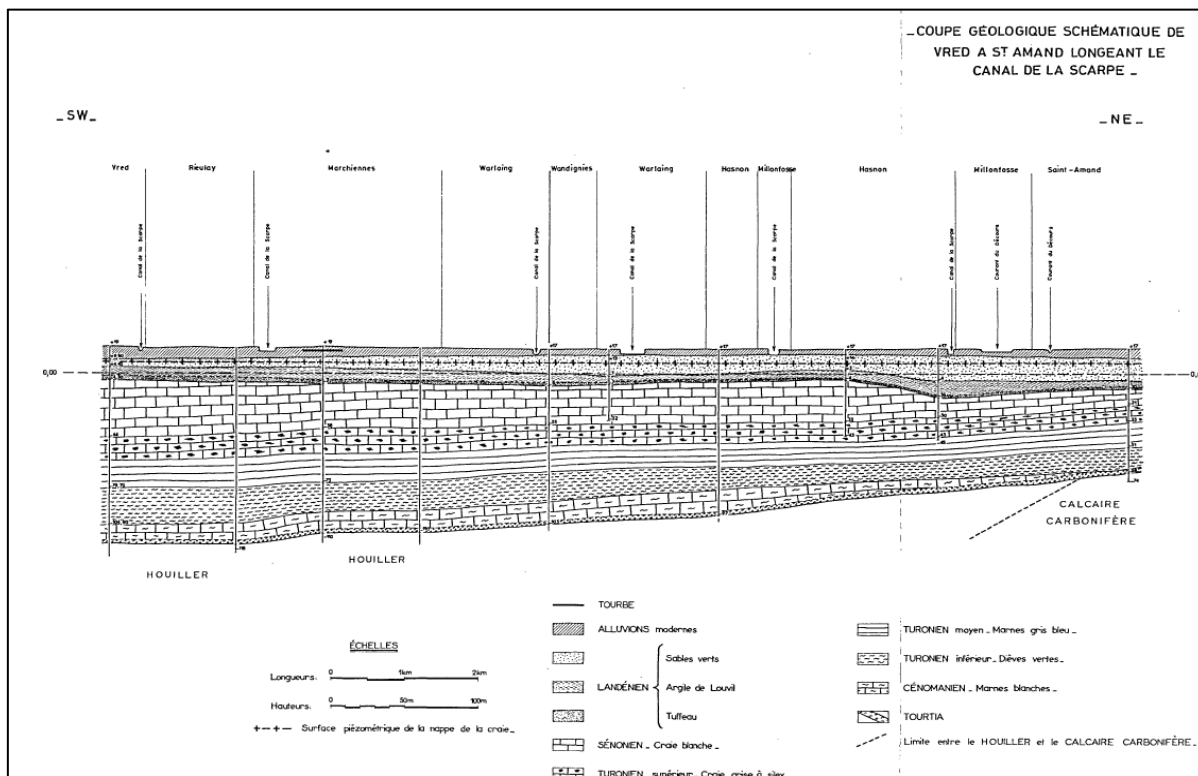


Figure 6 : Coupe géologique de Vred à Saint-Amand longeant le canal de la Scarpe. (Rossignol et al., 1963; Clevenot et al., 1991).

2.4. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

Plusieurs nappes sont présentes dans la zone d'étude :

- La nappe des sables thanétiens qui se confond avec celle des alluvions dans la dépression alluviale de la Scarpe.
- La nappe de la craie séno-turonienne, d'extension régionale, constitue la ressource en eau principale. Le réservoir est constitué du Turonien supérieur et du Sénonien, le substratum imperméable est constitué de marnes et craies allant du Cénomanién au Turonien moyen. Sur le secteur d'étude, l'aquifère de la craie est confiné sous les argiles de Louvil, formant une nappe captive. Elle est libre au sud du secteur d'étude, où s'effectue la recharge naturelle de la nappe.
- La nappe des calcaires carbonifères, présente plus au nord.

La nappe plus profonde des calcaires carbonifères n'a pas été étudiée dans cette étude qui se focalise sur la nappe des sables et la nappe de la craie, séparées par les argiles de Louvil.

Les cartes piézométriques

Les cartes piézométriques traduisent la variation spatiale des niveaux d'eau de la nappe en m NGF. Elles permettent de visualiser le comportement dynamique à un instant donné (direction d'écoulement, gradient hydraulique). Plusieurs cartes piézométriques de la nappe de la craie, réalisées à l'échelle du Nord-Pas-de-Calais, incluent le secteur d'étude :

- carte des basses et hautes eaux de l'année 2009 (Dufrenoy *et al.*, 2011) (Figure 7) ;
- de 1970-1971 en basses eaux (années plutôt excédentaires)
- de 1991 en moyennes-eaux (Clevenot *et al.*, 1991) (année plutôt déficitaire)
- au printemps 2001 (année de très hautes eaux) (Figure 10).

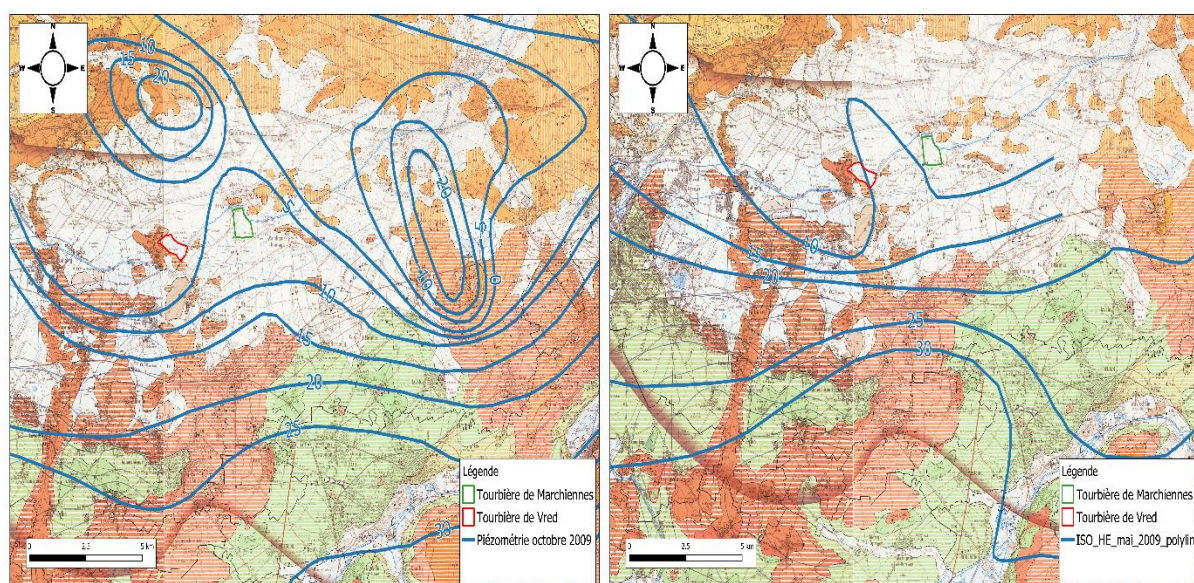


Figure 7: Cartes piézométriques à la craie durant les Basses-eaux (gauche) et Hautes-eaux (droite) de 2009.

À l'échelle de la zone d'étude, les cartes piézométriques montrent toutes un sens d'écoulement de la craie depuis le sud vers le nord, depuis la nappe libre vers la nappe sous couverture tertiaire et la vallée alluviale. La carte piézométrique de 2001 (Figure 10) montre bien le cône de rabattement imposé par les captages d'alimentation en eau potable de Pecquencourt.

Les flux entre nappes

Les échanges entre les nappes des sables et de la craie ont été discutés par le passé. Plusieurs auteurs (Mania, 1978; Clevenot *et al.*, 1991) considèrent les échanges par drainance comme non négligeables à l'échelle du bassin d'Orchies, en particulier par des écoulements des sables tertiaires vers la nappe de la craie liés à deux facteurs :

- La communication entre les deux nappes à la limite de recouvrement tertiaire, au niveau de laquelle la nappe superficielle alimente celle de la craie (alors affleurante sous les limons assez perméables) ;
- La nature du terrain imperméable séparant les deux aquifères. L'argile de Louvil comporte des variations de faciès (dépôts lenticulaires, passage au faciès du Tuffeau de Valenciennes) qui facilitent les communications entre les deux nappes.

Ainsi, à l'amont du bassin versant de la Scarpe, les flux par drainance sont estimés verticaux et descendants (Mania, 1978) : de la nappe des alluvions vers la nappe de la craie, dans les vallées de la Scarpe supérieure (99 l/s) et de l'Escrebieux (62 l/s).

Les chroniques piézométriques

Le piézomètre des Hudions à Rieulay ([BSS000CSUH](#)) (Figure 8) fait l'objet d'un suivi continu dans le cadre du réseau national de surveillance quantitative des eaux souterraines. Une compilation des données de la BSS et d'ADES afin de disposer de données depuis 1910 a permis de décrire sa chronique piézométrique (Figure 8). Les niveaux sont exprimés en mètres NGF et la période considérée est de 1910 à 2026.

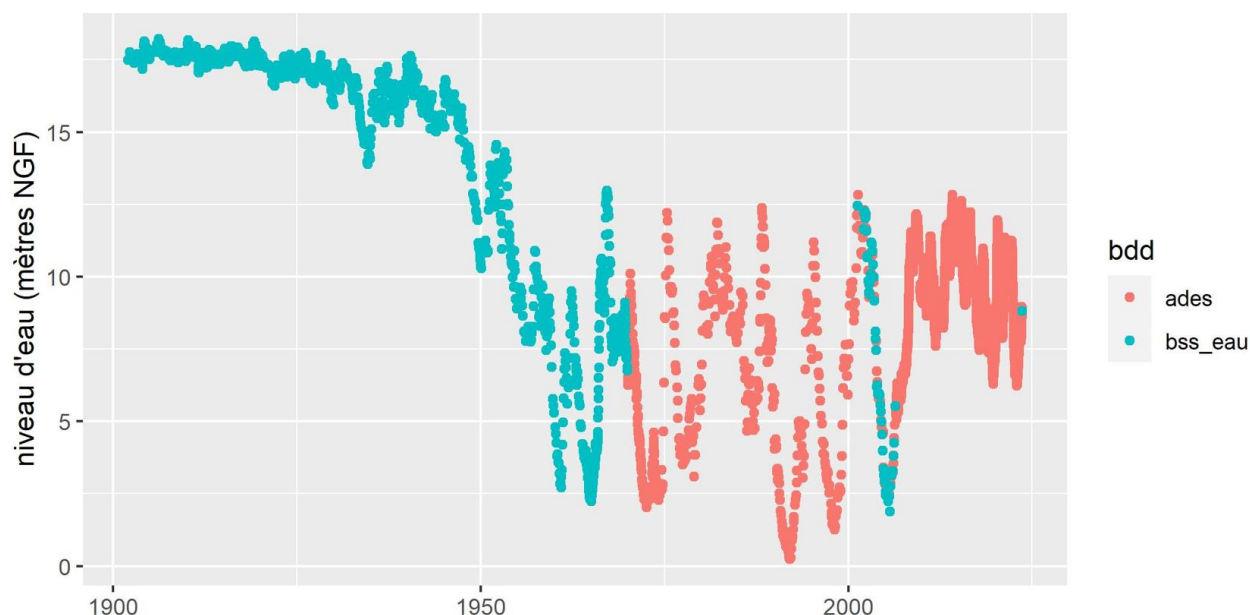


Figure 8 : Chronique piézométrique historique du piézomètre de Rieulay ([BSS000CSUH](#)).

La piézométrie de la craie captive (Figure 8), à l'inverse des chroniques de craie libre (par exemple à Abscon, Figure 9), montre des variations interannuelles plus marquées et des variations saisonnières en revanche plus atténuées. Ces phénomènes résultent de la faiblesse de l'alimentation verticale de la nappe de la craie sous recouvrement tertiaire, laissant place à une alimentation latérale à partir des bords du bassin d'Orchies, expliquant ces décalages importants et ce retard de réponse.

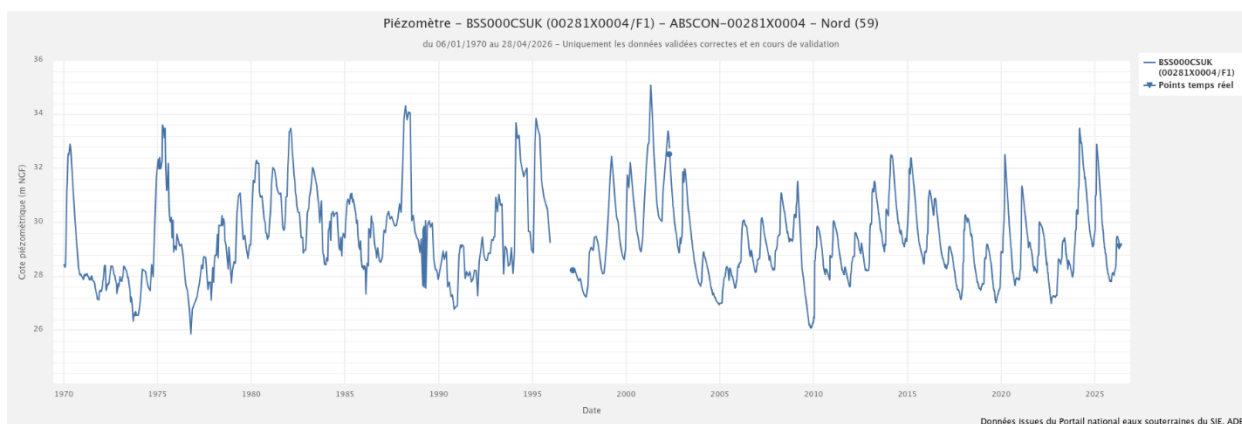


Figure 9 : Chroniques piézométriques historiques au piézomètre d'Abscon ([BSS000CSUK](#)).

2.5. CONTEXTE HYDROLOGIQUE

La Scarpe draine la nappe de la craie, là où cette dernière affleure à l'amont de son bassin versant. Lorsqu'elle arrive sur les terrains tertiaires, elle a tendance à s'étaler en raison de la nature plus argileuse du sol. Avant tout aménagement humain, elle prenait alors une morphologie méandrique au sein d'une large plaine alluviale d'environ 12 km de large sur 30 km de long.

Celle-ci s'individualise comme une dépression presque fermée située entre 16 et 25 mètres au-dessus du niveau de la mer, et se caractérise par un terrain monotone avec des pentes inférieures à 0,5 % (Dion, 1988; Fourrier *et al.*, 1982).

Depuis le Moyen Âge, la plaine alluviale a été largement drainée et les principaux cours d'eau canalisés. Aujourd'hui, sur le secteur d'étude, le canal de la Scarpe est au gabarit Freycinet avec un débit moyen estimé à 2,8 m³/s au niveau de l'écluse de Marchienne. Le canal de la Scarpe est doublé par les canaux de la Traitoire et du Décours qui drainent la plaine (Figure 1).

Le canal de la Scarpe est endigué et perché sur une partie de son linéaire. Sur la zone d'étude (quelques kilomètres autour des 2 tourbières, cf. Figure 1), il est perché sur la majeure partie, à l'exception de l'aval immédiat de l'écluse de Marchiennes où la dérivation du courant de Coutiches le rejoint sans dénivelé. D'après les dossiers VNF annexés aux arrêtés préfectoraux du 20/11/2018 portant règlement d'eau des ouvrages de navigation, le canal de la Scarpe sur le secteur d'étude a les caractéristiques suivantes :

- Un mouillage théorique de 1,20 m.
- Un Niveau Normal de Navigation (NNN) pratiqué de 17,91 m NGF avant l'écluse de Marchiennes et de 16,68m NGF après l'écluse de Marchiennes.
- La chute d'eau amont/aval de l'écluse de Marchiennes est maintenue à 1,23 m.
- À l'amont immédiat de l'écluse de Marchiennes, la cote du débordement du bief est 18,31 m NGF.

La tourbière de Vred est située à l'Ouest (rive gauche) du bief Marchiennes/Lallaing, tandis que la tourbière de Marchiennes est située au Sud (rive droite) du bief Marchiennes/Warlaing.

La zone d'étude est située dans le bassin minier. L'exploitation minière a perturbé les conditions topographiques et hydrographiques, entraînant des affaissements de terrains avec des répercussions sur les écoulements des eaux pluviales en limitant leur possibilité d'évacuation. Pour pallier ce problème d'affaissement, des stations de relevage des eaux (SRE) ont été installées afin de relever ces apports de ruissellement pluvial vers l'exutoire, souvent constitué du canal de la Scarpe. Ainsi, par exemple, la station de relevage des eaux « Vred III » (ED 21) à Pecquencourt relève les eaux du bassin versant de l'Ecaillon et d'une branche de la Traitoire, en rive droite du canal, pour les rejeter dans la Scarpe aval.

2.6. EXPLOITATION DE LA RESSOURCE

La base de données de redevance, gérée par l'Agence de l'eau Artois Picardie, permet d'apprécier les volumes prélevés dans les eaux souterraines, leur répartition spatiale et par usage. En croisant cette base de données avec la BSS qui renseigne sur la nappe captée, on a également une idée de l'origine de l'eau. Ces données sont présentées sur la Figure 10 pour l'année 2023 et autour de la zone d'étude.

La ressource en eau la plus exploitée est la nappe de la craie, qui est très productive sur le secteur d'étude. De plus, la nappe de la craie captive présente une qualité intéressante compte tenu de la dénitrification qui s'y développe. Une grande partie des volumes extraits est destinée à l'alimentation en eau potable, à la fois pour un usage local et pour l'exportation vers les zones à plus forte densité de population.

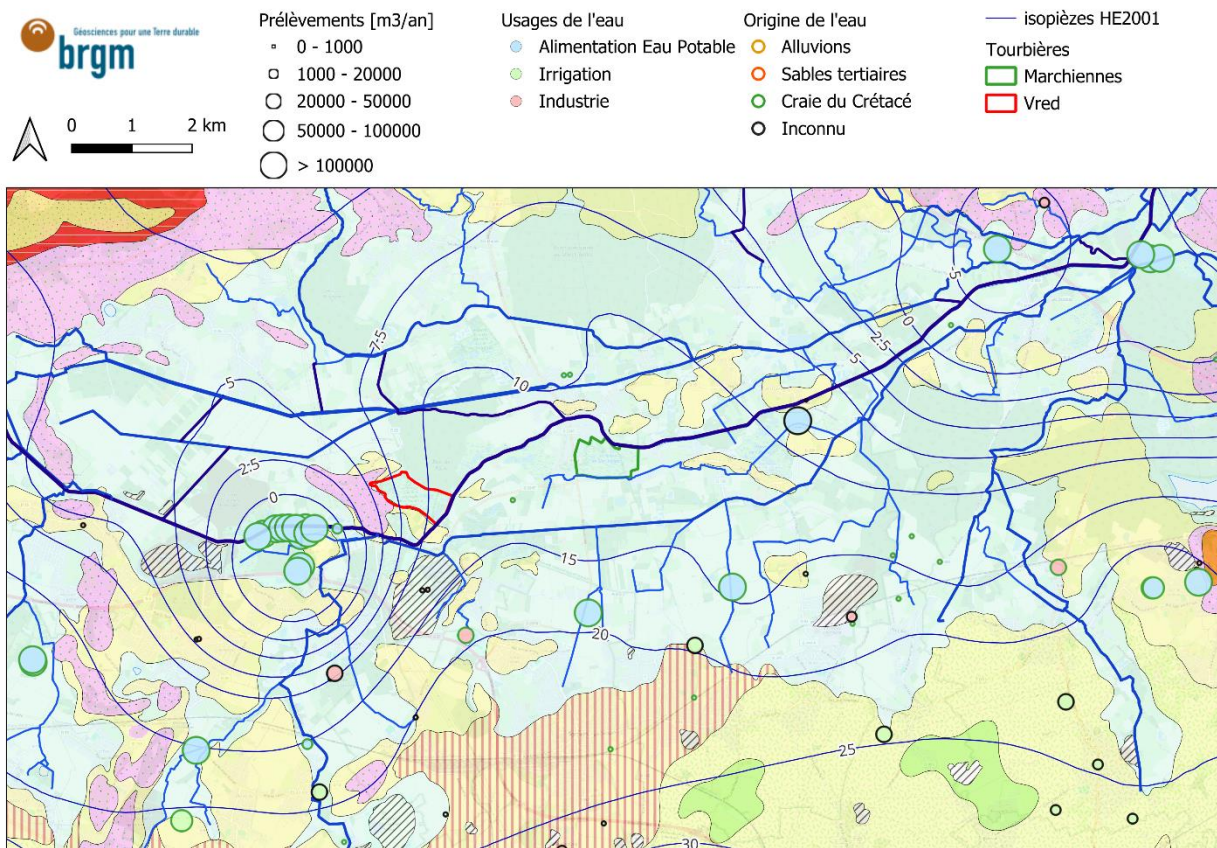


Figure 10 : Carte des prélèvements en eau souterraine pour l'année 2023 avec les volumes, les usages et l'origine de l'eau (source : base de redevance de l'Agence de l'eau Artois Picardie). Fond cartographique : carte géologique harmonisée (cf Figure 4 pour la légende complète de la carte géologique) et carte piézométrique à la craie des hautes eaux de 2001.

2.7. GEOCHIMIE DE LA CRAIE

Le chimisme des eaux de la nappe de la craie est prédominé par des espèces dissoutes issues de l'altération de la craie. Les minéraux dominants sont les carbonates de calcium/magnésium. L'équation chimique de leur dissolution est :



C'est la raison pour laquelle la géochimie des eaux du bassin versant sont bicarbonatées-calciques, et à saturation vis-à-vis de la calcite. La dissolution de la craie mobilise également en phase aqueuse des éléments traces comme le strontium. Cela explique pourquoi la composition isotopique en strontium dissous est un bon traceur des interactions eaux-roche.

Les eaux de la nappe de la craie contiennent également des contaminants issus des eaux de recharge (pollution diffuse ou ponctuelle). Un des polluants les plus présents est le nitrate, qui est

en général issu soit de la fertilisation ou de l'élevage, soit des eaux usées domestiques. La dénitrification naturelle de la nappe de la craie lors du passage en captivité a fait l'objet de nombreuses études (Simon, 1986; Landreau *et al.*, 1987; Mariotti *et al.*, 1988). Cela permet une réduction des concentrations en nitrates qui sont transformés principalement en diazote.

3. Matériels et méthodes

3.1. LES NOUVEAUX FORAGES

En 2021, le Parc a fait réaliser des doublets de piézomètres (Figure 11), c'est-à-dire deux forages distants de quelques mètres et captant respectivement la nappe de la craie et la nappe des sables (Figure 14).

Le doublet en bordure de la tourbière de Vred a été réalisé du 26 au 31/05/2021. Le doublet en bordure de la tourbière de Marchienne a été réalisé du 3 au 9/06/2021.

Les échantillons de roches ont été prélevés tous les mètres et stockés dans les locaux du Parc Naturel Régional. Ces déblais ont été analysés par le géologue régional du BRGM pour dresser les coupes géologiques interprétées présentées en Figure 12 et Figure 13.

Les sables du Thanétien en place et les sables remaniés ou alluvionnaires n'ont pas pu être distingués. Ainsi, seul le premier mètre, riche en matière organique, a été daté du quaternaire.



Figure 11 : Photographies prises le 31/05/2021 lors de la foration du piézomètre dans la craie en bordure de la tourbière de Vred ([BSS004CFVG](#)). Plan général à gauche, argiles de Louvil sur la tarière à droite.

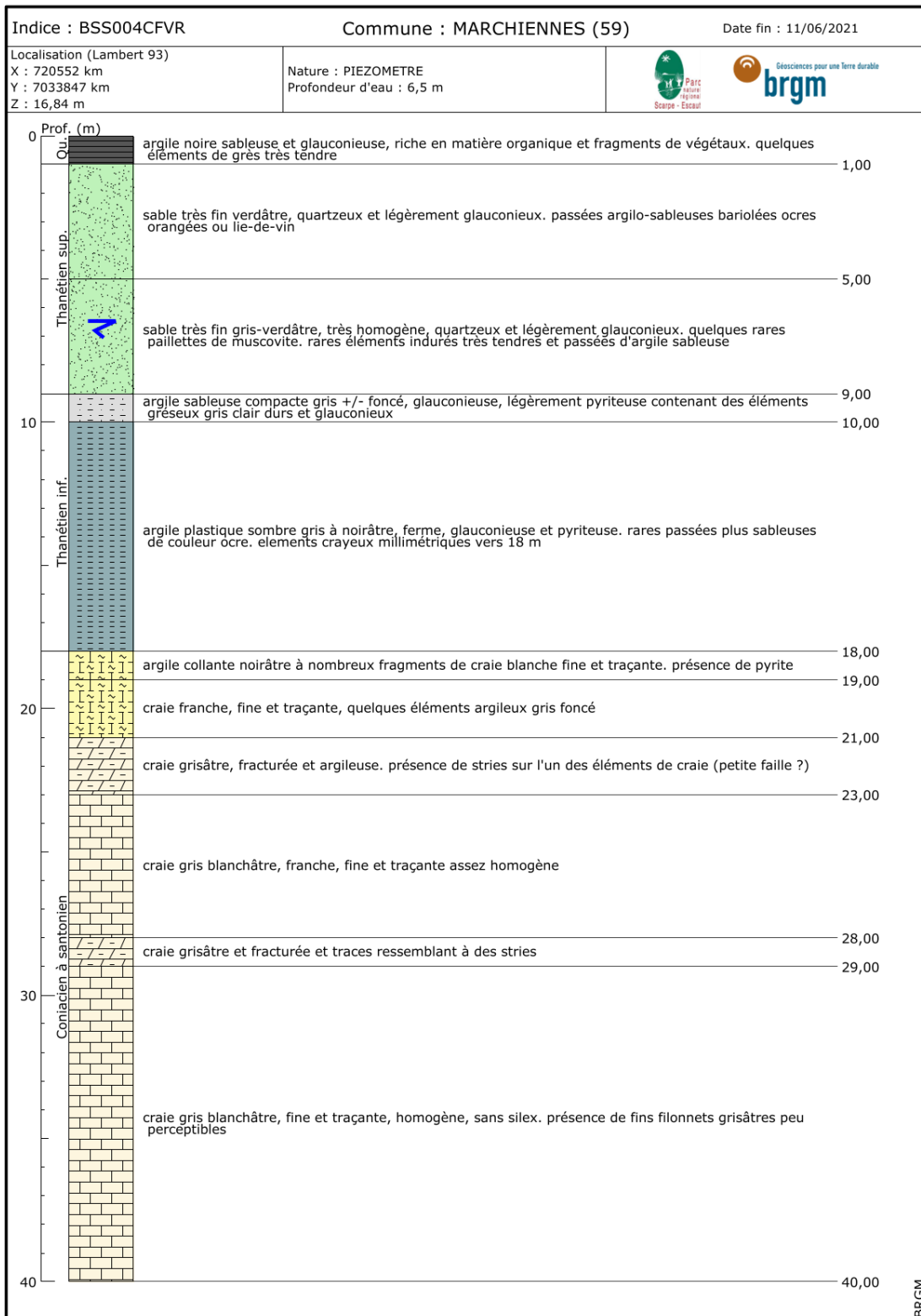


Figure 12 : Coupe géologique interprétée au droit de la tourbière de Marchiennes issue du forage à la craie [BSS004CFVR](#) (le forage au sable [BSS004CFVX](#) montre la même géologie). Le trait bleu indique le niveau piézométrique de la nappe de la Craie.

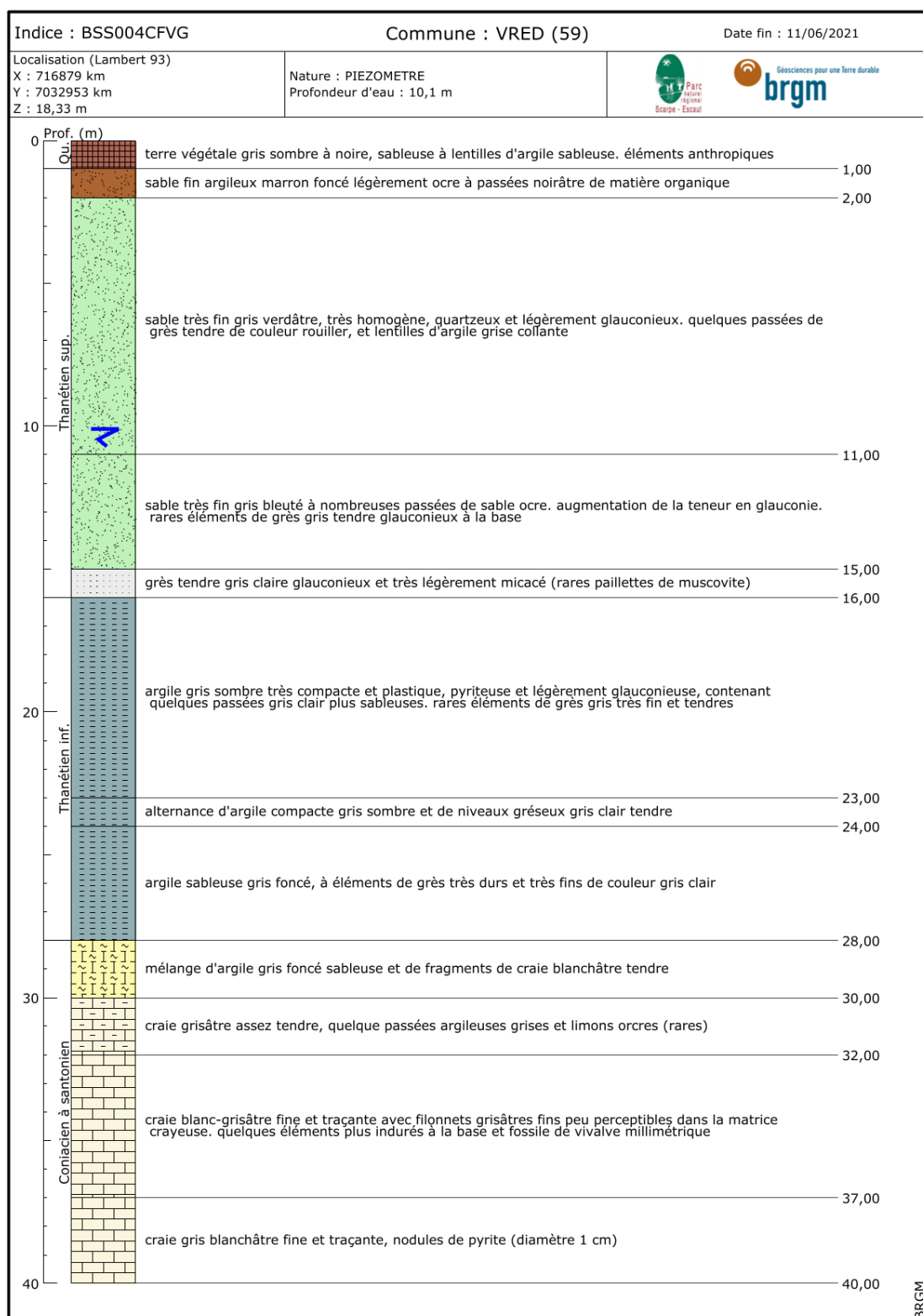


Figure 13 : Coupe géologique au droit de la tourbière de Vred issue du forage à la craie [BSS004CFVG](#) (le forage au sable [BSS004CFVQ](#) montre la même géologie). Le trait bleu indique le niveau piézométrique de la nappe de la Craie.

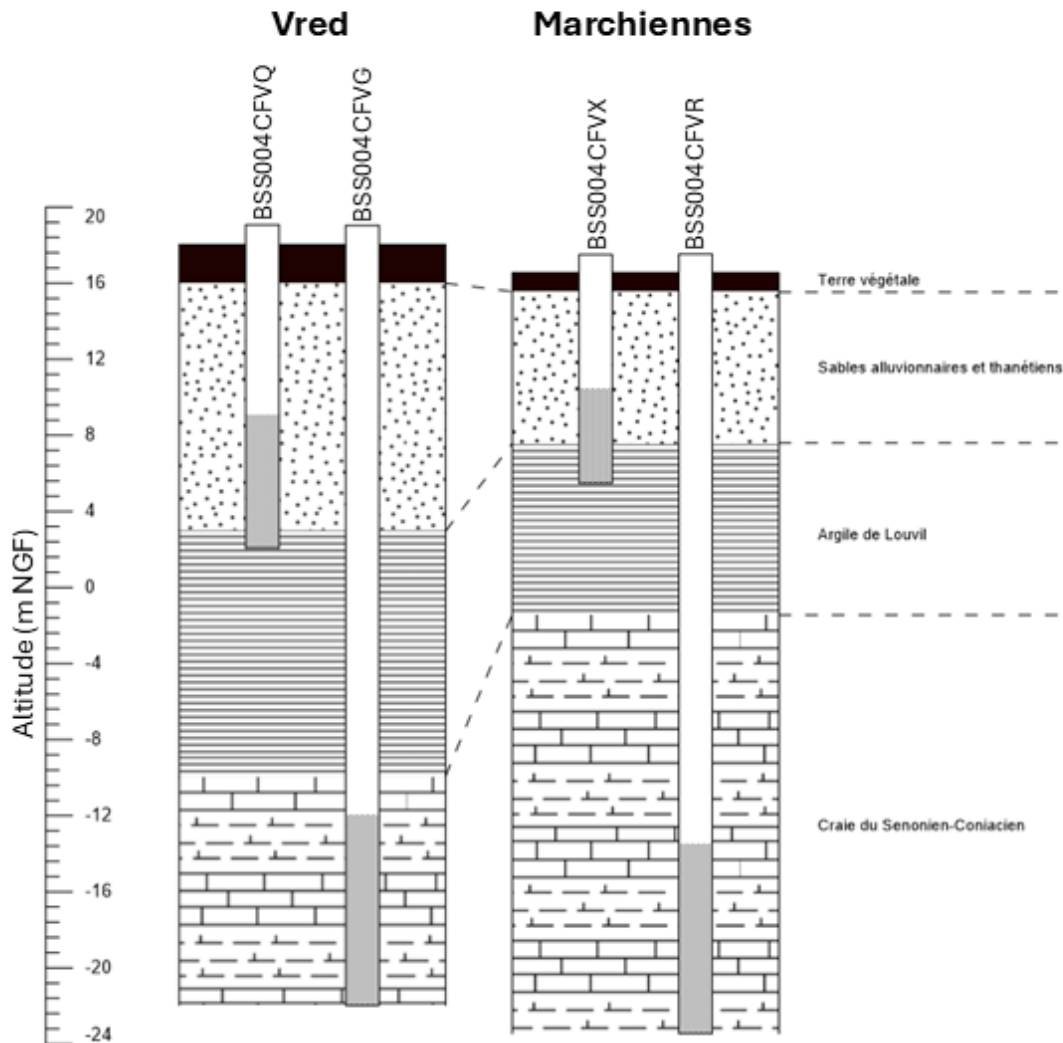


Figure 14 : Coupes géologiques et coupes techniques des doublets de forages de Vred et Marchiennes.

3.2. LES SUIVIS CONTINUS

Les quatre forages précédents ont été instrumentés par des capteurs de suivi continu du niveau d'eau, de la température et de la conductivité électrique. Les capteurs ont été installés le 18/10/2021 à Vred : à 34 m/repère de mesure dans le forage à la craie et à 14 m/repère de mesure dans le forage au Sable. Les capteurs ont été installés le 09/03/2022 à Marchiennes : à 34,78 m/repère de mesure dans le forage à la craie et à 8,42 m/repère de mesure dans le forage au sable.

Les données sont acquises à un pas de temps de 15 minutes et télétransmises tous les jours. Le pas de temps de 15 minutes a été choisi pour être en cohérence avec l'acquisition de données de niveau au sein des tourbières. À partir du 29/03/2023, un pas de temps de 1h a été utilisé.

Les données de conductivités sont corrigées de la température pour être ramenées à 25°C.

Les données journalières de niveaux sont diffusées en temps réel sur le portail ADES au sein du Réseau de suivi quantitatif des eaux souterraines en Scarpe Escaut ([0102400004](#)).

Un nivellement centimétrique de la tête des ouvrages a été réalisé afin de convertir précisément les niveaux d'eau mesurés en altitude (Tableau 1).

Tableau 1 : Informations recueillies lors des nivellements centimétriques des nouveaux forages

BSS	Commune	Aquifère capté	X en Lambert 93	Y en Lambert 93	Z référence altimétrique en m NGF	Précision Horizontale	Précision Verticale	Hauteur Repère de mesure - référence altimétrique	Hauteur Référence altimétrique - sol
BSS004CFVQ	Vred	sable	716882.531	7032959.34	18.372	0.021	0.027	0.68	0.3
BSS004CFVG	Vred	craie	716878.521	7032952.95	18.33	0.022	0.029	0.74	0.3
BSS004CFVR	Marchiennes	craie	720552.267	7033847.011	16.84	0.027	0.043	0.86	0.3
BSS004CFVX	Marchiennes	sable	720555.093	7033853.465	16.766	0.026	0.041	0.54	0.28

3.3. LES POINTS DE PRELEVEMENT

En 2022, plusieurs campagnes de recherche de points d'accès à la nappe ont été réalisées. L'objectif est d'identifier les forages utilisables pour réaliser des prélèvements en eau. Les critères de recherche sont l'accessibilité, les caractéristiques de l'ouvrage (en particulier un diamètre suffisant pour y descendre une pompe ou la présence d'une pompe en place utilisable), la profondeur des crépines (qui permet de renseigner sur la nappe captée), la situation vis-à-vis du secteur d'étude, etc.

À l'issue de ce travail, 9 forages sont sélectionnés parmi une quinzaine de forages identifiés. Les prélèvements en forages sont complétés par des points de prélèvements des eaux de surface afin de caractériser l'ensemble des éléments les plus importants de l'hydrosystème du secteur d'étude.

Finalement, 14 points de prélèvements sont sélectionnés, présentés sur la Figure 15 et le Tableau 2.

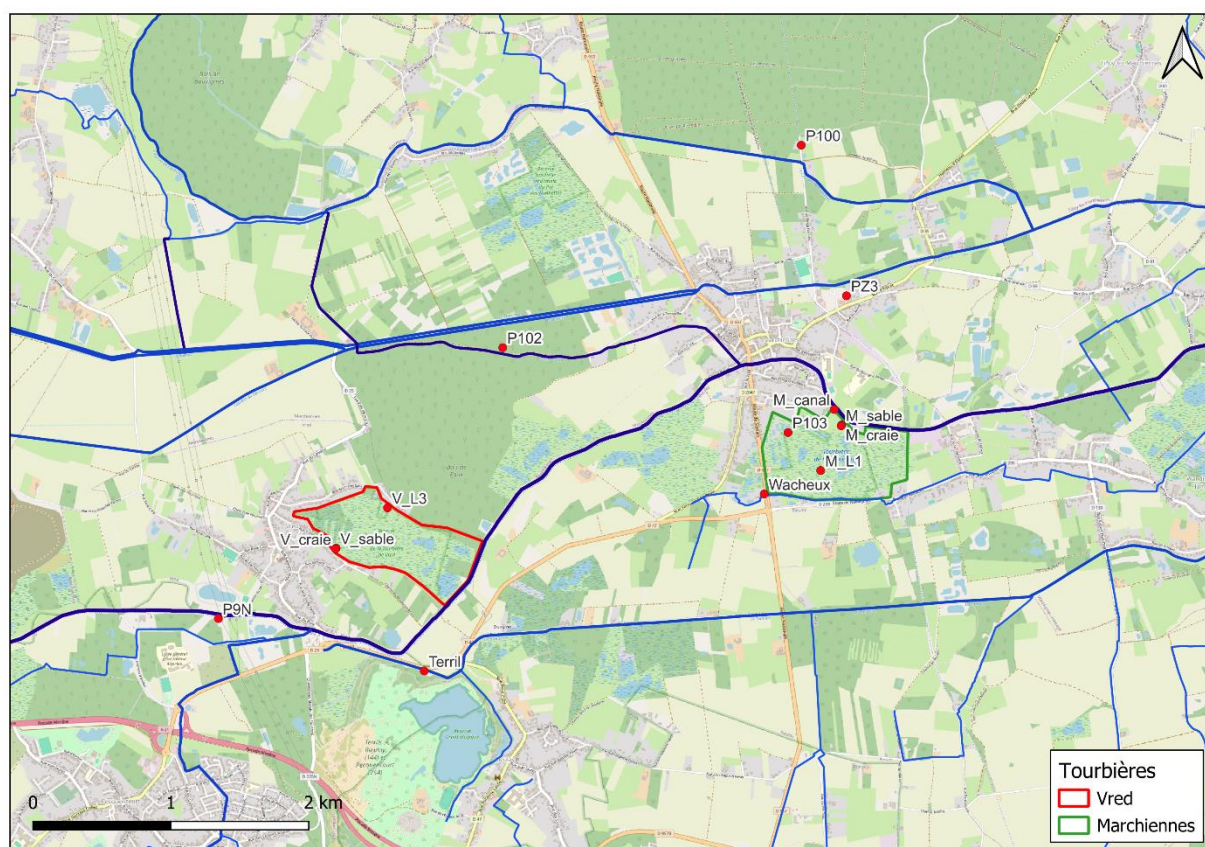


Figure 15 : Carte des points de prélèvements de l'étude.

Tableau 2 : Description des points de prélèvements en eau de l'étude (esu : eaux de surface).

nom	type	BSS	Suivi continu	crépine	commentaire
P100	alluvion	BSS000CFNN	qualité par l'AEAP niveau par le PNRSE	de 2 à 5 m	forage réalisé par le PNRSE en 1999
P102	alluvion	BSS004GZEL	niveau par le PNRSE	de 3 à 6 m	forage réalisé par le PNRSE en 1999
P103	alluvion	BSS004LJLD	niveau par le PNRSE	de 1,75 à 4,75 m	forage réalisé par le PNRSE en 1999
M_craie	craie	BSS004CFVR	niveau, température, conductivité par le BRGM	30 à 40m	forage réalisé par le PNRSE en 2021
P9N	craie	BSS000CRKG			Captage d'alimentation en eau potable le plus à l'Est du champ captant de Pecquencourt
V_craie	craie	BSS004CFVG	niveau, température, conductivité par le BRGM	30 à 40m	forage réalisé par le PNRSE en 2021
M_canal	esu				dans le canal de la Scarpe à l'aval de l'écluse de Marchiennes
M_L1	esu				dans le fossé central de la tourbière de Marchiennes
Terril	esu				dans la Traitore à l'aval d'un rejet venant du Terril de Rieulay. Ce site avait fait l'objet d'un prélèvement dans l'étude de Gaulier et al. (2020) sur l'impact du drainage des Terrils miniers sur les environnements aquatiques
V_L3	esu				
Wacheux	esu				dans le Wacheux à l'amont immédiat du pont de la D957
M_sable	sable	BSS004CFVX	niveau, température, conductivité par le BRGM	de 6 à 11 m	forage réalisé par le PNRSE en 2021
PZ3	sable	BSS000CFMY		de 2 à 13 m	sur un ancien site industriel à proximité de l'ancien puits de mine de Marchiennes
V_sable	sable	BSS004CFVQ	niveau, température, conductivité par le BRGM	9 à 16 m	forage réalisé par le PNRSE en 2021

Le forage P100 ([BSS000CFNN](#)) a fait l'objet d'un suivi qualitatif par l'agence de l'eau Artois Picardie de 2008 à 2024 (Figure 16). Les concentrations en chlorures (Cl^-), en potassium (K^+) et en sulfates (SO_4^{2-}) sont élevées en 2008, probablement en lien avec une pollution ponctuelle. À partir de 2015 environ, ces concentrations se stabilisent autour de valeurs plus naturelles. Néanmoins, on remarque que les analyses de septembre 2023 et septembre 2024 montrent une augmentation de la concentration en nitrates, probablement en lien avec une nouvelle pollution ponctuelle. L'origine de ces pollutions est difficile à établir (engrais agricole, assainissement non collectif, déversement sauvage) car la faible profondeur du piézomètre (crépiné de 2 à 5 m) le rend vulnérable à l'activité anthropique locale même pour des volumes déversés très faibles.

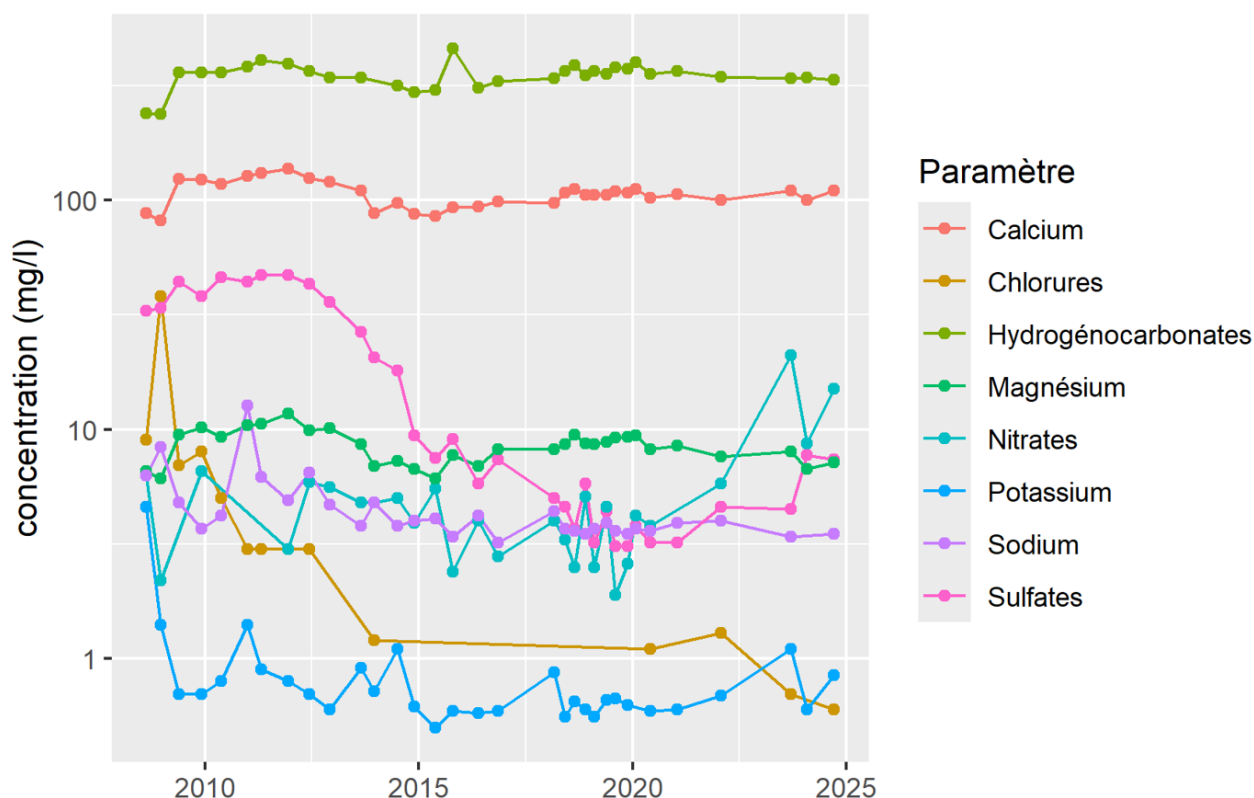


Figure 16 : Évolution des ions majeurs suivis dans le forage P100 ([BSS000CFNN](#)) par l'Agence de l'Eau Artois Picardie (Données sources : www.adès.eaufrance.fr).

3.4. LES CAMPAGNES DE PRELEVEMENTS

Deux campagnes (Hautes-eaux et Basses-eaux) étaient prévues initialement dans l'étude. Lors de la campagne basses eaux de 2022, les niveaux d'eau sont particulièrement bas (Figure 17), ne permettant pas de prélever dans plusieurs points d'eaux de surface et dans les forages les plus superficiels. Pour cette raison, de nouvelles campagnes, non prévues initialement, ont été réalisées. Finalement, 4 campagnes de prélèvements ont été réalisées pour cette étude :

- Campagne Hautes eaux réalisée du 9 au 12/05/2022 ;
- Campagne Basses eaux réalisée du 26 au 27/09/2022 sur les points dont le niveau d'eau le permet ;
- Campagne Hautes eaux réalisée du 27 au 29/03/2023 ;

Campagne Basses eaux réalisée le 17/10/2023 sur les forages aux Sables de Vred et Marchiennes ([BSS004CFVQ](#), [BSS004CFVX](#)) dans le cadre du projet fond hydrogéochimique (Malcuit *et al.*, 2025) ;

Durant les trois premières campagnes de prélèvement, des prélèvements synchrones ont été réalisés par le BRGM aux points listés au paragraphe précédent et par le PNRSE et ECOTELM au sein des tourbières (eaux de surface et forages dans la tourbe). La base de données utilisée par la suite dans l'interprétation inclut également les analyses réalisées par le PNRSE et ECOTELM au sein des tourbières de façon synchrone à nos 3 campagnes (Duranel, 2024a, 2024b).

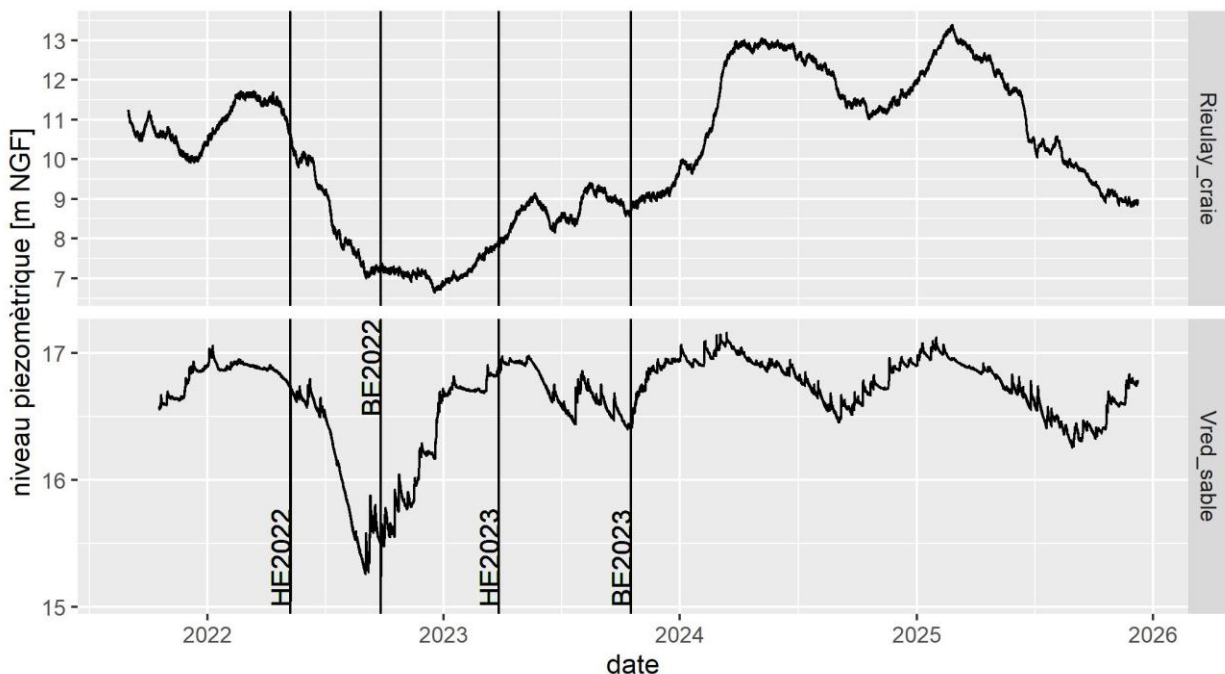


Figure 17 : Temporalité des différentes campagnes de prélèvements en fonction des niveaux de la nappe de la craie (en haut) et de la nappe des Sables (en bas).

3.5. METHODOLOGIE

Les isotopes environnementaux sont naturellement présents dans l'hydrosphère, par opposition aux traceurs isotopiques artificiellement introduits dans un système afin d'étudier son comportement. Le point commun des applications de ces traceurs est la notion **d'origine** et celle de **l'historique** : l'eau souterraine a une origine, elle se recharge à un moment et à un endroit donné. Mais elle peut avoir été mélangée avec des eaux d'origines différentes, avoir partiellement

changé de phase ou avoir interagi avec son environnement, c'est la notion de son historique. Il en est de même pour les espèces chimiques dissoutes dans l'eau.

Les techniques isotopiques ne s'arrêtent pas aux éléments constitutifs de la molécule d'eau, elles permettent aussi un regard très précis sur certaines espèces dissoutes dans une eau naturelle. Citons, à titre d'exemple, le cas des sulfates : ils ont une source, telle que la dissolution de gypse (CaSO_4), le SO_2 atmosphérique ou encore l'oxydation de la pyrite (FeS_2). Mais les concentrations peuvent évoluer, par exemple par réduction microbienne des sulfates en H_2S et HS^- . Les espèces dissoutes ont donc, en quelque sorte, une histoire qui est inscrite dans leur composition isotopique. D'autres questions pratiques de la gestion de l'eau peuvent être abordées avec les techniques isotopiques : quelles sont les causes d'une salinisation progressive d'une ressource en eau qui la rend impropre à certains usages, avec quelles roches l'eau est-elle entrée en contact lors de son cheminement souterrain ? Telles sont les questions auxquelles les isotopes stables d'éléments dissous comme l'azote, le bore, le strontium, le carbone et le soufre peuvent nous donner des éléments de réponse.

Dans le cas de cette étude, nous avons sélectionné, outre la caractérisation chimique des eaux, les traceurs isotopiques suivants : isotopes stables de **la molécule d'eau** ainsi que ceux du **strontium**, et ceux du **bore**.

3.5.1. Isotopes stables de la molécule d'eau

L'hydrogène et l'oxygène de la molécule d'eau comportent des isotopes légers ^{16}O et ^1H et des isotopes lourds ^{18}O et ^2H (ou D, deutérium). La proportion des isotopes lourds est reportée sous forme d'un écart relatif (en pour mille) par rapport à celle d'un étalon, ici la composition moyenne de l'eau de mer. Plus précisément, cet écart est exprimé sous la forme d'un « delta » δ par rapport au standard isotopique international VSMOW, pour *Vienna Standard Mean Ocean Water* (Craig, 1961a, b).

Dans les eaux de pluie, la proportion de ces isotopes varie de façon saisonnière, mais également avec la latitude et avec l'altitude. Cette propriété est utilisée pour déterminer l'origine des eaux souterraines.

En fait, ces variations sont liées aux changements de phase. En effet, lors de l'évaporation ou de la condensation de l'eau, la phase liquide (pluie, eau de surface) est toujours enrichie en isotopes lourds par rapport à la phase gazeuse (vapeur d'eau). Le rapport entre isotopes lourds et légers est fonction de la température à laquelle se produisent ces changements de phase. Les températures diminuant globalement lorsque l'altitude augmente et lorsque la latitude augmente (de l'équateur vers les pôles), les pluies formées à latitudes élevées ou en montagne, seront plus pauvres en isotopes lourds que les pluies formées près de l'équateur, ou en plaine. De la même façon, des eaux souterraines fossiles issues de l'infiltration d'eau durant les périodes glaciaires montreront une signature isotopique plus pauvre en isotopes lourds.

La composition en isotopes stables de l'eau des précipitations à l'échelle mondiale est liée par la relation suivante : $\delta\text{D} = 8,13 \times \delta^{18}\text{O} + 10,8$ (Rozanski *et al.*, 1993). Il s'agit de la droite météorique mondiale (DMM) définie par Craig (1961) puis affinée par Rozanski *et al.* (1993). L'appauvrissement ou l'enrichissement en O ou H des eaux de pluie est lié aux conditions météorologiques locales (gradient de température, d'altitude, de latitude).

Cette eau de pluie ruisselle et s'infiltré et sa composition isotopique initiale peut subir des modifications liées à des processus d'évaporation. Elle peut également se mélanger avec des

eaux d'histoire hydroclimatique différente. L'histoire d'un aquifère peut donc être reconstituée par l'abondance des isotopes stables lourds de l'oxygène (^{18}O) et de l'hydrogène (^2H), notamment en ce qui concerne l'existence d'eaux « fossiles » rechargées lors de périodes climatiques plus froides, l'infiltration d'eaux de surface marquées par l'évaporation. L'analyse isotopique de la molécule de l'eau permet ainsi d'améliorer la compréhension du fonctionnement des hydrosystèmes.

Le $\delta^{18}\text{O}$ peut être utilisé, seul ou avec le $\delta^2\text{H}$, comme indice de connexion entre les eaux de surface et les eaux souterraines. En effet, le $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations est caractérisé par une variabilité annuelle de forme sinusoïdale. Ses valeurs sont corrélées avec la température de l'air, avec des valeurs plus élevées en été et plus faibles en hiver. Dans les eaux de surface, le signal de $\delta^{18}\text{O}$ est généralement très corrélé avec celui de la pluie mais un peu atténué, parce qu'elles ne contiennent pas seulement l'eau de la pluie actuelle mais aussi des eaux de ruissellement plus anciennes ainsi que des eaux souterraines, si ces dernières contribuent au débit des rivières.

3.5.2. Isotopes du strontium

Le strontium possède quatre isotopes : ^{88}Sr , ^{87}Sr , ^{86}Sr et ^{84}Sr . Le ^{87}Sr est lié à la désintégration radioactive du nucléide père ^{87}Rb . Les minéraux ont une signature $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ spécifique liée à leur âge et à leur rapport Rb/Sr. Lors des interactions eau-roche, le fluide qui circule aura un rapport isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ directement lié à celui du minéral ou de l'association minéralogique avec lesquels il interagit. Le rapport isotopique du strontium est donc un marqueur des interactions eau-roche.

Une eau circulant dans la craie peut suivre des voies de circulation préférentielle comme des failles ou des fractures, ce qui entraîne une modification mineure de sa composition chimique. Au contraire, une eau circulant dans le réseau poral de la craie peut interagir avec la matrice et s'enrichir en certains éléments issus de la dissolution du constituant carbonaté majeur de la craie, les coccolithes, algues microscopiques de la flore marine crétacée à exosquelette calcaire. Ces exosquelettes ont, lors de leur construction, précipité le calcium et le strontium de manière similaire, les deux éléments étant voisins dans le tableau de Mendeleïev et n'étant pas différenciables par l'organisme. Ainsi, lorsque l'eau réside longuement dans la roche et qu'elle s'équilibre à la faveur des interactions eau-roche en entraînant la dissolution des coccolithes, les teneurs en calcium et en strontium augmentent.

Le strontium dissous dans l'eau peut également venir des activités anthropiques (notamment agricoles). Les compositions isotopiques d'engrais et de déjections animales ont été déterminées dans quelques cas (Négre, 1999 ; Widory et al., 2001, 2004, 2005, Klopman 2001, 2003, 2005 ; Vitoria et al., 2005) et utilisées comme co-traceur de la pollution azotée.

En somme, le strontium présent dans l'eau peut avoir plusieurs origines :

- Minéraux, interactions eaux-roches
- Eaux de pluie
- Apport anthropique (engrais, déjections animales)

3.5.3. Isotopes du bore (^{11}B , ^{10}B)

Le bore est un élément omniprésent dans l'eau, qui montre de très forts contrastes isotopiques dans le milieu naturel, ce qui lui confère un potentiel certain pour discriminer les sources de pollution. Les isotopes du bore ne sont pas fractionnés par les mêmes processus que l'azote, ce qui est un atout quant à l'identification des sources de pollution. En effet, le bore se distingue comme traceur par sa forte solubilité et l'absence d'effet isotopique de processus comme les réactions d'oxydo-réduction (ex. dénitrification).

Les isotopes du bore sont en revanche sensibles aux processus d'adsorption/désorption sur les argiles. Des polluants comme certains engrais minéraux ou organiques et les eaux usées domestiques se caractérisent par leur teneur en bore et leur composition isotopique particulière du bore (voir le résumé de Vengosh, 1998 et Vengosh *et al.*, 1999). Il a, en conséquence, été utilisé comme traceur dans le contexte de la caractérisation des pollutions agricoles (Komor, 1997; Leenhouts *et al.*, 1998; Kloppmann, 2003; Widory *et al.*, 2004; Widory *et al.*, 2005; Widory *et al.*, 2013; Kloppmann *et al.*, 2014; Kloppmann, 2015). La technique analytique est complexe et les isotopes du bore ne sont analysés que par un nombre très restreint de laboratoires.

3.5.4. Estimation des temps de résidence des eaux souterraines par les teneurs en CFCs et SF₆

Généralement connus sous le nom de Fréons, les CFCs sont des gaz de synthèse utilisés dès les années 1930 dans les applications de réfrigération (CFC-12), comme agents gonflants, dans les aérosols (CFC-11) et comme solvants pour le dégraissage (CFC-13). Après une évolution plutôt lente dans les années 50, les concentrations atmosphériques ont augmenté rapidement. À partir de 1990, avec l'application du protocole de Montréal, les concentrations atmosphériques des CFC ont commencé à stagner, puis à diminuer. Ces gaz se sont répandus à l'échelle de la planète, ils se dissolvent dans les eaux d'infiltration et sont ensuite isolés de l'atmosphère dans les nappes. À l'instar des CFCs, l'hexafluorure de soufre (SF₆) est un gaz industriel, plus persistant que les CFCs et moins soumis à des contaminations locales, et dont la courbe d'introduction dans l'atmosphère ne fléchit pas encore (Figure 18 et https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_sf6/ pour des valeurs actuelles).

Connaissant les courbes de l'introduction de ces gaz dans l'atmosphère, ainsi que leur solubilité dans l'eau, les concentrations mesurées dans une eau souterraine peuvent permettre de remonter, à l'aide de modèles analytiques (Figure 19), à l'instant où l'eau de recharge a atteint la nappe et ainsi estimer le temps de résidence moyen de l'eau dans la nappe (Figure 20). Ces estimations peuvent être perturbées par divers phénomènes, notamment la contamination par des sources locales ainsi que la biodégradation des traceurs, mais ces effets sont facilement identifiables en combinant plusieurs traceurs (Figure 19). Les modèles choisis de calcul « d'âge » doivent être adaptés au mode de recharge de la nappe. À titre d'exemple, une nappe libre avec une recharge homogène sur toute sa surface conduit à un mélange « d'âges » à un point de prélèvement (Figure 20). Ces « âges » représentent les temps de transfert de l'eau entre le point de recharge et le point de prélèvement sur une multitude de chemins. Un volume prélevé contient donc des molécules d'eau qui ont parcouru des distances très différentes et « l'âge » calculé est en fait un **temps de résidence moyen de l'eau dans la nappe en amont du point de prélèvement**.

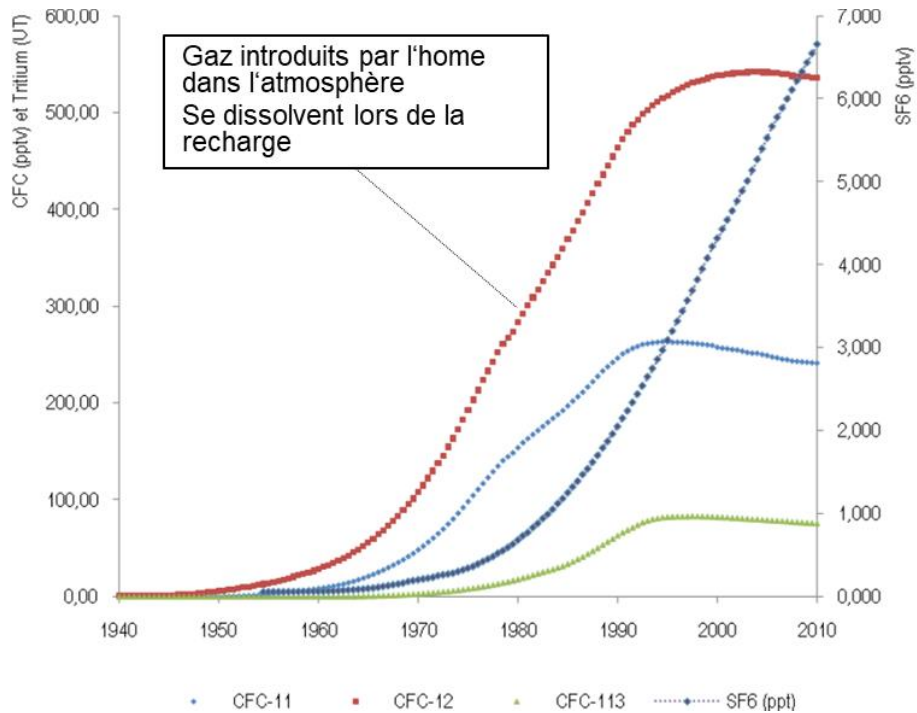


Figure 18 : Courbes des concentrations atmosphériques des gaz synthétiques CFC et SF₆ depuis leur première émission par l'homme.

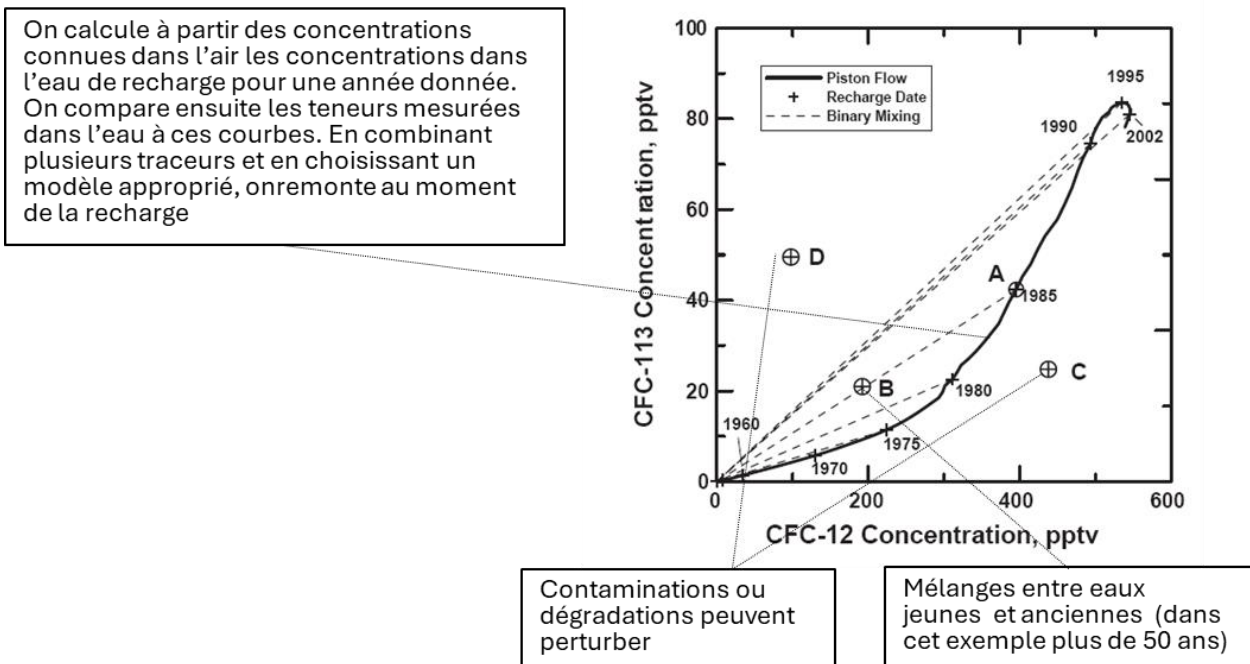


Figure 19 : Principe de l'estimation du temps de résidence à partir des teneurs en gaz atmosphériques (CFCs et SF₆)

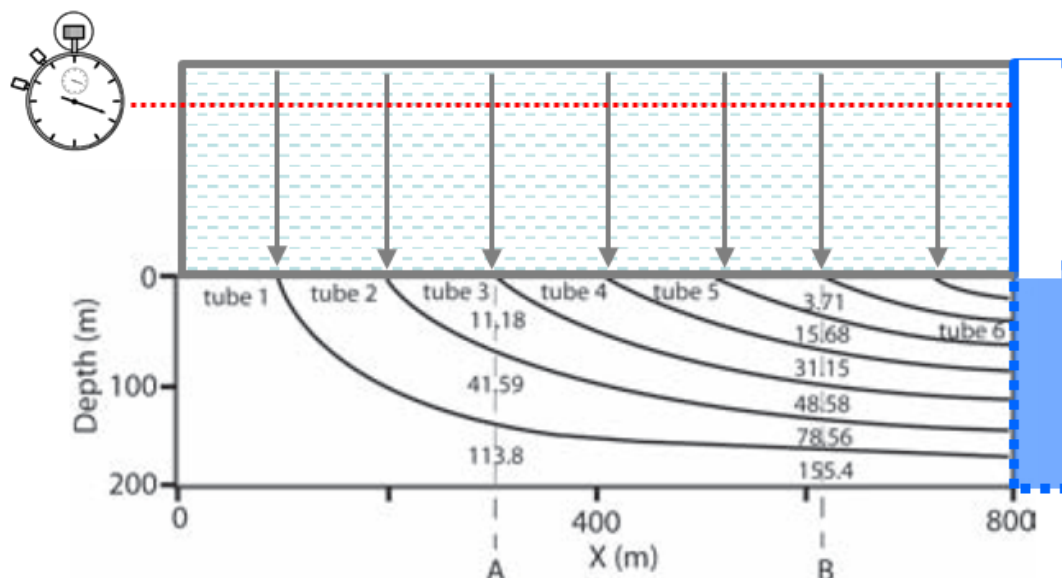


Figure 20 : Schéma d'un modèle de recharge correspondant à celui retenu pour la craie de la Somme : Recharge à travers une zone non saturée épaisse puis transfert par des cheminements plus ou moins longs jusqu'à l'ouvrage prélevé. Le « déclenchement du chronomètre » correspond au moment où l'eau d'infiltration est isolée de l'atmosphère.

3.6. METHODES ANALYTIQUES

Les **paramètres physico-chimiques** ont été déterminés sur le terrain par des méthodes potentiométriques (**Eh, O₂, pH, conductivité**).

Les concentrations des **espèces majeures** ont été déterminées par les méthodes standards suivantes :

- Dosage des cations (Ca, Fe, K, Mg, Na, Si, P) dans les eaux par ICP/AES séquentiel (spectrométrie d'émission atomique à plasma à couplage inductif) selon la norme NF EN ISO 11885
- Alcalinité TA/TAC exprimée HCO₃, CO₃ par potentiométrie selon la norme NF EN ISO 9963-1
- Dosage des anions (NO₃, SO₄, Cl, F) par chromatographie ionique (Dionex) selon la norme NF EN ISO 10304-1
- Détermination des nitrites, de l'azote ammoniacal et des orthophosphates par analyse colorimétrique par spectrophotométrie visible automatisée (méthode interne)
- Les **éléments traces** ont été analysés par ICP-MS selon la norme NF EN ISO 17294-2.
- Dosage du carbone inorganique dissous par détection Infra-Rouge (méthode interne)
- Dosage du carbone organique dissous et du carbone organique total par oxydation chimique au persulfate de sodium à chaud selon la norme NF EN 1484

On exprime les **rapports isotopiques** par la notation δ , qui représente, en parts pour mille, l'écart relatif des rapports isotopiques par rapport à un standard :

$$\delta = \left[\frac{R_{\text{échantillon}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right] \cdot 1000$$

où R est le rapport isotopique.

Les **isotopes du bore ($\delta^{11}\text{B}$)** sont mesurés par spectrométrie de masse par thermo-ionisation à source solide (TIMS) sur un Finnigan MAT 261. Une préparation préalable est nécessaire pour transformer le bore sous forme d'ion Cs_2BO_2^+ , la procédure utilisée dans le laboratoire du BRGM est celle de Mossadik (1997). Les valeurs sont reportées sous forme d'unité delta par rapport au standard NBS-951 (acide borique) distribué par le NBS (National Bureau of Standards).

Les **isotopes du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)** sont également mesurés par spectrométrie de masse par thermo-ionisation à source solide (TIMS) sur un Finnigan MAT 262. L'analyse se fait sur mono-filament au W, les mesures sont comparées au standard NBS 987 (valeur certifiée de 0,710240). L'erreur interne est donnée à 2σ entre 0,000007 et 0,000009. La valeur obtenue sur 63 déterminations du standard NBS987 analysé durant la période des mesures est de $0,710248 \pm 10 (2\sigma)$.

Les **gaz CFCs, SF_6** ont été analysés au Spurenstofflabor du Dr. Oster à Wachenheim, Allemagne, par chromatographie gazeuse avec détection par capture d'électrons (Oster *et al.*, 1996).

4. Résultats

4.1. LES SUIVIS CONTINUS

Quatre années de suivi continu ont été acquises sur quatre forages durant le projet. Ces données sont comparées avec les suivis continus des piézomètres de Rieulay (craie captive, BSS000CSUH) et d'Abscon (craie libre, BSS000CSUK). Les Figure 21 et Figure 22 montrent la localisation des points de suivi et l'ensemble des données de suivis.

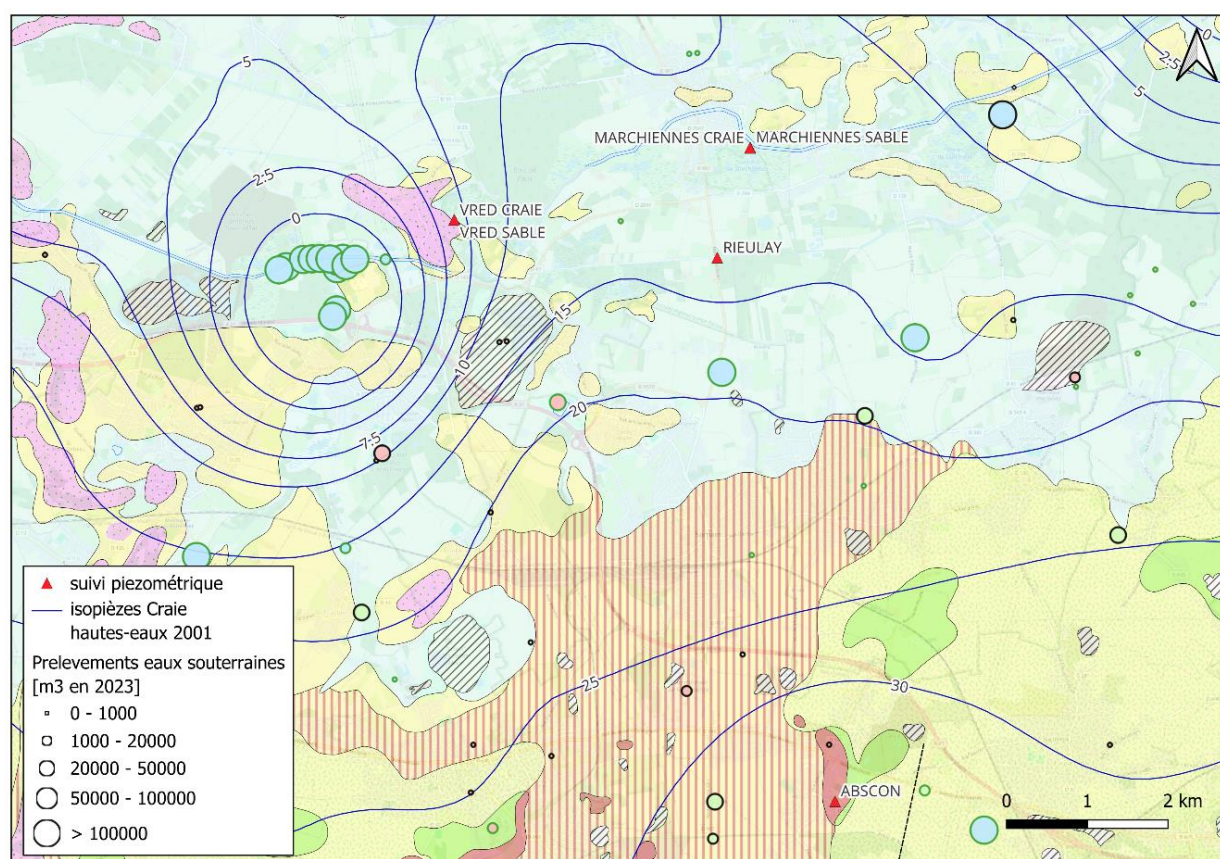


Figure 21 : Localisation des points de suivis piézométriques sur une carte piézométrique à la craie (hautes-eaux 2001) et des pompages annuels (2023, cf. Figure 10 pour la légende complète sur les pompages). Les prélèvements et la dépression piézométrique visibles au Nord-Ouest correspondent au champ captant de Pecquencourt et à son cône de rabattement.

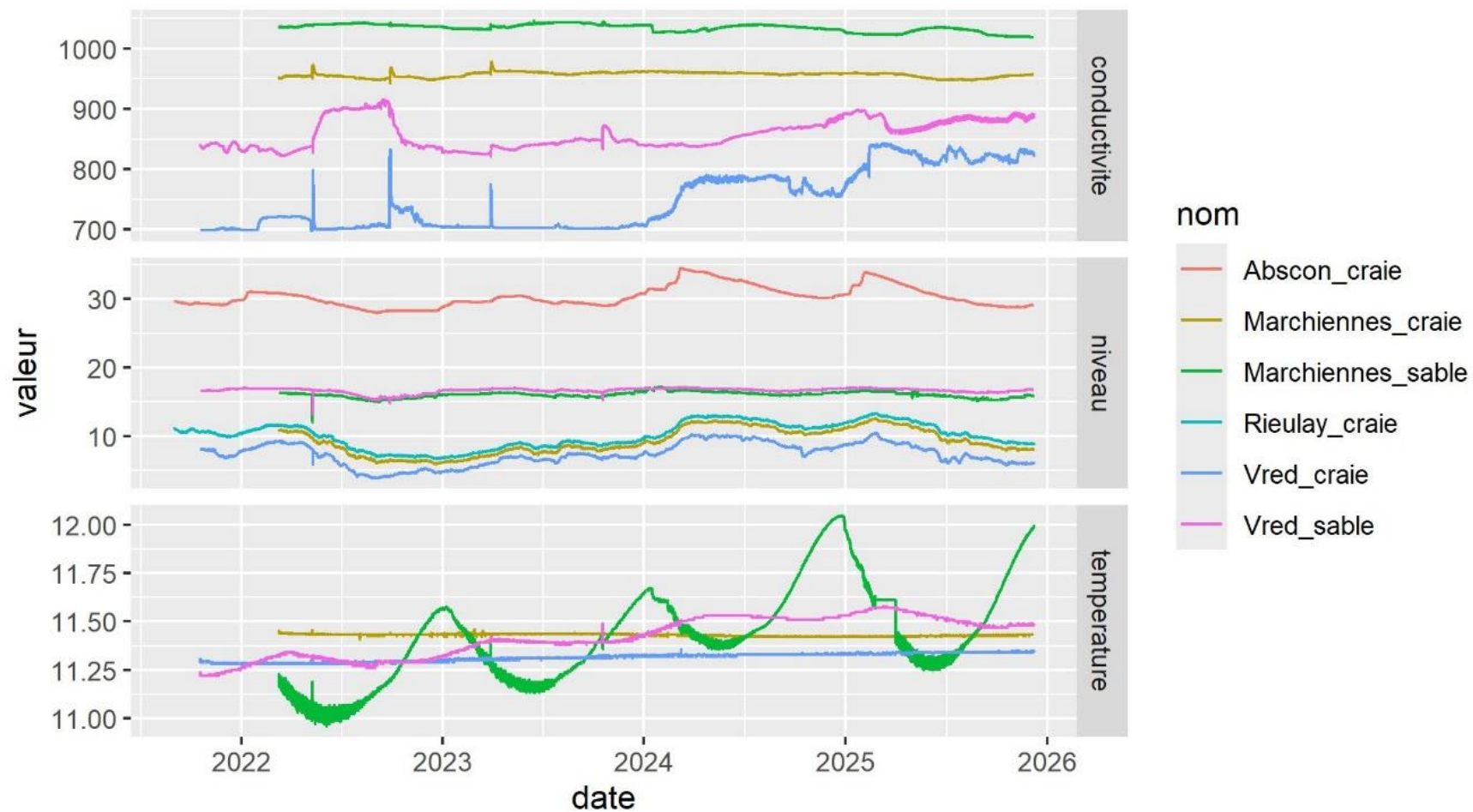


Figure 22 : Suivis continus de cette étude et suivis piézométriques de Rieulay ([BSS000CSUH](#)) et d’Abscon ([BSS000CSUK](#)). Conductivité en $\mu\text{S/cm}$, niveau en m NGF et température en $^{\circ}\text{C}$.

4.2. LES ISOTOPES

Tableau 3 : Résultats des analyses isotopiques de l'hydrogène et de l'oxygène de la molécule d'eau, du bore et du strontium (erreur $\delta^{18}\text{O}$ vs SMOW 0.1‰ ; erreur δD vs SMOW 1.5‰).

nom	date	δD vs SMOW	$\delta^{18}\text{O}$ vs SMOW	$\delta^{11}\text{B}$ en ‰	\pm 2s(m) (‰)	$\delta^{11}\text{B}$ en ‰	\pm 2s(m) (‰)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2s(m)
M_canal	09/05/2022	-46.2	-7.1	8.17	0.05	8.01	0.05	0.708181	0.000008
M_craie	09/05/2022	-46.8	-7.5	-4.25	0.05	-4.26	0.05	0.707708	0.000008
M_L1	09/05/2022	-26.4	-3.8	17.99	0.05	17.78	0.09	0.708493	0.000009
M_sable	09/05/2022	-47.3	-6.8	-17.83	0.06	-17.49	0.05	0.707764	0.000009
P9N	10/05/2022	-41.8	-7.3	-1	0.06	-1.06	0.05	0.707709	0.000006
V_craie	10/05/2022	-44.3	-7.5	-11.47	0.06	-11.14	0.04	0.707719	0.000005
V_L3	10/05/2022	-24.7	-2.9	20.87	0.08	21.03	0.2	0.70845	0.000007
V_sable	10/05/2022	-48.1	-7.3	-8.05	0.12	-7.73	0.14	0.707858	0.000009
P102	11/05/2022	-46.4	-7	6.22	0.04	6.07	0.05	0.708676	0.000007
P103	11/05/2022	-43.3	-6.5	-3.9	0.1	-3.63	0.06	0.707872	0.000008
PZ3	11/05/2022	-48.4	-7.8	25.22	0.22	25.12	0.07	0.708731	0.000008
Wacheux	11/05/2022	-32.2	-3.4	21.78	0.23	21.87	0.19	0.708472	0.000007
P100	12/05/2022	-52.5	-7.8	6.86	0.05	7.14	0.06	0.709477	0.000008
M_canal	26/09/2022	-43.2	-6.9	9.42	0.06	9.69	0.06	0.708175	0.000008
V_craie	26/09/2022	-46.8	-7.5						
V_sable	26/09/2022	-46.8	-7.4	-8.17	0.1	-8.56	0.22	0.707866	0.000007
M_craie	27/09/2022	-47.7	-7.5						
M_sable	27/09/2022	-44.8	-7	-15.25	0.85	-15.5	0.39	0.707745	0.000009
P9N	27/09/2022	-46.9	-7.5						
P102	27/03/2023	-46.5	-6.9	7.18	0.09	7.07	0.1	0.708636	0.000007
P103	27/03/2023	-38.5	-6.5	-4.56	0.06	-4.98	0.06	0.707851	0.000009
Wacheux	27/03/2023	-36.7	-5.9						
Terril	28/03/2023	-44.3	-6.7	15.18	0.06	14.99	0.09	0.708541	0.000008
V_craie	28/03/2023	-45.3	-7.4						
V_L3	28/03/2023	-35.6	-5.6	15.16	0.05	14.76	0.05	0.708479	0.000007
V_sable	28/03/2023	-45.1	-7.3						
M_canal	29/03/2023	-44.3	-7.1						
M_craie	29/03/2023	-47.4	-7.6						
M_L1	29/03/2023	-37.9	-5.6	17.79	0.11	17.94	0.1	0.708475	0.000008
M_sable	29/03/2023	-44.7	-7						

5. Discussion

5.1. LES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES

Les quatre années de suivi continu permettent d'analyser les gradients au sein des nappes de la craie et des sables, ainsi que des gradients entre les différents compartiments.

Gradient dans la craie captive

Les quatre années de suivi piézométrique à Marchiennes, à Vred et à Rieulay permettent d'apprécier la dynamique de la craie captive. Sur cette période, la cote piézométrique de la craie captive varie entre 4 et 13 m NGF avec une faible variation saisonnière et une très forte corrélation spatiale (Figure 22). Les chroniques temporelles à Marchiennes et Rieulay sont quasiment superposables, hormis un niveau en moyenne plus bas de $0,8 \text{ m} \pm 0,1 \text{ m}$ NGF à Marchiennes.

À Vred, le niveau piézométrique est plus bas et plus variable (en moyenne $-2,7 \pm 0,6 \text{ m}$ NGF par rapport à Rieulay) du fait de sa proximité avec les captages d'alimentation en eau potable de Pecquencourt. En effet, le forage à la craie de Vred est situé à 1km du captage le plus à l'Est et à 2,3km du captage le plus à l'Ouest. Le forage de Vred est donc dans le cône de rabattement formé par le champ captant de Pecquencourt et son niveau varie selon les arrêts et démarrages de pompage sur les différents forages du champ captant.

Le gradient hydraulique estimé à partir de ces trois points est d'environ 0,5 pour mille et montre clairement des écoulements en direction des captages de Pecquencourt.

Gradients dans la nappe des Sables

Les niveaux piézométriques de la nappe des sables ([BSS004CFVQ](#), [BSS004CFVX](#)) sont comparés aux niveaux d'eau enregistrés dans les tourbières : eaux de surface ou eau dans des piézomètres peu profonds (<5 m). Les suivis sur la période commune (Figure 23 et Figure 24) montrent que, sur chacun des sites, les niveaux sont très similaires et les dynamiques parfaitement corrélées. Cela indique qu'une connexion hydraulique existe entre ces points et que, au droit de chacune des tourbières, la nappe des sables peut être considérée continue depuis les sables thanétiens (>10 m) jusqu'aux tourbes proches de la surface, le tout en connexion avec les eaux de surface de la tourbière.

Une comparaison avec les piézomètres P100, P102 et P103 suivis par le Parc (pas de temps mensuel) montre également une dynamique similaire à l'échelle annuelle. Mais le pas de temps d'acquisition de ces points ne permet pas d'analyser plus finement la comparaison avec nos données.

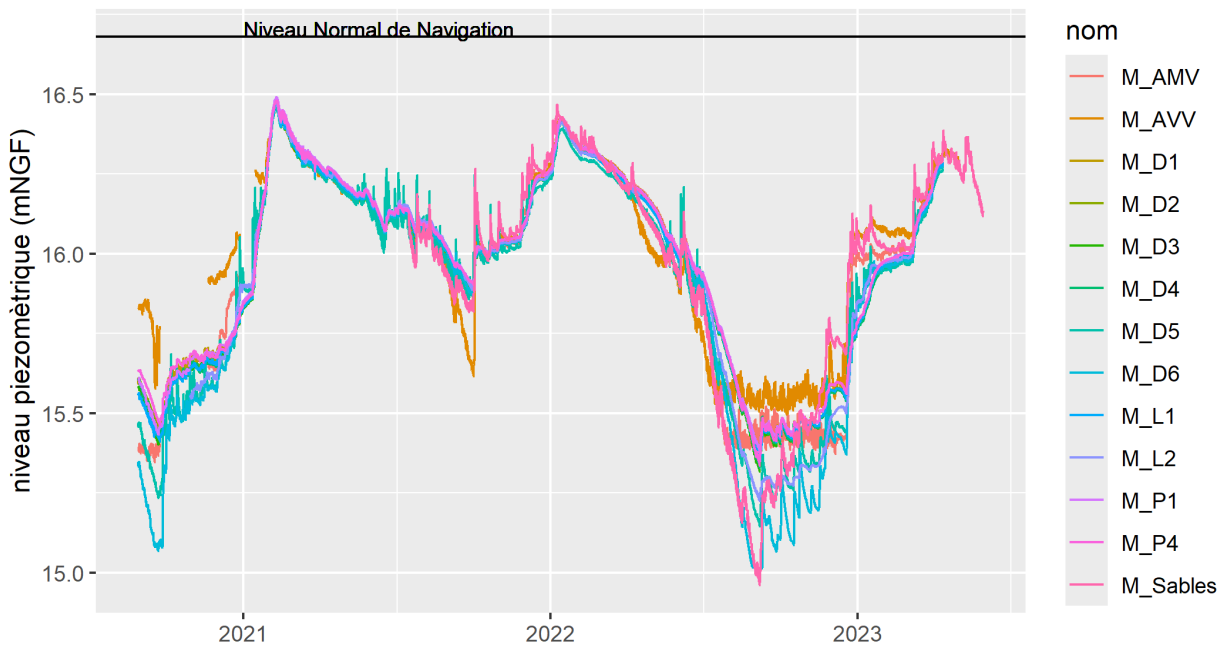


Figure 23 : Suivi des niveaux d'eau dans la tourbière de Marchiennes et comparaison avec le suivi piézométrique de la nappe des sables au droit de la tourbière. Le niveau normal de navigation du canal de la Scarpe à proximité de la tourbière est indiqué pour mémoire.

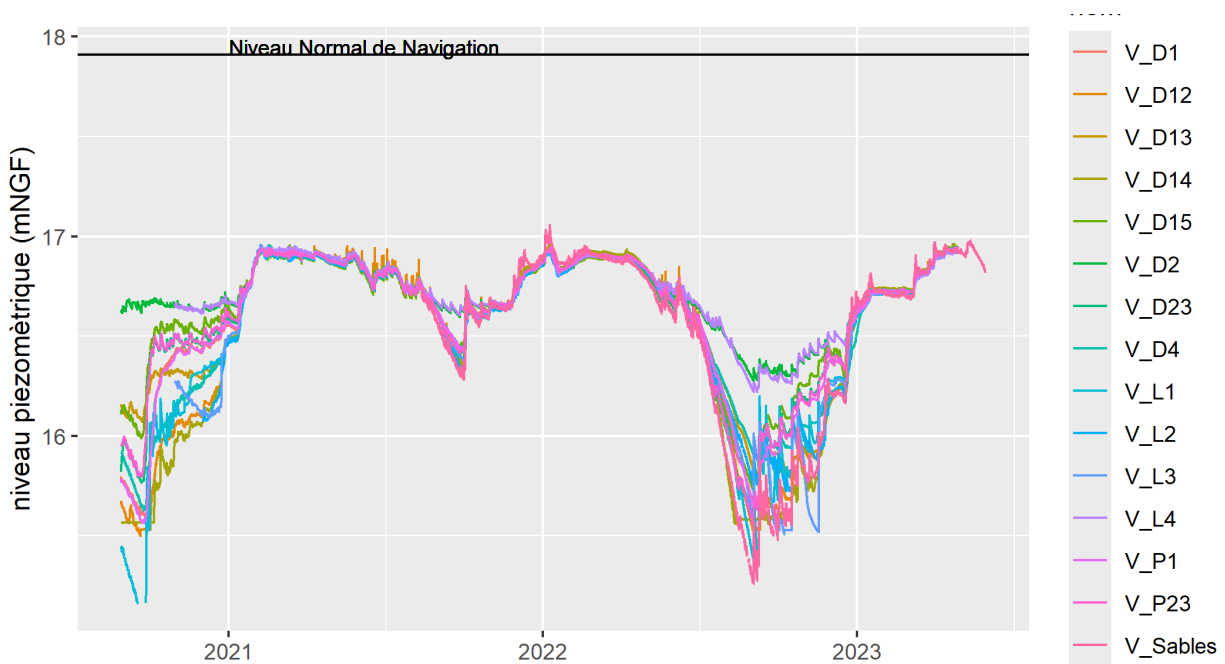


Figure 24 : Suivi des niveaux d'eau dans la tourbière de Vred et comparaison avec le suivi piézométrique de la nappe des sables au droit de la tourbière. Le niveau normal de navigation du canal de la Scarpe à proximité de la tourbière est indiqué pour mémoire.

Notons que le canal de la Scarpe est au-dessus de ces niveaux et déconnecté de la dynamique de cette nappe des sables.

À partir des niveaux des deux forages aux sables ([BSS004CFVQ](#), [BSS004CFVX](#)) distants de 3 774 m, un gradient hydraulique entre Vred et Marchiennes peut être estimé : environ 0,4 pour mille dans le sens de Vred vers Marchiennes. Notons qu'il faudrait un troisième point de mesure pour établir le véritable gradient de la nappe des sables et sa direction d'écoulement.

Gradient entre les nappes des Sables et de la craie

On remarque l'indépendance très nette entre les variations piézométriques de la nappe des sables et celles de la nappe de la craie mise en captivité sous les argiles de Louvil (Figure 22).

Le gradient hydraulique vertical entre les nappes des Sables de la craie, toujours orienté vers le bas, varie entre 4 et 10 m à Marchiennes et entre 7 et 12 mètres à Vred (Figure 25). Le gradient hydraulique est plus important de 2 à 3 m à Vred, du fait, au moins en partie, de la baisse du niveau piézométrique de la craie à Vred en lien avec le cône de rabattement du champ captant de Pecquencourt.



Figure 25 : Gradients hydrauliques verticaux entre la nappe des sables et la nappe de la craie au droit des doublets de piézomètres de Vred et de Marchiennes.

5.2. LA GEOCHIMIE

La composition chimique d'une eau est en partie déterminée par son environnement naturel (composition des eaux de recharge, activité biologique et interactions au sein de la zone non saturée, échanges avec l'aquifère) mais reflète également l'impact anthropique. La chimie donne une indication quant à l'ampleur du phénomène de pollution ainsi que sur les caractéristiques du milieu et peut ainsi apporter des contraintes aux mécanismes mis en jeu. Le diagramme de Piper permet de visualiser, indépendamment des concentrations absolues, le faciès chimique prédominant d'une eau, sur la base des rapports entre cations (triangle de gauche), entre anions (triangle de droite). Le losange combine anions et cations et permet de séparer des faciès typiques de certains types d'aquifères et certaines pollutions, comme la salinisation ou la contamination par les nitrates.

Les analyses géochimiques réalisées pour cette étude sont synthétisées sur le diagramme de Piper (Figure 26). Dans un diagramme de Piper, les concentrations des anions et des cations sont représentées dans deux diagrammes ternaires en bas à gauche et en bas à droite respectivement. Les sommets du diagramme ternaire des anions sont le sulfate, le chlorure et le carbonate plus l'hydrogénocarbonate. Les sommets du diagramme ternaire des cations sont le magnésium, le calcium et le sodium plus le potassium. Les deux diagrammes ternaires sont projetés dans un troisième diagramme en forme de losange. Chaque échantillon d'eau est représenté par un point dans chacun des trois diagrammes indiquant la dominance de ces ions dans l'eau. Ainsi, l'emplacement des points à l'intérieur des zones fournit des informations détaillées sur la composition des eaux.

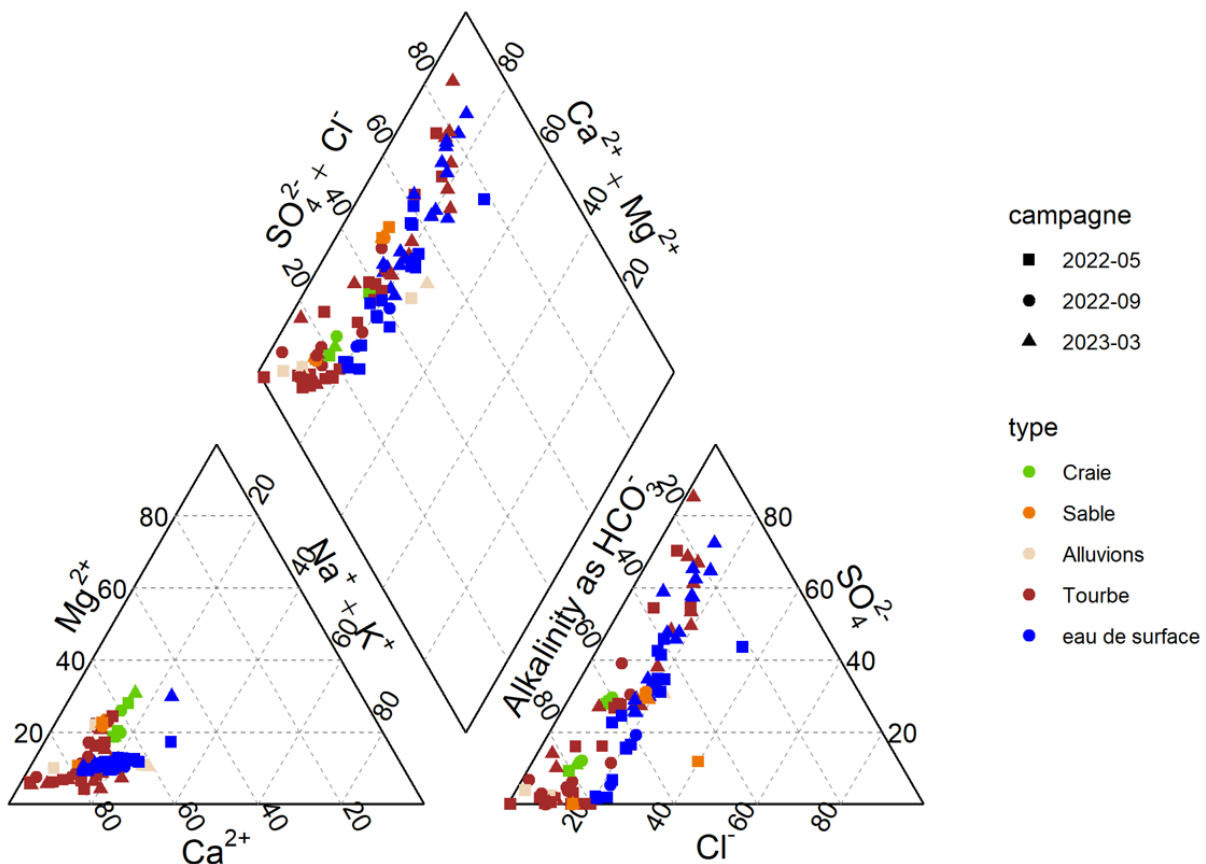


Figure 26 : Diagramme de Piper de l'ensemble des prélèvements d'eau.

Les eaux s'étendent d'un pôle bicarbonaté calcique, typique pour des aquifères carbonatés, à un pôle plus sulfaté-calcique (Figure 27). Ce deuxième pôle correspond plutôt à des eaux prélevées dans les eaux superficielles ou les tourbes. Les **concentrations en sulfates sont particulièrement élevées dans la tourbière de Vred**. Cette pollution aux sulfates est à mettre en relation avec la présence de déversoirs d'orage en bordure de tourbière. Le prélèvement à l'aval du terril de Rieulay montre également des concentrations non négligeables en sulfate, cette fois à mettre en relation avec le drainage du terril constitué de roches contenant du soufre (par exemple les schistes et les débris de charbon). Ces enrichissements en sulfates (issus du terril ou issus des eaux usées) s'accompagnent d'un cortège d'éléments traces.

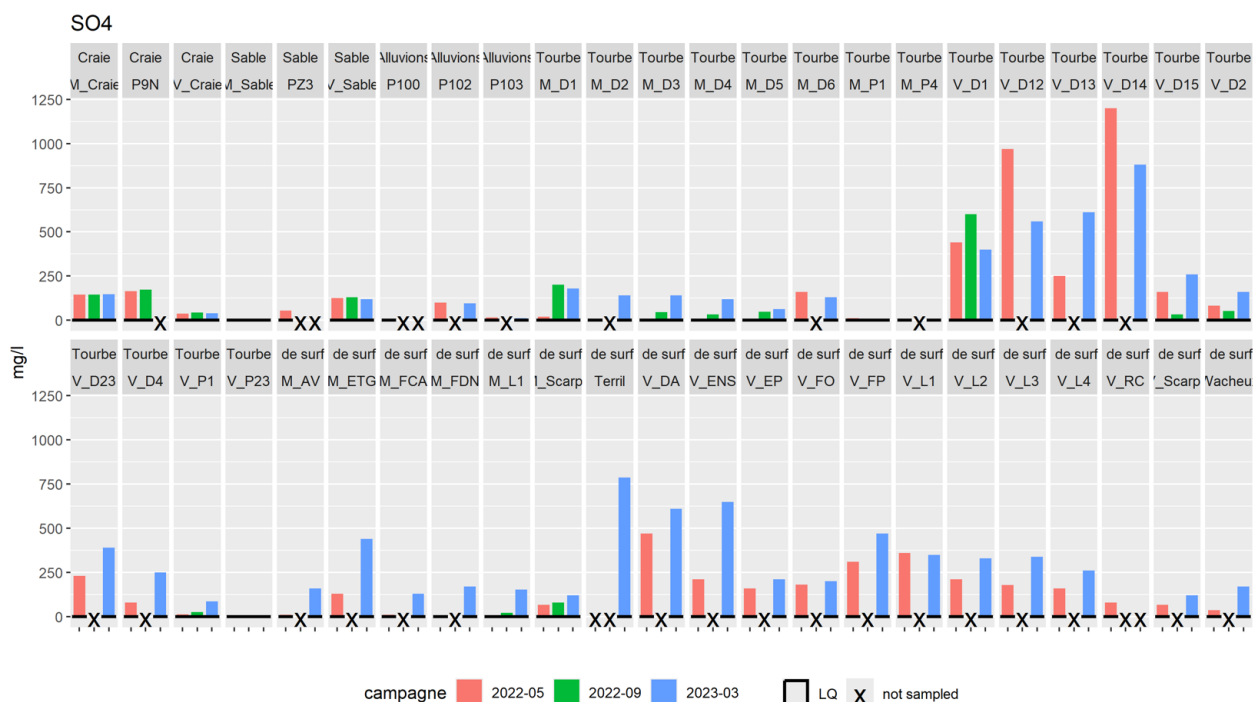


Figure 27 : Concentrations en sulfates mesurées durant les 3 campagnes. Les noms des points d'échantillonnage commencent par un M pour Marchiennes et un V pour Vred. La droite noire indique la limite de quantification (LQ) ; les croix indiquent des prélèvements non effectués.

Contrairement aux tourbières acides dont les eaux ont des pH inférieurs à 5, les tourbières de Vred et de Marchiennes sont des tourbières alcalines, c'est-à-dire dominées par une végétation se développant à des pH entre 6 et 8,5. Pour cela, elles sont typiquement alimentées par des eaux souterraines riches en carbonates permettant de neutraliser l'acidité. Ces tourbières alcalines sont présentes en Hauts-de-France en lien avec l'importance que joue la nappe de la Craie dans les hydrosystèmes (Cateau et al., 2017).

Pour ce qui concerne les cations majeurs (Na, K, Ca et Mg), le diagramme de Piper (Figure 26) montre une **différenciation selon l'origine des eaux** (craie, sable, alluvions, tourbes, eaux de surface) même si la chimie de la nappe des sables et de la nappe de la craie montre une certaine similitude. De façon plus fine, on peut analyser les cations majeurs selon ceux plutôt issus de la dissolution des carbonates (Ca et Mg) et ceux avec une autre origine (Na et K). Ainsi, un diagramme binaire des ratios des concentrations molaires Ca/Mg en fonction de K/Na (Figure 28) montre des points séparés selon l'origine des eaux avec toujours une **similitude entre Craie et Sable**.

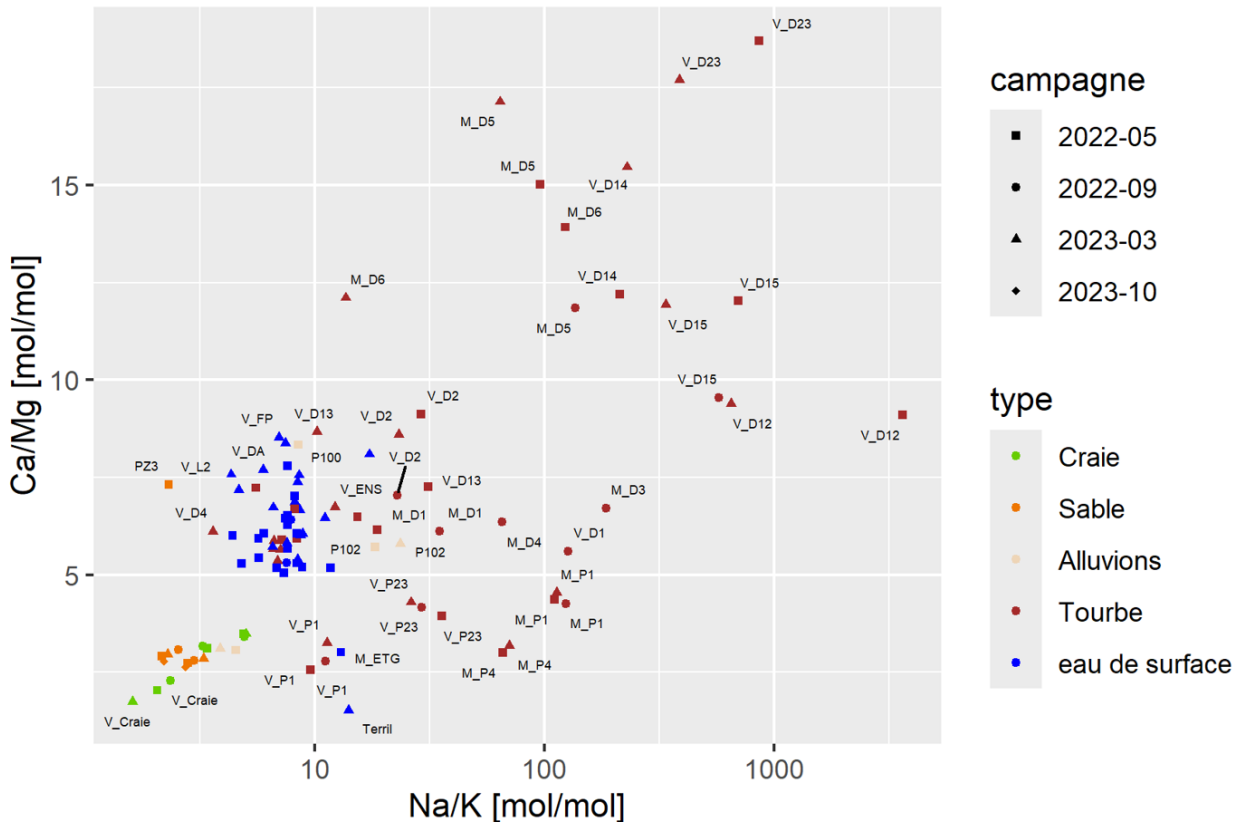


Figure 28 : Diagramme binaire des ratios des concentrations molaires des cations majeurs : calcium sur magnésium en fonction de sodium sur potassium. Notez l'échelle logarithmique de l'axe des abscisses.

En ce qui concerne les éléments traces, les concentrations sont variables. L'anomalie la plus notable concerne le forage PZ3 ([BSS000CFMY](#), cf. carte Figure 15) avec des concentrations élevées en plomb (333 µg/L) et en nickel (33,7 µg/L) observées durant la première campagne. De telles concentrations indiquant une contamination, ce point de prélèvement sera écarté des campagnes suivantes de prélèvements car il ne peut pas être considéré comme représentatif de l'aquifère des sables thanétiens.

Différents métaux lourds ont été retrouvés dans les eaux du canal de la Scarpe, reliquats des contaminations issues des anciens sites métallurgiques du Nord de la France, particulièrement étudiées à la suite des dragages et stockages des sédiments contaminés (Lions, 2004)).

Certains métaux sont également retrouvés dans les eaux « terril », parfaitement en accord avec des eaux impactées par le drainage du terril de Rieulay.

Certains points de prélèvements de la tourbière de Vred présentent des concentrations non négligeables en métaux lourds (Zn, Ni, Cu).

Ces **contaminations par des activités anthropiques** remontent potentiellement à plusieurs décennies. Pour plus de détails, les cartographies des concentrations en métaux relevées durant les campagnes de prélèvements sont consignées en annexe.

Apports de la géochimie (éléments majeurs, mineurs et traces)

- Les eaux souterraines présentent majoritairement un faciès bicarbonaté calcique tandis que les eaux de surface et les tourbières ont un faciès plutôt sulfaté-calcique.
- Une anomalie en sulfates est observée pour la tourbière de Vred, probablement liée aux infrastructures adjacentes (déversoirs d'orage, terril du Rieulay).
- Les concentrations en métaux lourds suggèrent des contaminations liées aux activités anthropiques passées.

5.3. L'ESTIMATION DES TEMPS DE RESIDENCE

L'estimation des temps de résidence ou datation a été réalisée sur les 4 nouveaux forages (Communes de Vred et Marchiennes, aquifères de la craie et des Sables) en hautes eaux et en basses eaux 2022. Les résultats de la datation des eaux acquis dans ce projet sont présentés sur la Figure 29.

Toutes les données montrent une **forte composante d'eaux qui se sont infiltrées il y a plus de 50 ans, quel que soit le modèle**. Un tel âge des eaux est en accord avec l'absence de toutes contaminations des eaux (par ex. des nitrates).

Les quelques écarts observés, en particulier sur les SF₆, pourraient refléter un effet d'excès d'air : lors de l'infiltration dans la zone non saturée, des bulles de gaz peuvent être dissoutes complètement dans l'eau qui s'infiltré, entraînant un excès de gaz dissous par rapport à un simple équilibre eau-gaz. C'est le SF₆ qui est particulièrement sensible à cet effet. Aucune différence ne peut être mise en évidence ni entre les hautes eaux et les basses eaux, ni entre les communes de Vred et Marchiennes, ni entre les nappes des Sables et de la craie.

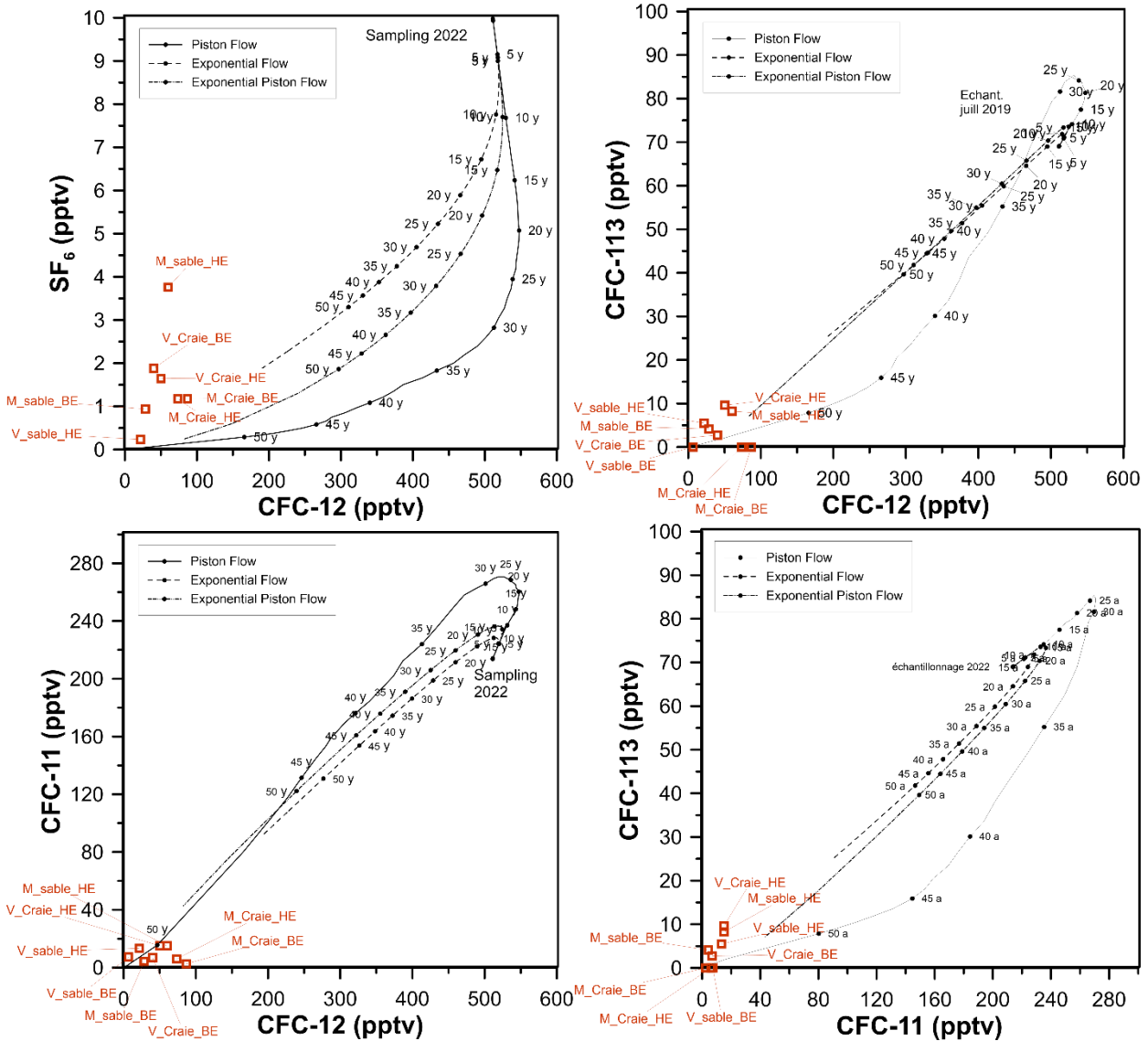


Figure 29 : Résultats de datation des eaux dans les doublets sable/ craie au droit de Marchiennes et de Vred prélevés en hautes eaux 2022. Les trois modèles correspondent à différents modes de recharge et de contextes hydrogéologiques.

Apports de l'estimation des temps de résidence :

- La datation des eaux souterraines (nappe de la craie et nappe des sables) montre la présence d'une eau « ancienne », dont la recharge est supérieure à 50 ans.
- Aucune différence n'a été observée entre les hautes-eaux et les basses-eaux.

5.4. LES ISOTOPES STABLES DE LA MOLECULE D'EAU

Les résultats acquis durant cette étude sont présentés sur le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Les valeurs sont comparées (Figure 30) à la Droite Météoritique Mondiale (DMM) et à une Droite Météoritique Locale (DML) recalculée à Fontainebleau à partir des données de G. Bowen (WaterIsotopes.org <https://wateriso.utah.edu/waterisotopes/index.html>)

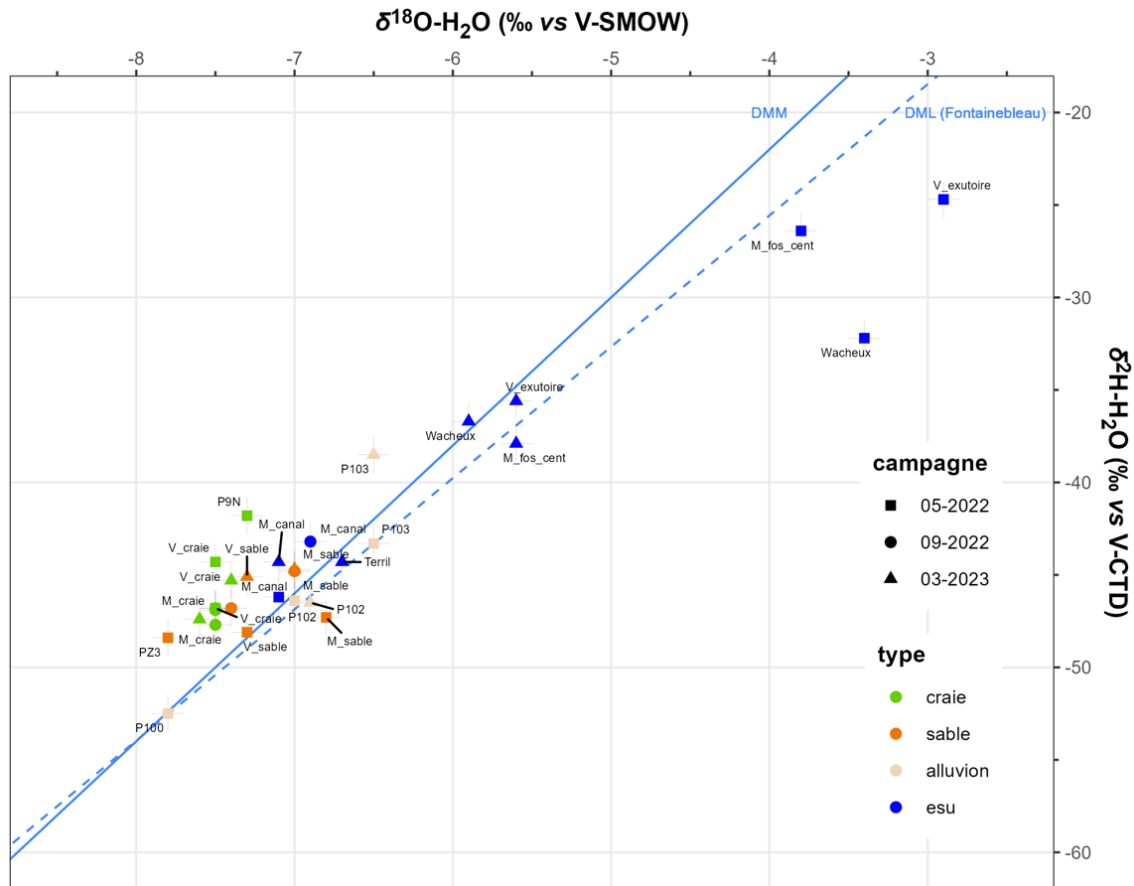
Les variations dans la composition des isotopes stables de l'eau au sein d'un système aquifère peuvent être causées notamment par (1) des variations naturelles de la composition isotopique des eaux de pluie, (2) des mélanges avec des eaux plus anciennes, et (3) les processus d'évaporation (Guglielmi *et al.*, 1998; Huddart *et al.*, 1999; Hunt *et al.*, 1998; Kendall *et al.*, 1998).

L'ensemble des eaux souterraines forme un pôle homogène, avec des valeurs en $\delta^{18}\text{O}$ comprises entre -7,8 et -6,5 ‰. **Les eaux de la craie montrent une valeur moyenne légèrement plus appauvrie que celles de la nappe des sables et des alluvions** ($\delta^{18}\text{O}_{\text{moyen craie}} = -7,48$ ‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{moyen sables}} = -7,23$ ‰ et $\delta^{18}\text{O}_{\text{moyen alluvions}} = -6,94$ ‰).

Les eaux de surface montrent quant à elles les valeurs les plus enrichies et dispersées en $\delta^{18}\text{O}$, allant de -7,1 ‰ pour la Scarpe en mars/avril, jusqu'à -3 ‰ en fin d'été pour l'exutoire de la tourbière de Vred et l'eau de surface à Wacheux. Les compositions isotopiques pour les eaux de surface qui s'écartent des droites météoriques (en particulier dans les tourbières et dans le Wacheux) correspondent aux **points qui ont subi une évaporation**, ce qui a conduit à un enrichissement des eaux en isotopes lourds. Les processus d'évaporation observés pour les eaux de surface sont normaux pour une tourbière.

La signature isotopique de la Scarpe au niveau de Marchiennes ne semble pas varier lors des différentes campagnes, avec une valeur de $\delta^{18}\text{O} = -7,1$ ‰. Le canal ne montre pas de fractionnement isotopique lié à l'évaporation car les volumes d'eau sont significativement plus importants que les autres eaux de surface. À noter que cette valeur du canal est proche de celle observée dans les eaux souterraines.

D'après la carte de Millot *et al.*, 2010 (Figure 31), la signature moyenne des précipitations dans la région est proche de -7 à -6,5 ‰ en $\delta^{18}\text{O}$. La signature des eaux de la nappe des alluvions se rapproche de cette valeur, pouvant traduire une recharge influencée par les précipitations locales. À l'inverse, la signature isotopique plus appauvrie de l'eau de la nappe de la craie sous captivité sous-tend une recharge plus ancienne, en accord avec les résultats obtenus par les CFC/SF₆.



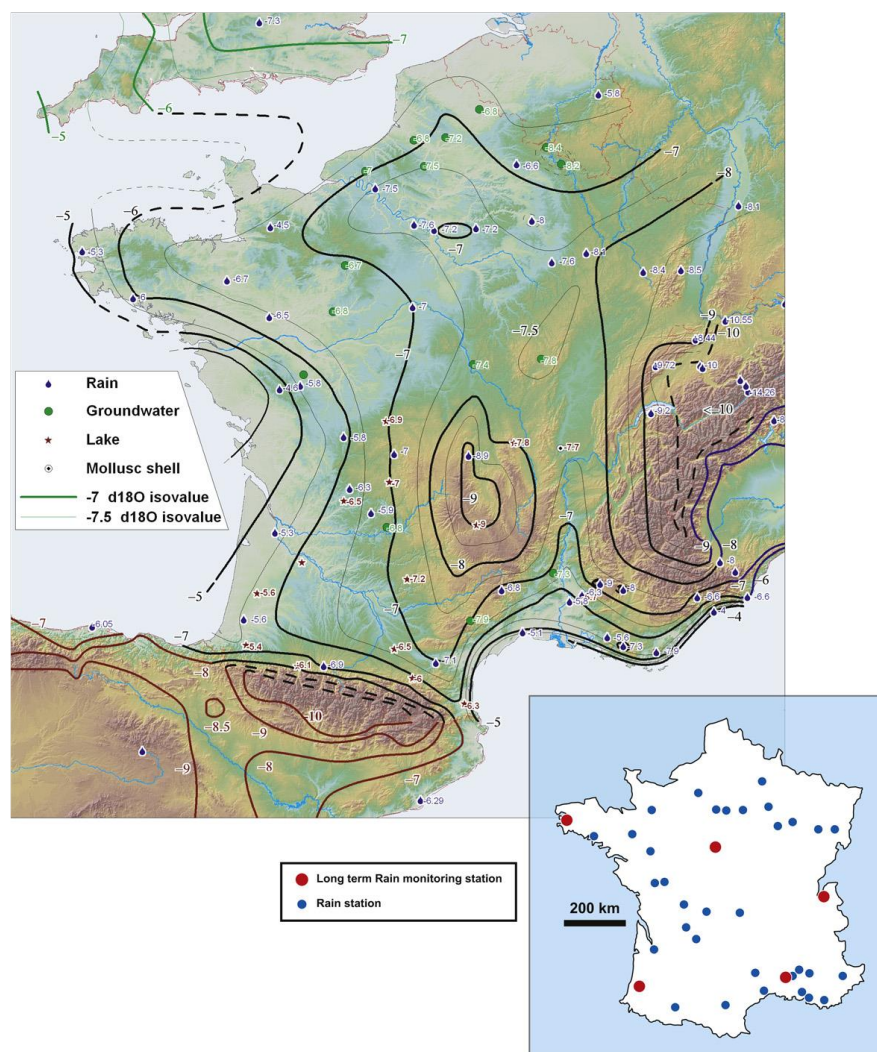


Figure 31 : (Millot et al., 2010) Iso valeurs de la composition isotopique moyenne annuelle de l'oxygène ($\delta^{18}O$) de l'eau de pluie en France. Cette carte s'appuie sur des données relatives à l'eau de pluie, aux eaux souterraines, aux lacs (corrigées pour tenir compte de l'évaporation) et aux coquilles d'escargots terrestres. L'emplacement des stations de prélèvement d'eau de pluie pour le $\delta^{18}O$ par rapport au δD est également indiqué sur cette carte (bleu : surveillance à court terme ; rouge : surveillance à long terme).

Apports des isotopes stables de la molécule d'eau

- Les valeurs observées dans les eaux souterraines correspondent à la pluie efficace avec un effet de la continentalité de la recharge attendu pour le bassin de la Scarpe.
- Les valeurs observées dans les eaux de surface sont quant à elles plus variables en lien avec des effets d'évaporation, parfaitement cohérents avec le fonctionnement des tourbières.
- Les eaux de la nappe de la craie ont une signature isotopique légèrement plus appauvrie que celle des eaux de la nappe des sables.

5.5. LES ISOTOPES DU STRONTIUM

Les résultats des analyses isotopiques du strontium permettent d'apprécier le degré d'interaction eau-roche et la nature lithologique de l'aquifère avec lequel l'eau interagit. Dans le contexte de l'étude, les eaux ayant été en contact avec la craie devraient se caractériser par un rapport isotopique typique des carbonates marins crétacés. D'autre part, le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ du strontium des argiles de Louvil devrait être beaucoup plus élevé.

En effet, la composition isotopique de la base des sables d'Ostricourt prélevés dans la carrière de Templeuve (présence d'argile yprésienne sus-jacente) révèle un rapport isotopique du strontium à 0,70886 (Cary *et al.*, 2014).

La dissolution des carbonates entraîne la libération de calcium, de magnésium et de strontium dans les eaux. Le rapport Ca/Sr est un indicateur utilisé en géochimie pour évaluer les interactions eau-roches. Ce ratio va évoluer en fonction du temps de résidence dans l'aquifère. Lorsque les précipitations s'infiltrent, l'eau devient rapidement saturée en Ca^{2+} . A mesure que l'eau interagit avec la matrice, la quantité de strontium dissous augmente, diminuant de fait le rapport Ca/Sr. Une eau ancienne, captive, ayant eu le temps d'interagir avec la matrice crayeuse, aura un rapport Ca/Sr inférieur à une eau « jeune », venant de s'infiltrer.

La Figure 32 montre le rapport isotopique du strontium, en fonction du rapport Ca/Sr. La gamme de signatures isotopiques s'étend de 0,707708 pour M_{craie} à 0,709477 pour P100. Les rapports Ca/Sr montrent également une **forte variabilité**, allant de 84 pour V_{craie} à 1003 pour Pz3. Les valeurs mesurées entre les deux campagnes de prélèvements sont cohérentes et aucune variation significative n'a été observée.

Les eaux de **la craie présentent un pôle proche de 0,7077, cohérent avec les signatures de la craie séno-turonienne locale** (Cary *et al.*, 2014) et régionale (Burke *et al.*, 1982; Edmunds *et al.*, 1987). Le rapport Ca/Sr des eaux de la craie est appauvrie, en cohérence avec un **temps de résidence long**. Les forages aux sables V_{sable} et M_{sable} présentent **également des signatures et des ratios comparables à ceux de la craie**, bien que les deux masses d'eaux soient séparées par une couche d'argiles de Louvil. A noter également que le forage P103, forage peu profond situé dans la tourbière de Marchiennes, présente les mêmes caractéristiques, bien que considéré dans les alluvions.

Les forages P102 (alluvions) et Pz3 montre des ratios et des signatures isotopiques enrichies ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ proche de 0,7087). Ces valeurs peuvent être expliquée par un temps de résidence potentiellement plus court (plus forte influence des précipitations dans la composition isotopique), mais également par de possibles interactions avec les sables d'Ostricourt, ayant une signature isotopique proche de 0,70886 (Cary *et al.*, 2014).

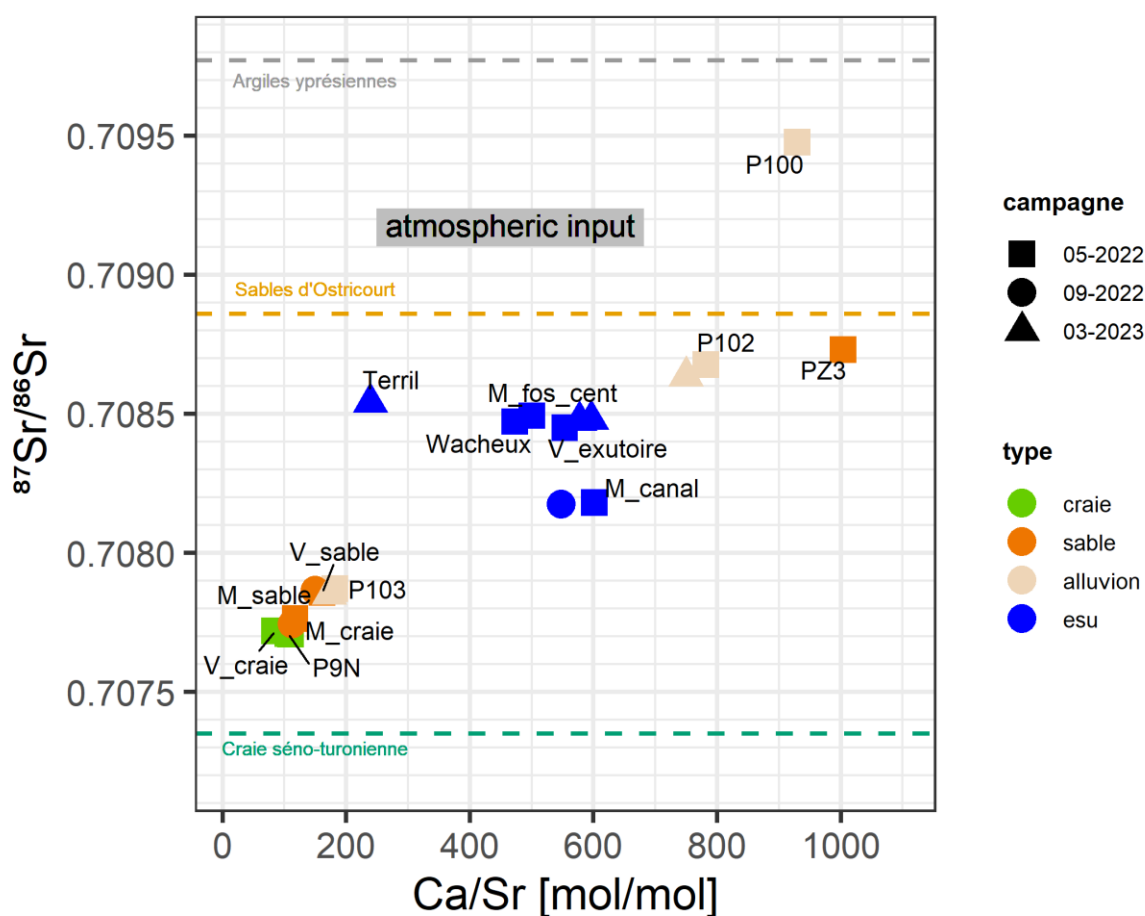


Figure 32 : Rapport isotopiques du strontium en fonction du rapport Ca/Sr (mol/mol) des eaux échantillonnées. Les gammes de valeurs de référence pour les eaux de pluies et des argiles yprésiennes sont issues de Drouet et al. (2005), et les valeurs pour les sables d'Ostricourt et la craie séno-turonienne locale sont issus de Cary et al. (2014).

Le forage P100, situé au nord de la zone d'étude se distingue par sa signature $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ plus enrichie. Ce forage dans les alluvions présente une signature se rapprochant de celles des argiles yprésiennes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70977$) et des sédiments quaternaires ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,710$). Ces eaux ne sont pas influencées par la craie.

Les eaux de surface ont des valeurs intermédiaires comprises entre celles du pôle de sables à 0,7087 et de la craie à 0,7077. Ces valeurs sont cependant plus proches d'un pôle « sables » ou « précipitations » que d'un pôle de la craie. À noter que le canal de la Scarpe se distingue des eaux des tourbières, avec une signature en strontium plus proche de la craie. Cela peut s'expliquer par l'apport d'eau des différents bassins versants crayeux en amont.

Une autre hypothèse pour expliquer les valeurs obtenues dans les eaux de surface est l'éventuelle présence de strontium lié aux sources organiques, telles les déjections animales.

Quelques valeurs des isotopes du strontium mesurés dans les déjections animales et lisiers :

- $0,708777 \pm 0,00027$ (Kloppmann *et al.*, 2013, nappe d'Alsace)
- 0,70768 à 0,70815 (Kloppmann, 2003, Sundgau)
- 0,709 à 0,712 (Widory *et al.*, 2001, Bretagne)

La composition isotopique des déjections diffère selon la géologie locale : les rapports isotopiques du Sundgau sont plus bas que ceux de Bretagne, beaucoup plus radiogéniques, ce qui est en cohérence avec les roches cristallines anciennes du Massif armoricain.

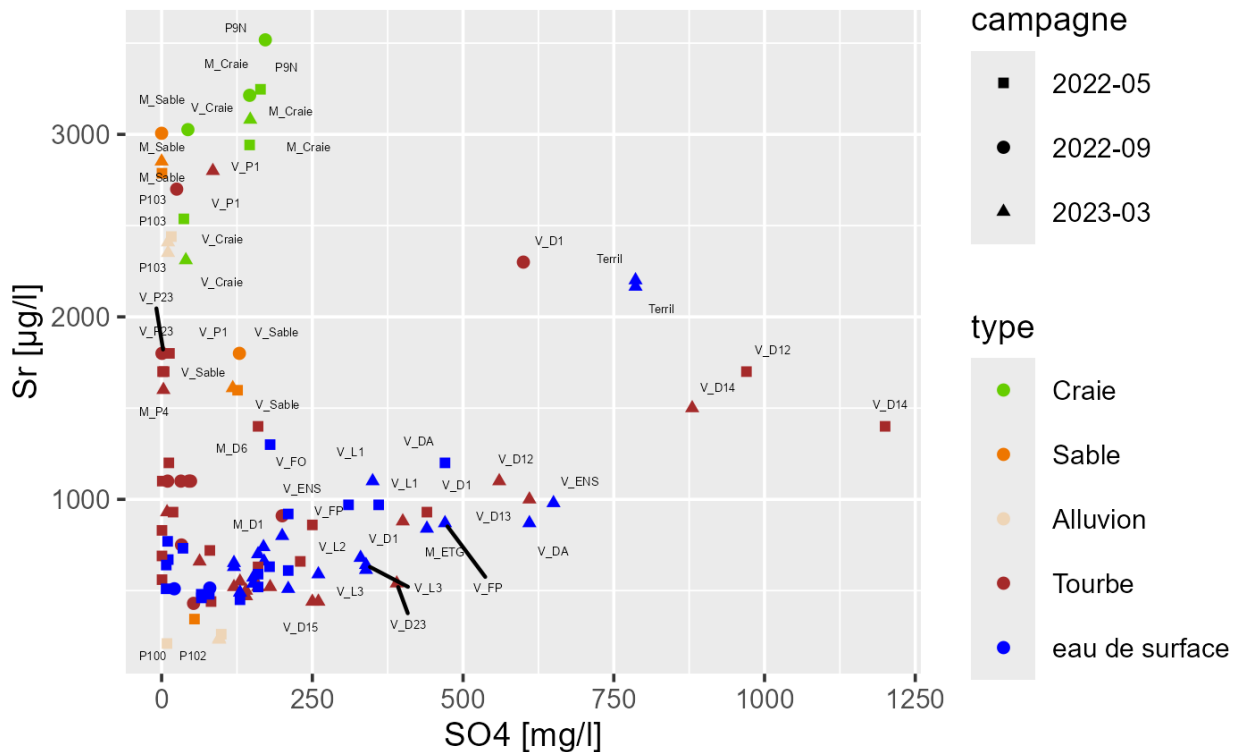


Figure 33 : Diagramme binaire des concentrations en strontium et en sulfates.

Les concentrations en strontium et sulfates pour les eaux et la tourbe sont présentés en Figure 33. Dans l'ensemble, les eaux souterraines présentent des concentrations plus élevées en strontium comparé aux eaux de surface et à la tourbe.

Une corrélation est observée entre les eaux de surface et la plupart des échantillons de tourbe, avec un enrichissement progressif en sulfates et en strontium. Cette relation ne semble pas être expliquée par une influence de la craie séno-turonienne. Le strontium peut venir des constituants des sables et argile tertiaires, mais il peut également avoir une origine anthropique : bassin d'orage, influence du terril, ou apport de matière organique.

Certains échantillons de tourbe ne s'alignent pas sur cette tendance et montrent un enrichissement en strontium sans augmentation de la concentration en sulfates (V_{P1} , V_{P23} , M_{P4}). Une hypothèse pour expliquer cette observation est le rôle potentiel de l'eau souterraine, venant influencer la tourbe.

Pour certaines eaux de surface et tourbières il existe une corrélation entre sulfate et strontium suggérant une origine du strontium autre que les carbonates de calcium de la craie du Seno-Turonien. Le strontium peut venir des constituants des sables et argile tertiaires, et il peut également avoir une origine anthropique.

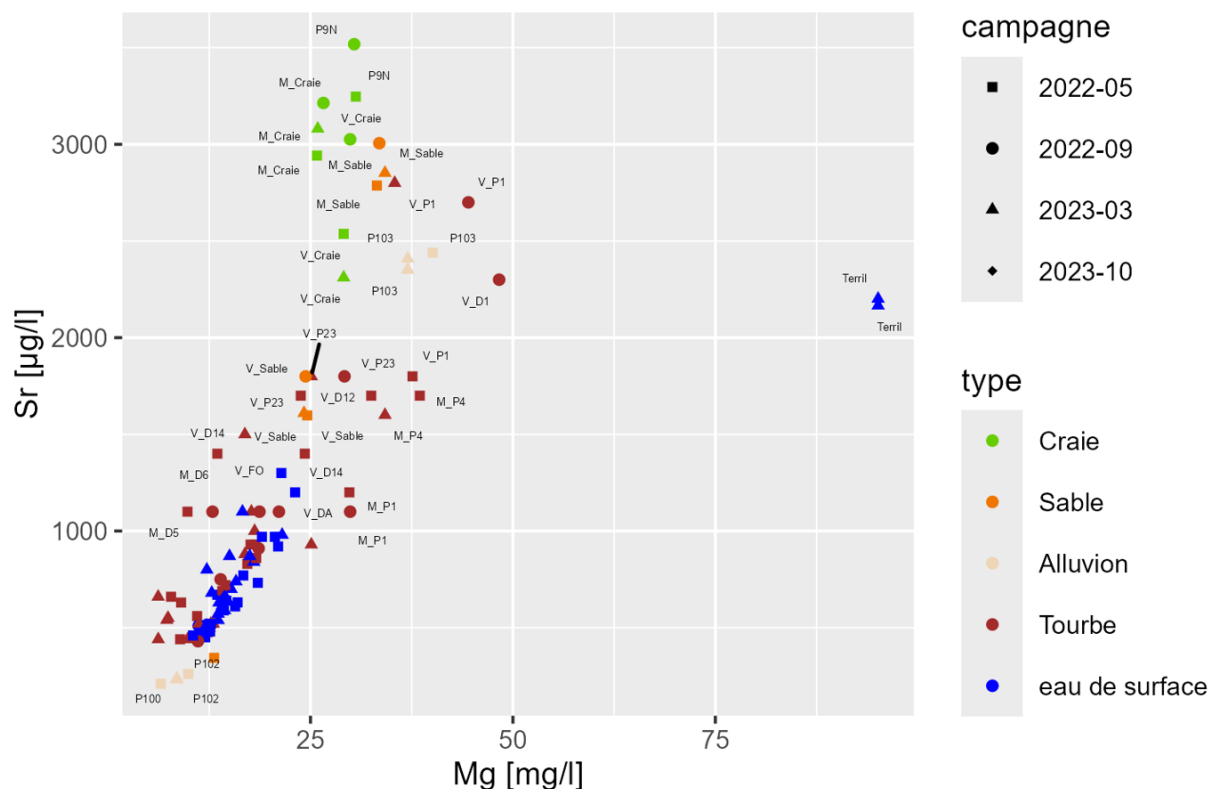


Figure 34 : Diagramme binaire des concentrations en strontium et en magnésium.

Apports des isotopes du strontium

- Bien que séparés par une couche d'argiles de Louvil, les eaux des doublets M_{craie}/M_{sable} et V_{craie}/V_{sable} montrent des signatures isotopiques et des rapports Ca/Sr similaires. L'eau des sables semble donc influencée par la craie sous-jacente.
- Le forage P103, identifié dans les sables, présente également une signature isotopique de la craie captive.
- Les forages Pz3 et P102, en dehors des tourbières, ont une signature différente de celle de la craie, proche de la recharge ou des formations tertiaires.

5.6. LES ISOTOPES DU BORE

La composition isotopique en bore dans les eaux échantillonnées est présentée sur la Figure 35.

Les signatures isotopiques en $\delta^{11}\text{B}$ varient significativement, allant de -16,9 à 25,2 ‰ (pour mille). Les eaux de surface présentent les concentrations les plus enrichies (autour de 20 ‰), se rapprochant de la composition isotopique de la pluie sur le secteur, estimée à 30 ‰ (Millot *et al.*, 2010).

De manière générale, la composition isotopique en bore est négative pour les eaux souterraines de la craie et des sables, et à l'inverse, est positive pour les eaux superficielles et peu profonde. Deux exceptions apparaissent à ce constat : (1) pour le point PZ3 au sable mais avec un rapport isotopique en bore le plus élevé (environ 25 ‰) et (2) pour le point P103 captant des eaux peu profondes mais avec un rapport isotopique négatif.

La signature isotopique des eaux souterraines, sables et craie, est fortement appauvrie et négative. Pour arriver à de telles signatures isotopiques, l'hypothèse privilégiée est celle de la **mise à l'équilibre eau-roche au sein de l'aquifère**, entraînant la désorption du bore des argiles. Ce processus d'appauvrissement de la signature isotopique semble cohérent avec la datation des eaux, supposant un **temps de résidence « long »**. D'autres hypothèses peuvent être soulevées pour expliquer la signature des eaux souterraine (Kloppmann *et al.*, 2015), comme par exemple du bore sorbé sur la matière organique (tourbe, lignite, etc.), fortement appauvri (ex. $\delta^{11}\text{B}$ pour le lignite = -21 ‰, Williams *et al.*, 2004), ou la présence d'engrais sous forme de borate de calcium (Vengosh *et al.*, 1999), utilisé en particulier pour les betteraves.

Les eaux souterraines des points P100/P102 et l'eau de surface prélevée dans la Scarpe présentent une signature comparable. Ces points diffèrent des doublets sable / craie et des eaux de surface dans les tourbières.

Le point de prélèvement d'eau de surface « terril », sous l'influence du drainage du terril de Rieulay, apparaît particulièrement riche en bore (>600 $\mu\text{g/L}$). À noter que la signature isotopique de ce point est fortement enrichie ($\delta^{11}\text{B}_{\text{terril}} = 15,1 \text{ ‰}$) par rapport à la signature théorique de la lignite ($\delta^{11}\text{B}_{\text{lignite}} = -21 \text{ ‰}$). La concentration élevée en bore de ce point peut être liée à la proximité du terril du Rieulay, mais aussi à d'autres sources comme par exemple des rejets d'assainissements liés aux habitations adjacentes. La station de traitement des eaux usées de Pecquencourt rejette un effluent d'eaux usées traitées en amont du point « Terril ». Cet effluent se jette dans la Scarpe et il semble peu probable qu'il puisse être à l'origine de la concentration en bore observé sur ce point.

Une droite de mélange entre un pôle eau de pluie et le pôle « Terril » explique relativement bien les eaux de surface des tourbières (Figure 35).

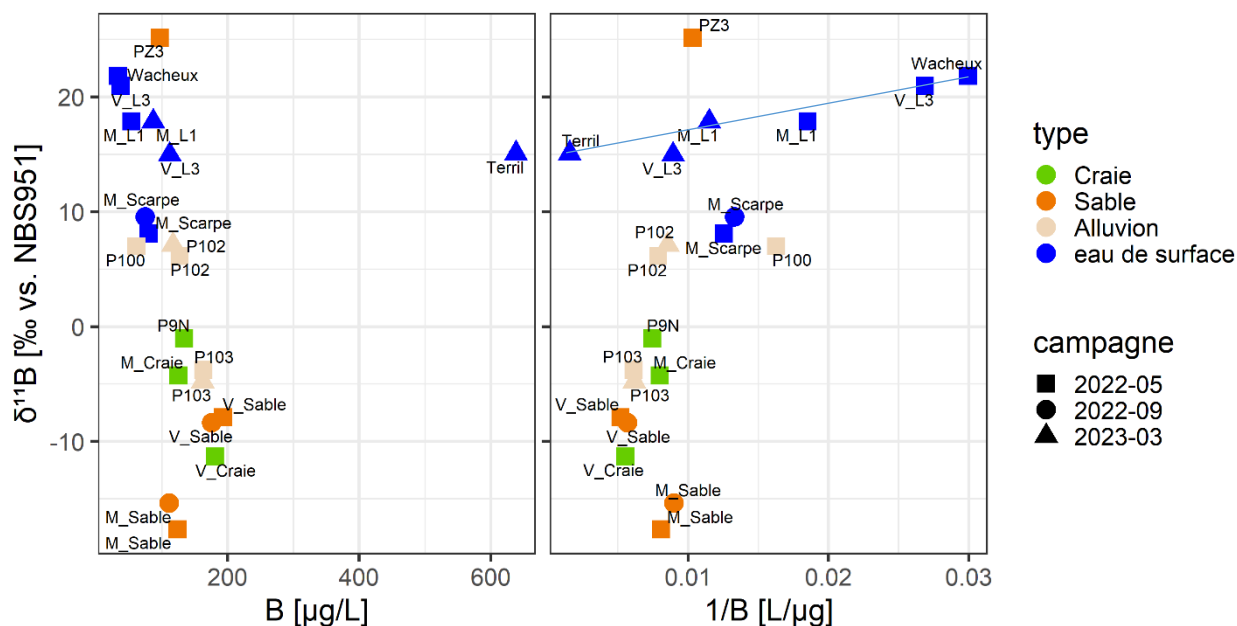


Figure 35 : Composition isotopique en bore en fonction de la concentration en bore dans les eaux échantillonnées (à gauche). Représentation en 1/B (à droite) montrant la droite de mélange théorique entre un pôle eaux de pluie et un pôle « Terril ».

Apports des isotopes du bore

- Les données des isotopes du bore sur les eaux souterraines des tourbières (sable et craie) confortent l'hypothèse d'un temps de résidence long. Les signatures fortement appauvries peuvent être le résultat d'un processus d'interactions eau-roche avancé.
- Les eaux de surface montrent une signature enrichie, différente de celle des eaux souterraines.
- Une anomalie de concentration en bore s'observe sur l'échantillon d'eau de surface « Terril », pouvant être lié à une contamination de surface (terril minier du Rieulay, ruissellement, eaux usées, etc.).

6. Conclusions et perspectives

L'objectif était de caractériser les gradients et les flux d'eaux au droit et autour des tourbières de Vred et de Marchiennes.

Les suivis piézométriques des doublets sable/ craie sur 4 ans (2022-2025) ont montré que le niveau dans la craie reste inférieur de 4 à 12 mètres à celui dans les sables. Le gradient hydraulique vertical établit donc que, si une connexion hydraulique existait entre ces deux nappes, l'écoulement se ferait par un déversement de la nappe des sables vers la nappe de la craie. Par ailleurs, l'analyse des cuttings des forages conservés dans les locaux du Parc, a permis d'établir les coupes géologiques interprétées au droit des tourbières. Celles-ci montrent la présence d'argile de Louvil sur une épaisseur de 8 à 12 m séparant la nappe des Sables et la nappe de la craie. L'épaisseur des argiles de Louvil et la différence de niveau piézométrique sont suffisamment importantes pour établir qu'il n'existe aucun écoulement ascendant significatif de la nappe de la craie autour des tourbières de Vred et de Marchiennes.

Néanmoins, les analyses géochimiques des eaux des de la nappe des sables au-delà de 10 mètres de profondeur, observées sur les forages Vred et Marchiennes (BSS004CFVQ, BSS004CFVX) montrent :

- Une nature bicarbonaté calcique
- Des temps de résidence supérieur à 50 ans
- Une signature isotopique en strontium typique de la craie seno-truronienne (autour de 70.78 pour mille)

L'hypothèse pouvant expliquer ces caractéristiques est que ces eaux ont dans un premier temps subi une interaction longue avec la craie et dans un deuxième temps sont passées de la nappe de la craie à la nappe des sables sans interagir avec les argiles de Louvil (car sinon la signature isotopique du strontium n'aurait pas été conservée). Les mécanismes précis ayant pu aboutir à une telle histoire de ces eaux n'ont pas pu être élucidés et devront être recherchés à une échelle plus large, comme, par exemple, celle du bassin d'Orchies. Il est néanmoins intéressant de remarquer que l'âge de ces eaux est en accord avec une mise en place de ces mécanismes avant les années 1950, c'est-à-dire lorsque le niveau de la nappe de la craie était une quinzaine de mètre au-dessus du niveau actuel.

Ainsi, les eaux de la nappe des sables semblent de qualité variable avec en profondeur des eaux aux caractéristiques proches des eaux de la craie. Ces eaux « profondes » de la nappe des Sables pourraient constituer le réservoir alimentant les tourbières de Vred dans le modèle de Goubet (2015). Il est probable que ces eaux « profondes » de la nappe des Sables aient des vitesses d'écoulement très faibles étant donné les gradients hydrauliques très faibles et l'essentiel de l'écoulement de cette nappe se produisant via les eaux de surface connectées via des écoulements hypodermiques.

6.1. PERSPECTIVES

- Les résultats principaux de cette étude s'appuient sur la datation et la composition isotopique du strontium sur deux forages. Il pourrait être utile de vérifier et valider ces résultats par :
 - des datations avec des techniques analytiques permettant de dater les âges supérieurs à 50 ans
 - des prélèvements sur d'autres forages captant les sables et crépinés au-delà de 10 m de profondeur
- Poursuivre les suivis continus sur les doublets sable / craie au droit des tourbières.
- Poursuivre et améliorer les suivis des alluvions à l'échelle de la vallée alluviale avec un pas de temps plus fin (horaire par exemple) ;
- Réaliser une cartographie des argiles de Louvil à l'échelle du bassin d'Orchies pour étudier leur épaisseur, leur continuité, leur limite, localiser d'éventuelles fenêtres érosives, d'éventuels décalages liés aux rejets de failles, leurs variations latérales de faciès (passage au Tuffeau de Valenciennes) qui peuvent modifier leur nature imperméable, etc. Pour cela un modèle géologique pourrait être construit permettant de mettre en cohérence l'ensemble des connaissances et des données géologiques disponibles. Un tel modèle s'inscrirait dans la continuité des travaux menés dans les années 2006 par le Conseil Scientifique de l'Environnement Nord-Pas-de-Calais sous l'impulsion de Jean-Pierre-Colbeaux. Pour pouvoir aller plus loin sur l'épaisseur et le faciès des argiles de Louvil/Tuffeau de Valenciennes, l'acquisition de données de géophysique pourrait être utile. En particulier l'acquisition de profils de résistivité électrique permettrait d'apporter des informations géologiques et structurales dans les 150 premiers mètres de profondeur. Pour plus de détails, les travaux récents réalisés dans le béthunois sur un contexte géologique similaire (Meire *et al.*, 2024) peuvent être un bon exemple.
- Collecter les informations et données permettant de construire une base de données des prélèvements en eaux souterraines au cours du XXème siècle, afin de vérifier la corrélation entre l'évolution des prélèvements et la baisse des niveaux piézométriques à la craie. Une telle base de données des prélèvements a pu être reconstituée par exemple pour l'aquifère des calcaires carbonifères (Picot *et al.*, 2014; Picot-Colbeaux *et al.*, 2020).
- La présente étude s'est focalisée sur une zone proche (quelques km) autour des deux tourbières d'intérêt. La gestion de ces deux tourbières est très dépendante des

écoulements et de la géochimie de la nappe de surface formée par la continuité hydraulique entre nappe des sables thanétiens et nappe alluviale. Pour mieux comprendre le fonctionnement de cette nappe des sables dans son ensemble l'étude géochimique pourrait être poursuivie en profitant d'autres accès à la nappe des sables thanétiens (i.e. forage crépiné quelques mètres au-dessus des argiles de Louvil). Cela pourrait être rendu possible soit en élargissant la zone d'étude à l'ensemble de la vallée alluviale de la Scarpe, soit en réalisant localement de nouveaux ouvrages de suivi.

- Pour mieux appréhender la qualité de l'eau de la nappe alluviale alimentant les tourbières de Vred et Marchiennes, il serait utile d'approfondir les études sur le réseau complexe d'eaux de surface. Celles-ci sont de qualité très variable à la faveur des rejets présents sur le territoire (déversoir d'orage, drainage de terrils, rejet d'eaux usées traités, etc.). Les eaux de surface sont susceptibles d'alimenter la nappe des sables. L'étude des écoulements a été jugée compliquée (Mardhel *et al.*, 2008) car très dépendants des eaux de surface. Dans ce contexte, toute acquisition de données sur les eaux de surface (jaugeages, suivi de niveau, de débit, ligne d'eau, suivi de la qualité, fonctionnement et gestion des ouvrages, etc.) permettrait d'améliorer les connaissances du fonctionnement de la nappe d'accompagnement.

7. Références bibliographiques

- Malcuit, E., Pinson, S., Surdyk, N., Rambourg, D., Joublin, F., Cary, L., 2025.** Evaluation du fond hydrogéochimique des masses d'eau de surface et souterraine du bassin Artois-Picardie, Phase 2. Rapport final (Etude BRGM/RP-74019-FR). BRGM, Orléans, France. URL <http://ficheinfoterre.brgm.fr/document/RP-74019-FR>
- Duranel, A., 2024a.** Etude écohyrologique de la Réserve Naturelle Régionale de la Tourbière de Vred. ECOTELM.
- Duranel, A., 2024b.** Etude écohyrologique de la Réserve Naturelle Nationale de la Tourbière de Marchiennes. ECOTELM.
- Meire, B., Manlay, A., Portal, A., Lacquement, F., Maurice, B., Andrzejewski, P., 2024.** Modélisation de la nappe de la Craie dans le Béthunois – apports des investigations géophysiques et modélisation géologique 3D. Rapport final (Etude BRGM/RP-74138-FR). BRGM, Orléans, France. URL <http://ficheinfoterre.brgm.fr/document/RP-74138-FR>
- Picot-Colbeaux, G., Rousseau, M., Parmentier, M., Guillaume, M., Goderniaux, P., 2020.** Actualisation du modèle maillé des écoulements souterrains de la nappe transfrontalière des calcaires carbonifères (France - Belgique) - Rapport final (Etude BRGM/RP-68738-FR). BRGM, Orléans, France. URL <http://ficheinfoterre.brgm.fr/document/RP-68738-FR>
- Goubet, P., 2015.** Diagnostic fonctionnel du complexe tourbeux de la Réserve naturelle régionale de la Tourbière de Vred (Nord).
- Kloppmann, W., Petelet-Giraud, E., Guerrot, C., Cary, L., Pauwels, H., 2015.** Extreme Boron Isotope Ratios in Groundwater. *Procedia Earth Planet. Sci.*, 11th Applied Isotope Geochemistry Conference AIG-11, 13, 296–300. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.07.069>
- Cary, L., Benabderraziq, H., Elkhatabi, J., Gourcy, L., Parmentier, M., Picot, J., Khaska, M., Laurent, A., Négrel, Ph., 2014.** Tracking selenium in the Chalk aquifer of northern France: Sr isotope constraints. *Appl. Geochem.* 48, 70–82. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.07.014>
- Picot, G., Crastes de Paulet, F., Thiery, D., Klinka, T., 2014.** Modélisation maillée des écoulements souterrains de la nappe transfrontalière des calcaires carbonifères (france - belgique). rapport final (Etude BRGM/RP-63140-FR). BRGM. URL <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-63140-FR.pdf>
- Kloppmann, W., Urban, S., Gourcy, L., 2013.** Etude isotopique de la pollution azotée des captages Kabis et St.-Louis, Haut-Rhin (Etude BRGM/RP-62777-FR).
- Deschodt, L., Salvador, P., Feray, P., Schwenninger, J., 2012.** Transect partiel de la plaine de la Scarpe (bassin de l'Escaut, nord de la France). Stratigraphie et évolution

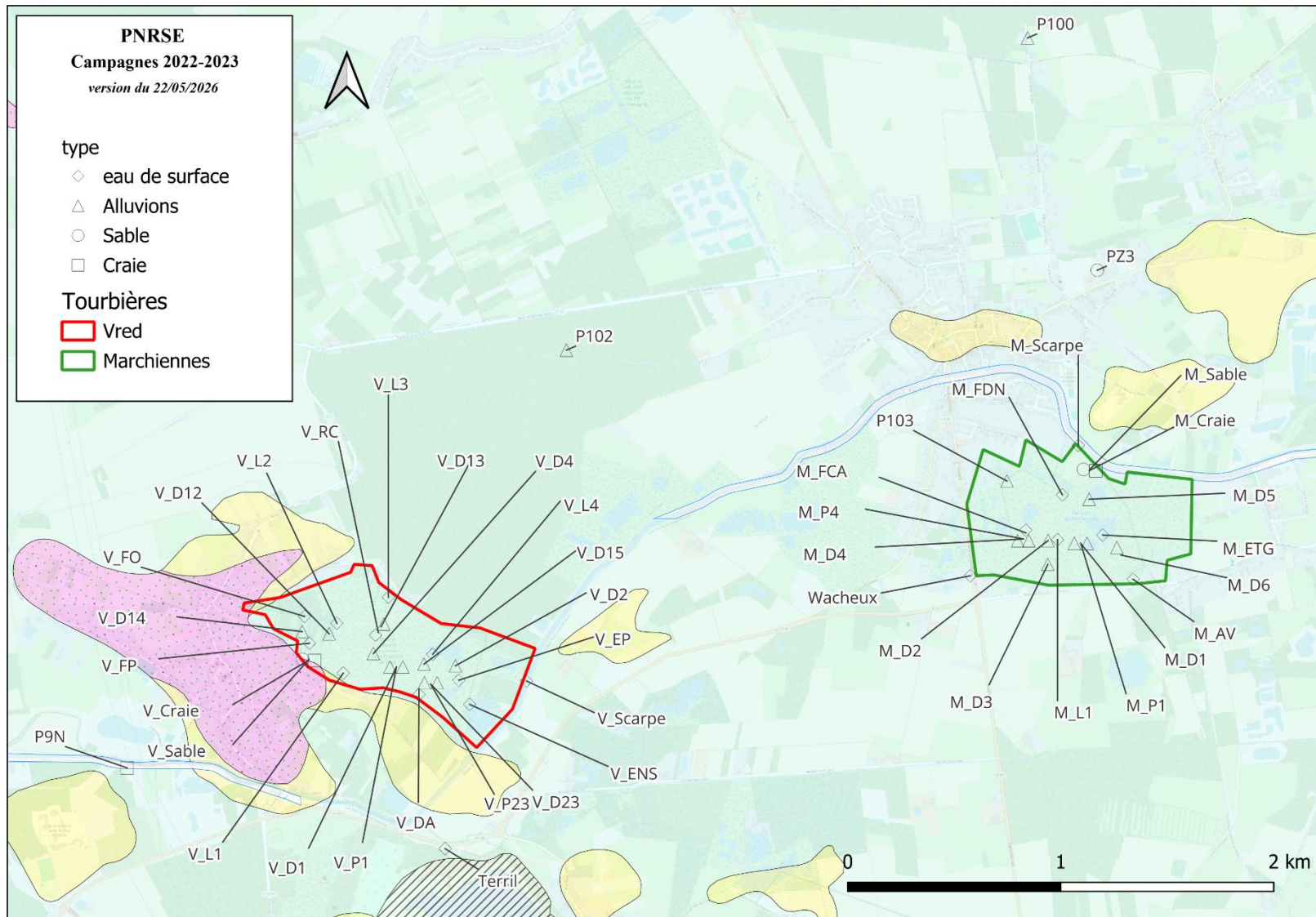
paléogéographique du Pléniglaciaire supérieur à l'Holocène récent. Quaternaire 87–116. <https://doi.org/10.4000/quaternaire.6116>

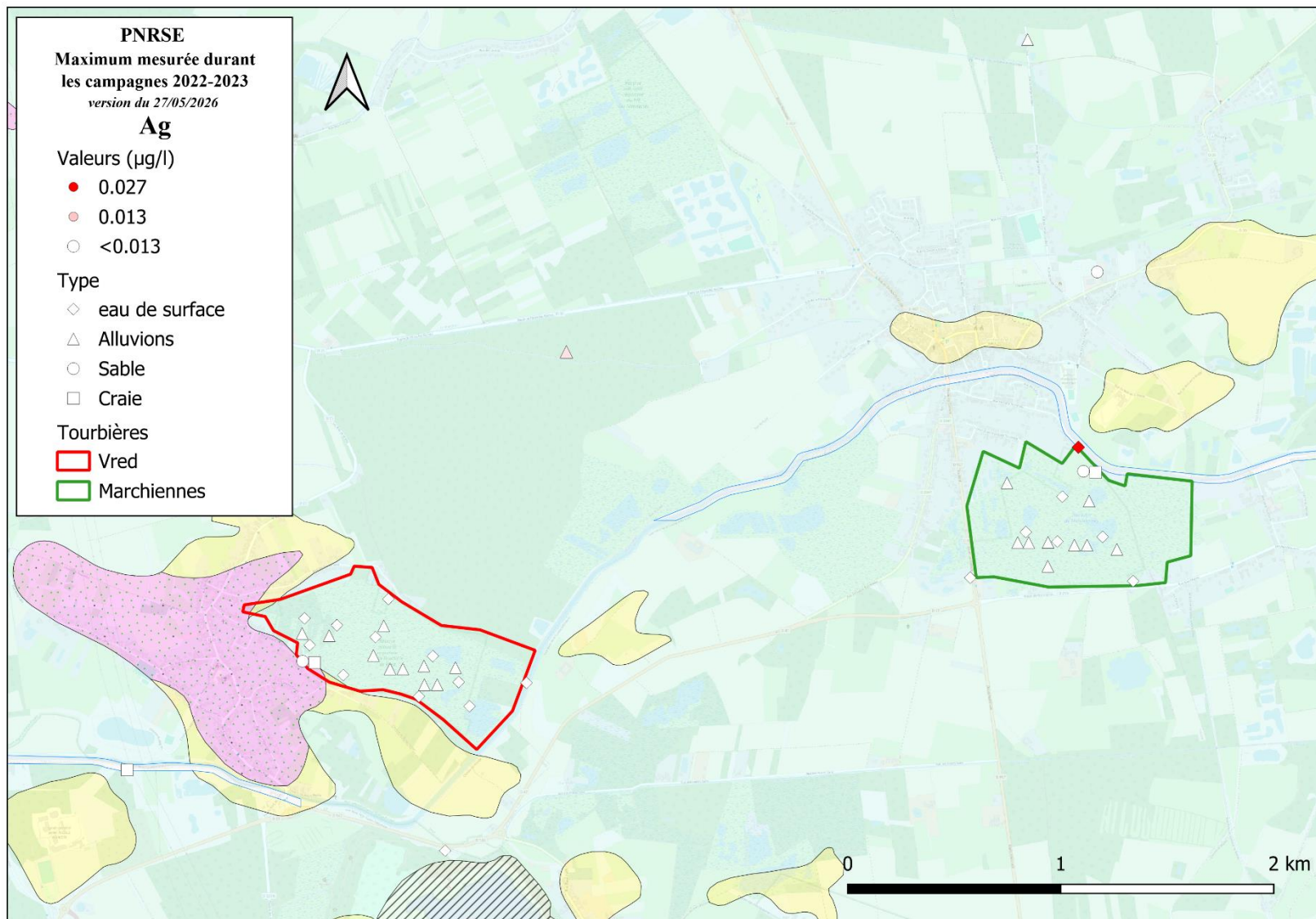
- Dufrenoy, R., Cardin, C., Joublin, F., Caron, G., Despierres, A., Maquet, J., Pascoli, T., Polez, K., Gryczka, M., Pira, K.**, 2011. nappe de la craie - campagnes et cartes piézométriques «hautes et basses eaux» 2009 (Etude BRGM/RP-58542-FR). BRGM. URL <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-58542-FR.pdf>
- Millot, R., Petelet-Giraud, E., Guerrot, C., Négrel, P.**, 2010. Multi-isotopic composition ($\delta^{7}\text{Li}$ – $\delta^{11}\text{B}$ – δD – $\delta^{18}\text{O}$) of rainwaters in France: Origin and spatio-temporal characterization. *Appl. Geochem.* 25, 1510–1524. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2010.08.002>
- Mardhel, V., Pinson, S.**, 2008. Suivi piézométrique de la nappe des alluvions du bassin de la scarpe aval. analyse des données et étude de faisabilité. rapport final (BRGM/RP-56162-FR). BRGM. URL <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-56162-FR.pdf>
- Drouet, Th., Herbauts, J., Gruber, W., Demaiffe, D.**, 2005. Strontium isotope composition as a tracer of calcium sources in two forest ecosystems in Belgium. *Geoderma* 126, 203–223. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.09.010>
- Lions, J.**, 2004. Étude hydrogéochimique de la mobilité de polluants inorganiques dans des sédiments de curage mis en dépôt Expérimentations, études in situ et modélisation. École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Williams, L.B., Hervig, R.L.**, 2004. Boron isotope composition of coals: a potential tracer of organic contaminated fluids. *Appl. Geochem.* 19, 1625–1636. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2004.02.007>
- Kloppmann, W.**, 2003. Etude isotopique de la pollution azotée de la nappe d'Alsace entre Sierentz et Ottmarsheim (Etude BRGM/RP-52331-FR).
- Widory, D., Chery, L., Mouglin, B., Talbo, H., Plancard, D., Bonnin, J., Rochdi, G., Handour, H.**, 2001. (Etude Traçage isotopique des sources de nitrates dans les eaux souterraines : cas du bassin de l'Arguenon (Côtes-d'Armor)).
- Huddart, P.A., Longstaffe, F.J., Crowe, A.S.**, 1999. δD and $\delta^{18}\text{O}$ evidence for inputs to groundwater at a wetland coastal boundary in the southern Great Lakes region of Canada. *J. Hydrol.* 214, 18–31. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00226-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00226-1)
- Guglielmi, Y., Mudry, J., Blavoux, B.**, 1998. Estimation of the water balance of alluvial aquifers in region of high isotopic contrast: an example from southeastern France. *J. Hydrol.* 210, 106–115. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00178-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00178-4)
- Hunt, R.J., Bullen, T.D., Krabbenhoft, D.P., Kendall, C.**, 1998. Using Stable Isotopes of Water and Strontium to Investigate the Hydrology of a Natural and a Constructed Wetland. *Groundwater* 36, 434–443. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1998.tb02814.x>
- Kendall, C., McDonnell, J.J.**, 1998. *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*. Elsevier.
- Oster, H., Sonntag, C., Münnich, K.O.**, 1996. Groundwater age dating with chlorofluorocarbons. *Water Resour. Res.* 32, 2989–3001. <https://doi.org/10.1029/96WR01775>

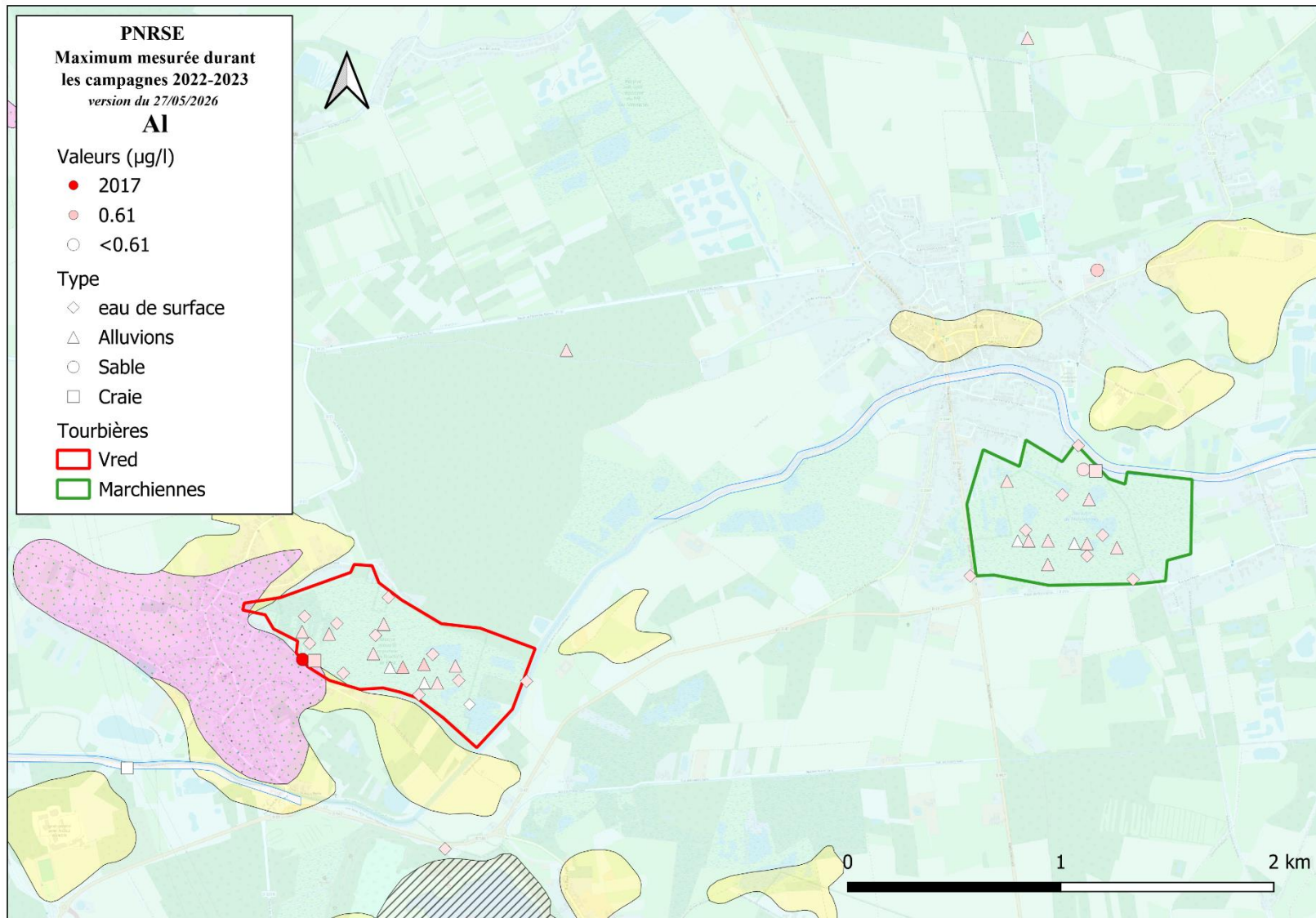
- Rozanski, K., Araguás-Araguás, L., Gonfiantini, R.**, 1993. Isotopic Patterns in Modern Global Precipitation, in: *Climate Change in Continental Isotopic Records*. American Geophysical Union (AGU), pp. 1–36. <https://doi.org/10.1029/GM078p0001>
- Clevenot, I., Denudt, H.**, 1991. Etude et synthèse hydrogéologique du bassin d'Orchies (Etude BRGM/RR-33097-FR). BRGM. URL <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RR-33097-FR.pdf>
- Dion, R.**, 1988. Les grandes étapes de l'aménagement des plaines de la Scarpe et du Bas-Escout français. *Hommes Terres Nord* 1, 226–237. <https://doi.org/10.3406/htn.1988.3076>
- Mariotti, A., Landreau, A., Simon, B.**, 1988. 15N isotope biogeochemistry and natural denitrification process in groundwater: Application to the chalk aquifer of northern France. *Geochim. Cosmochim. Acta* 52, 1869–1878. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(88\)90010-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90010-5)
- Edmunds, W.M., Cook, J.M., Darling, W.G., Kinniburgh, D.G., Miles, D.L., Bath, A.H., Morgan-Jones, M., Andrews, J.N.**, 1987. Baseline geochemical conditions in the Chalk aquifer, Berkshire, U.K.: a basis for groundwater quality management. *Appl. Geochem.* 2, 251–274. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(87\)90042-4](https://doi.org/10.1016/0883-2927(87)90042-4)
- Landreau, A., Seguin, J.J.**, 1987. Investigation sur la dénitrification naturelle dans l'aquifère captif de la Craie du nord de la France (BRGM/87-SGN-486-EAU). BRGM. URL <http://ficheinfoterre.brgm.fr/document/87-SGN-486-EAU>
- Simon, B.**, 1986. Apports de la biogéochimie isotopique à la connaissance de la dénitrification dans les eaux souterraines. Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.
- Burke, W.H., Denison, R.E., Hetherington, E.A., Koepnick, R.B., Nelson, H.F., Otto, J.B.**, 1982. Variation of seawater 87Sr/86Sr throughout Phanerozoic time. *Geology* 10, 516. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1982\)10%3C516:VOSSTP%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1982)10%3C516:VOSSTP%3E2.0.CO;2)
- Fourrier, H., Masson, F.-X.**, 1982. Reconnaissance des dépôts sédimentaires, matériaux originels des sols de la région de Marchiennes (plaine de la Scarpe). *Ann. Société Géologique Nord* 102, 41–47.
- Mania, J.**, 1978. Gestion des systèmes aquifères: application au Nord de la France.
- Desoignies, J., Mortelmans, M., Legrand, R.**, 1973. Carte géologique de la France à 1/50 000, feuille 21-22, ST-AMAND CRESPIE-MONS.
- Rosignol, F., Dezwardt, J.M., Desoignies, J., Leroux, E., Waterlot, G.**, 1963. Données géologiques et hydrogéologiques acquises à la date du 1/10/1962 sur le territoire de la feuille topographique au 1/20000 de saint-amand (coupures-1-2-5-6). (Etude BRGM/63-DSGR-A-008). BRGM. URL <http://infoterre.brgm.fr/rapports/63-DSGR-A-008.pdf>
- Craig, H.**, 1961. Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science* 133, 1702–1703. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>

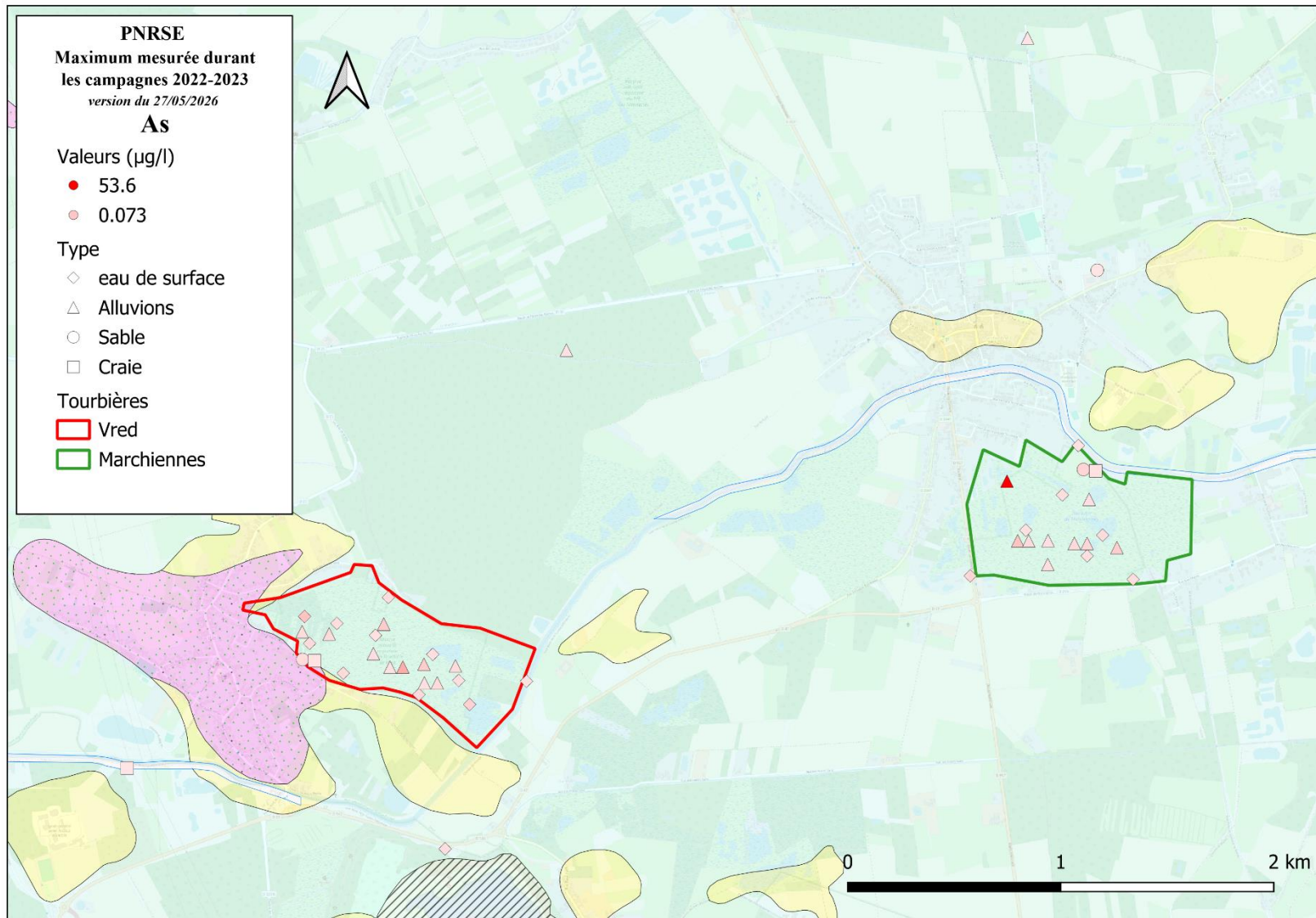
Annexe 1 Cartographies des concentrations en traces

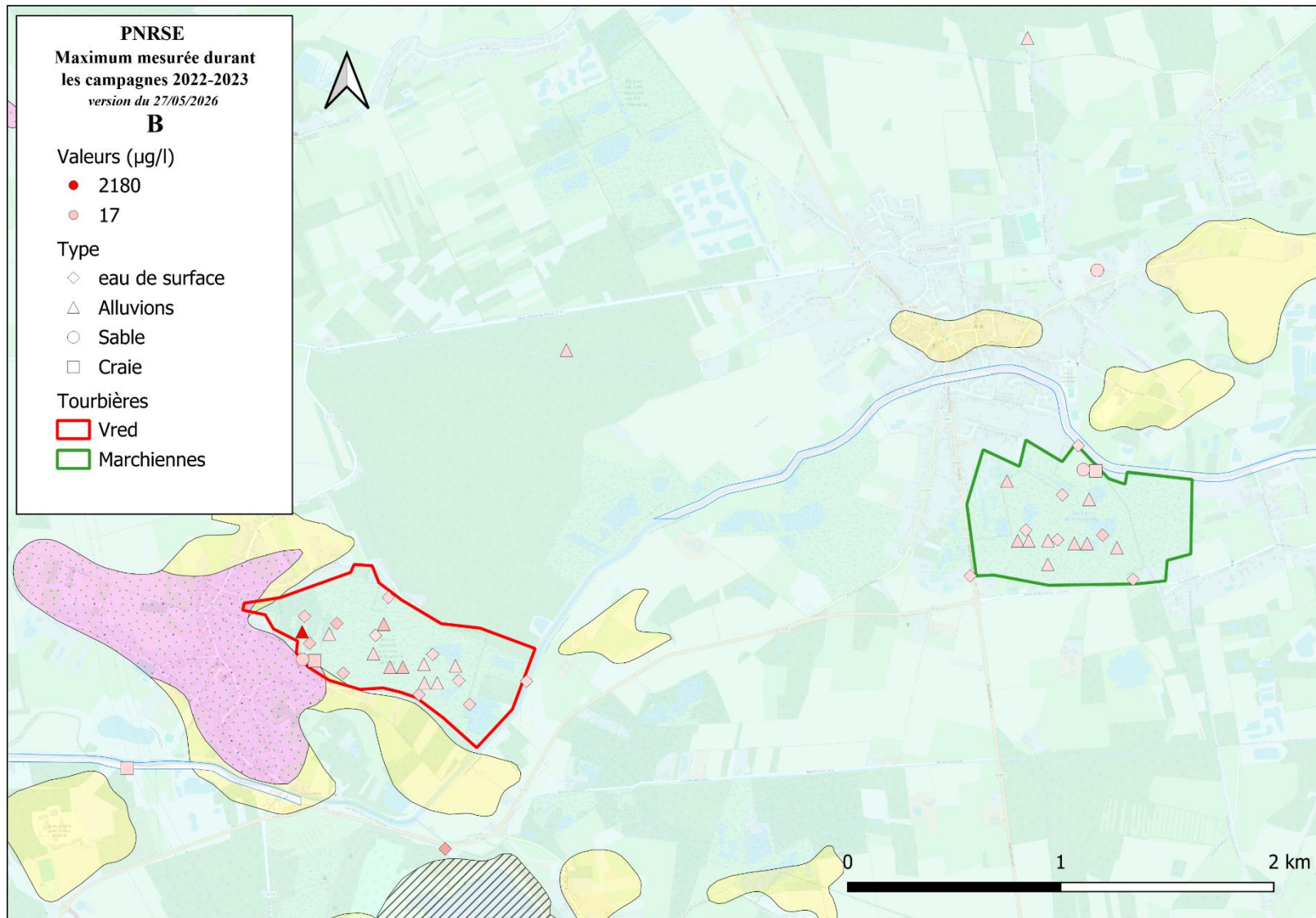
Caractérisation des gradients et des flux entre la nappe de la craie et les tourbières alcalines de Vred et Marchiennes

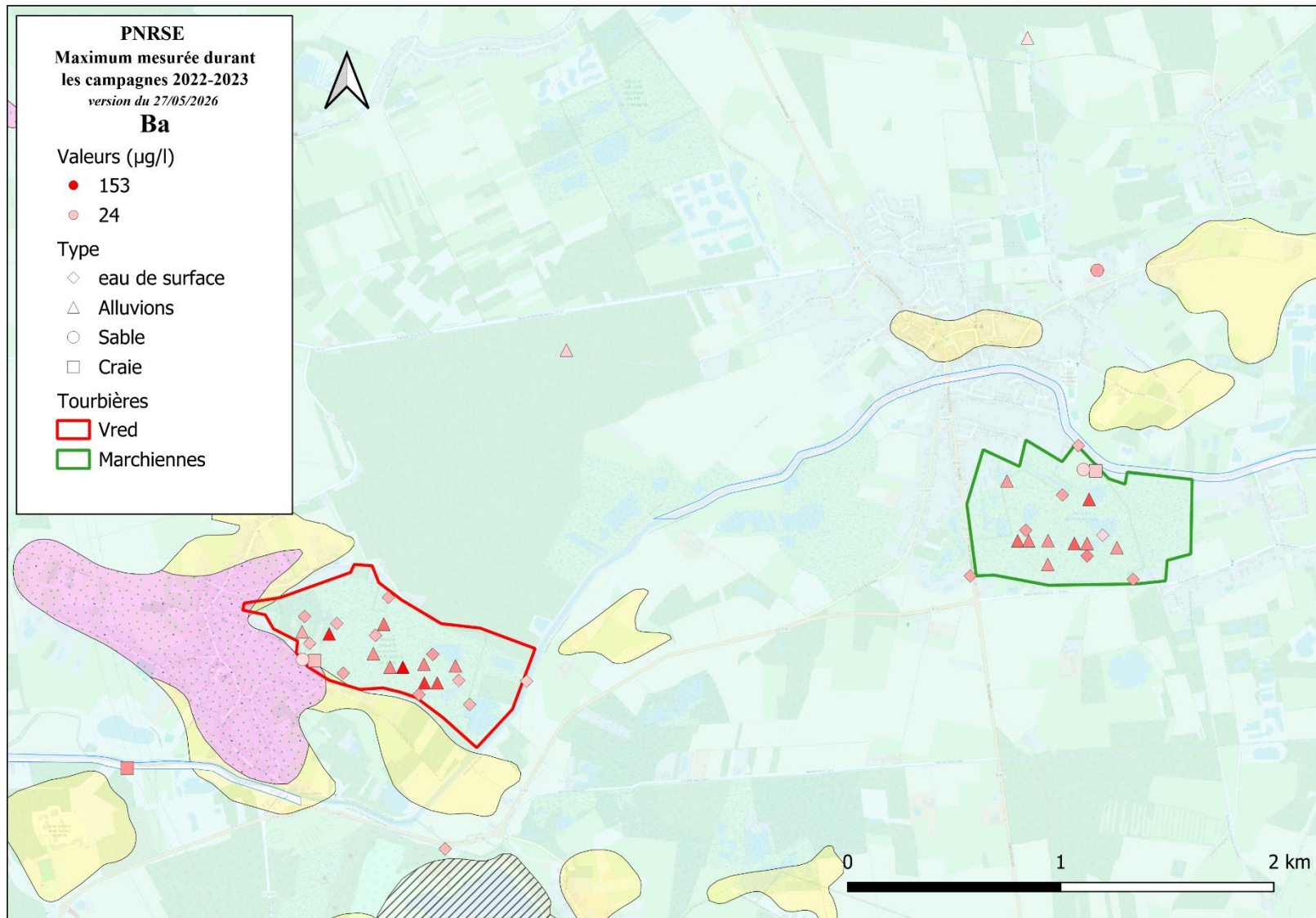


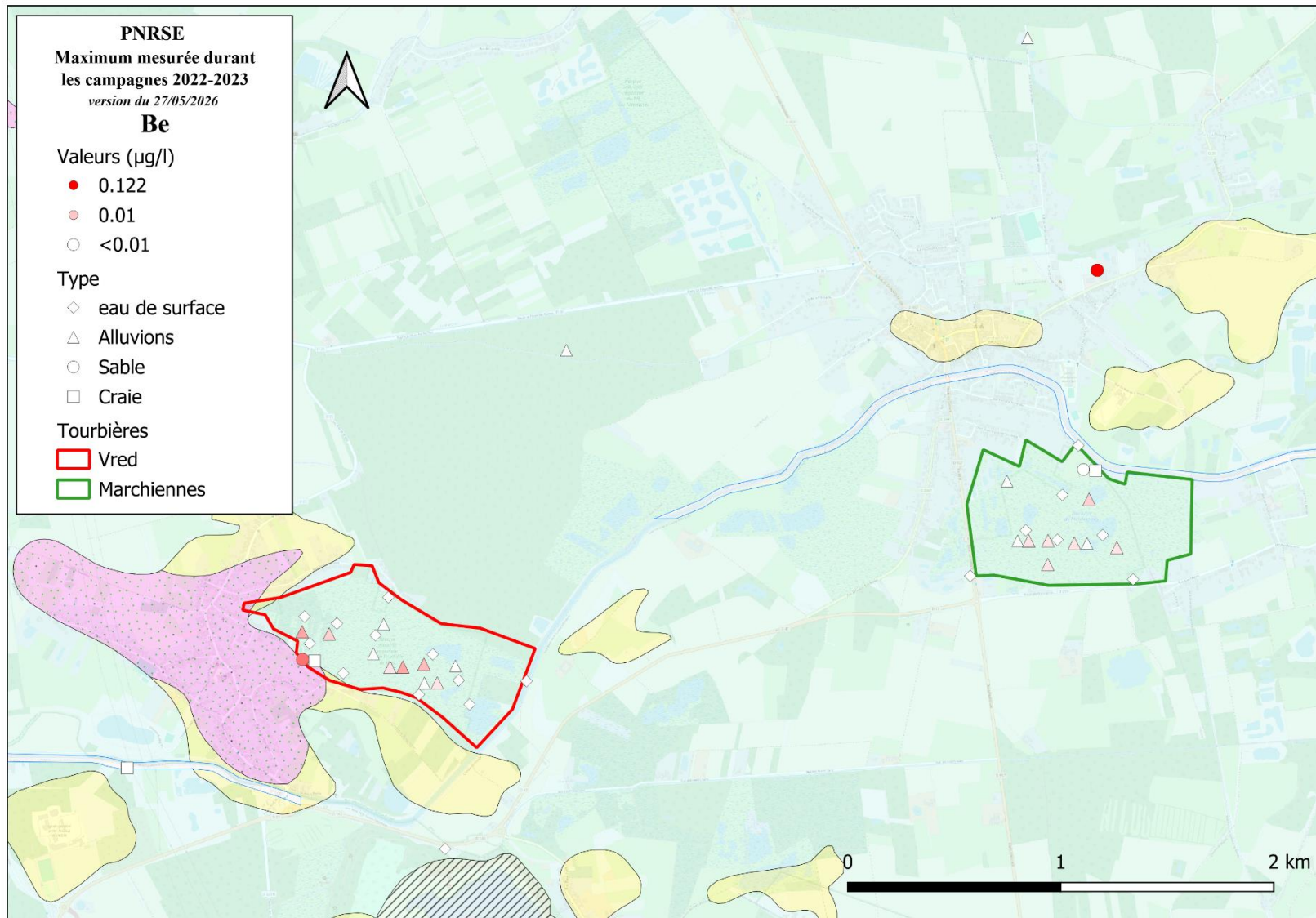


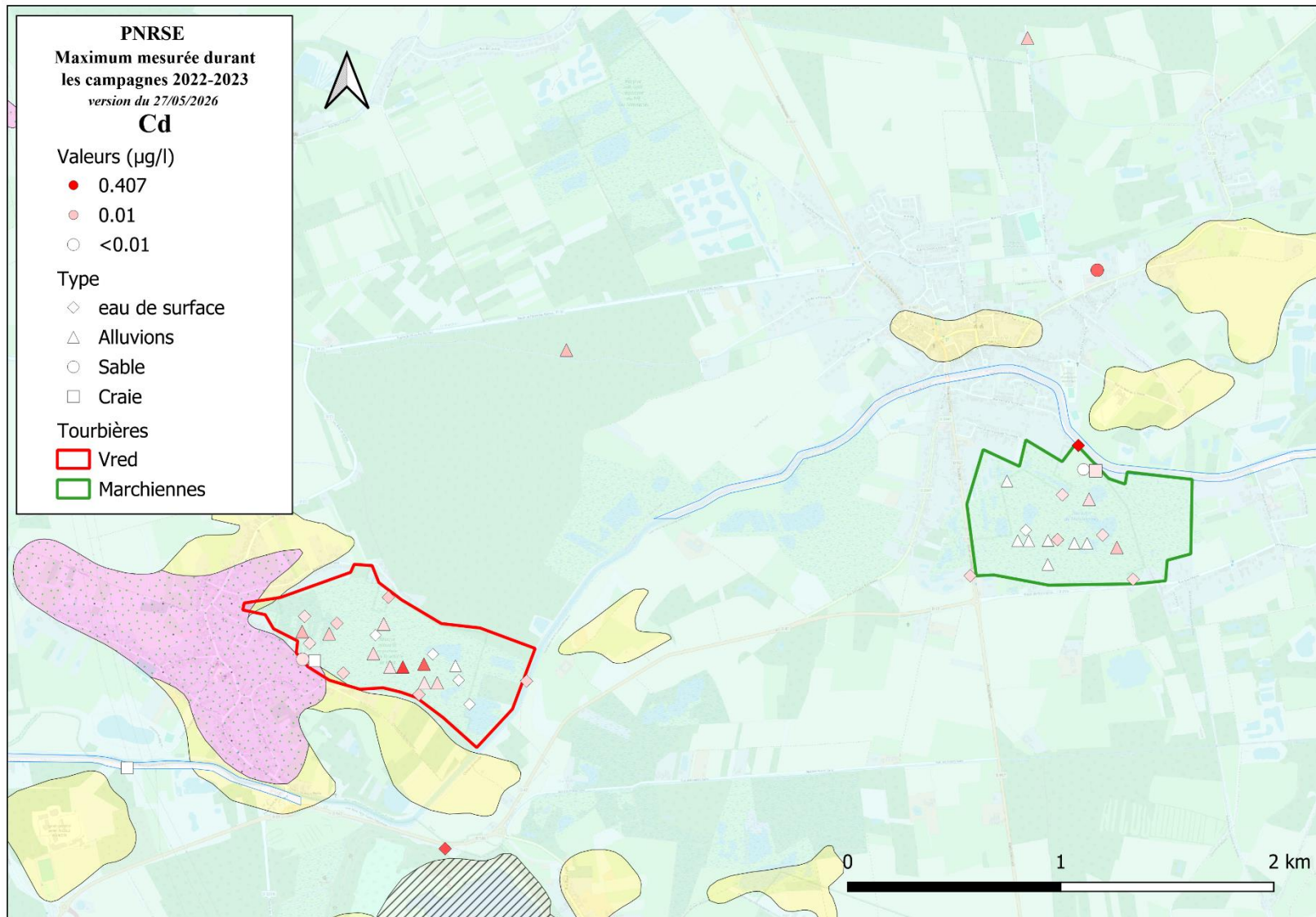


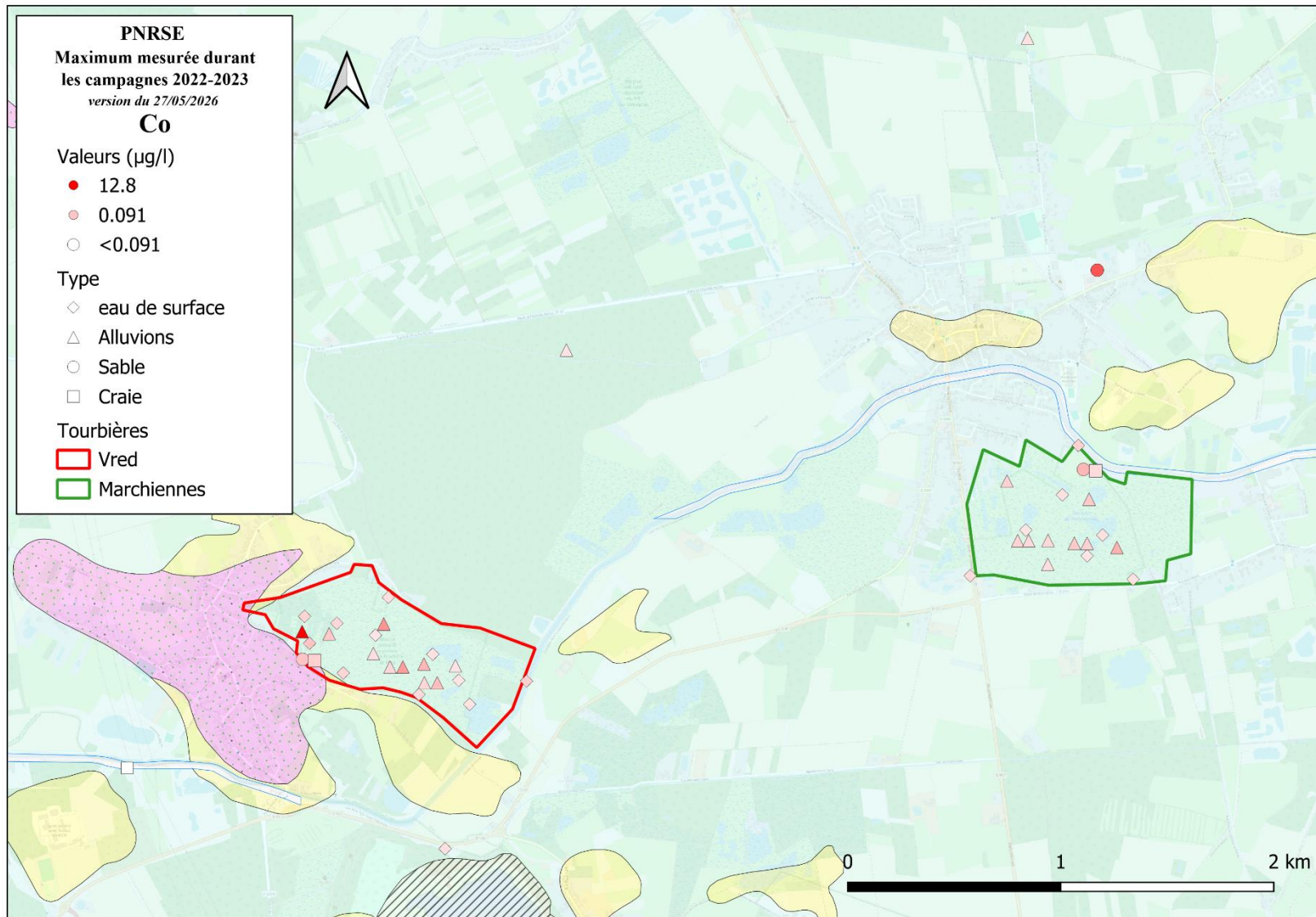


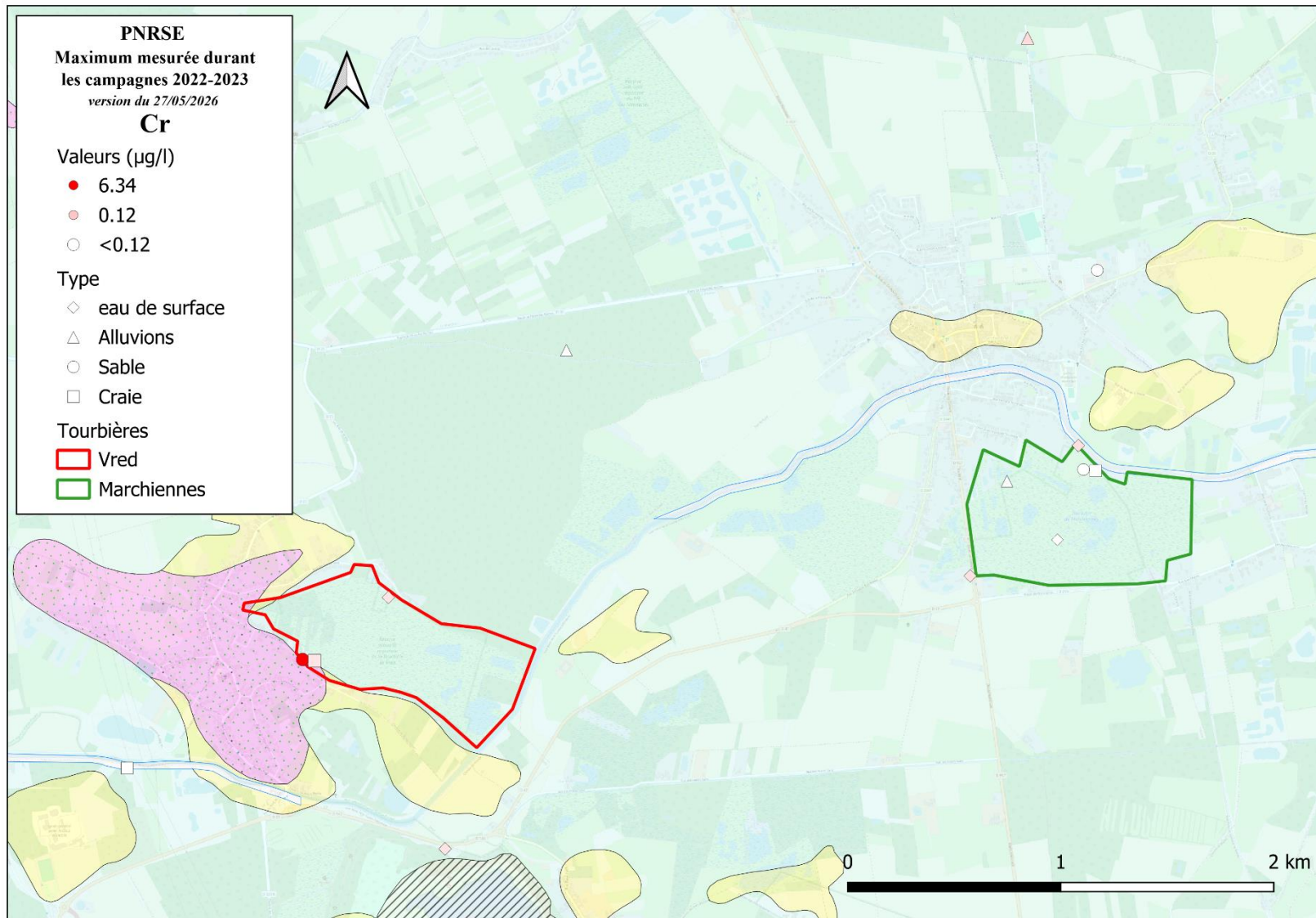


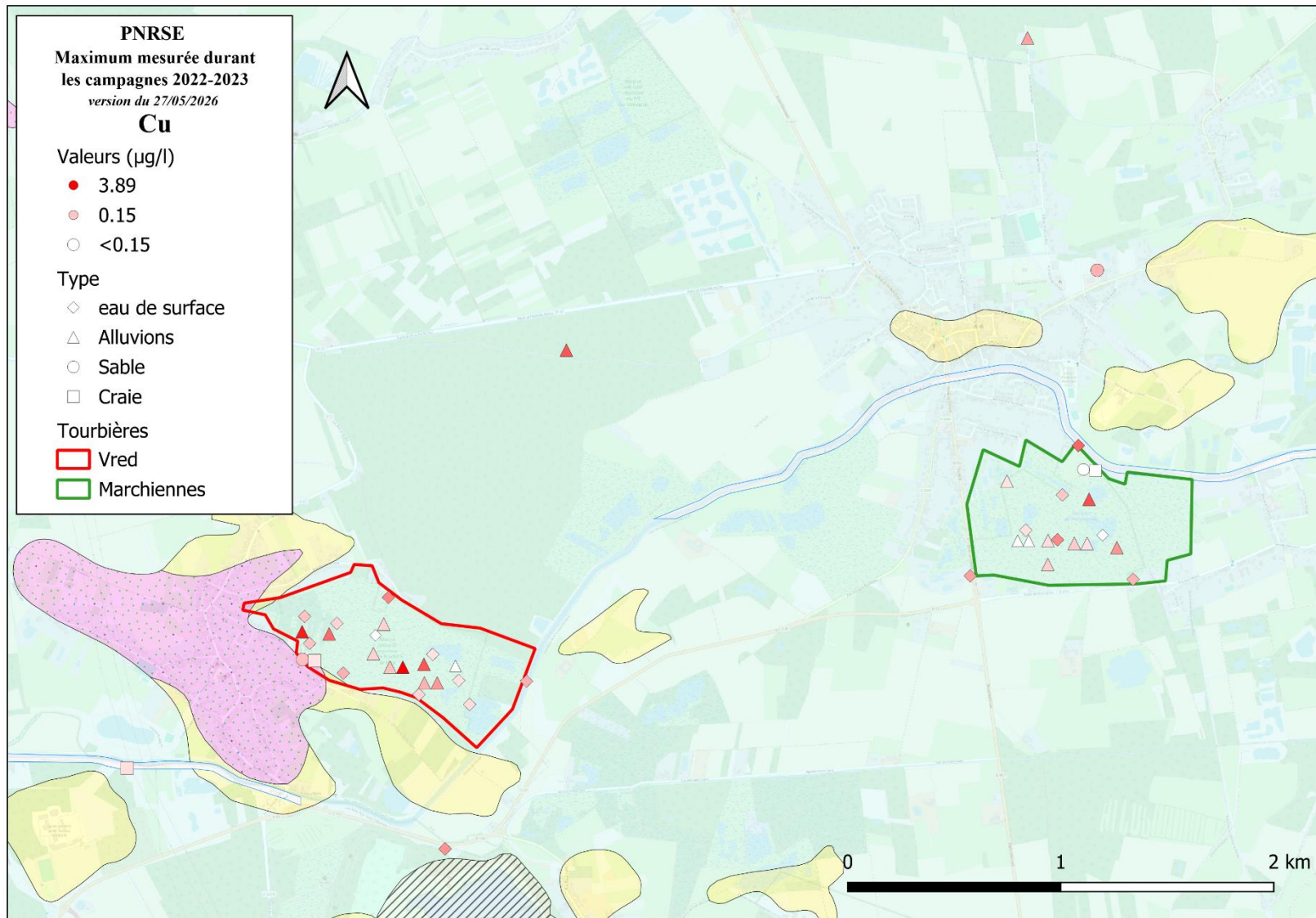


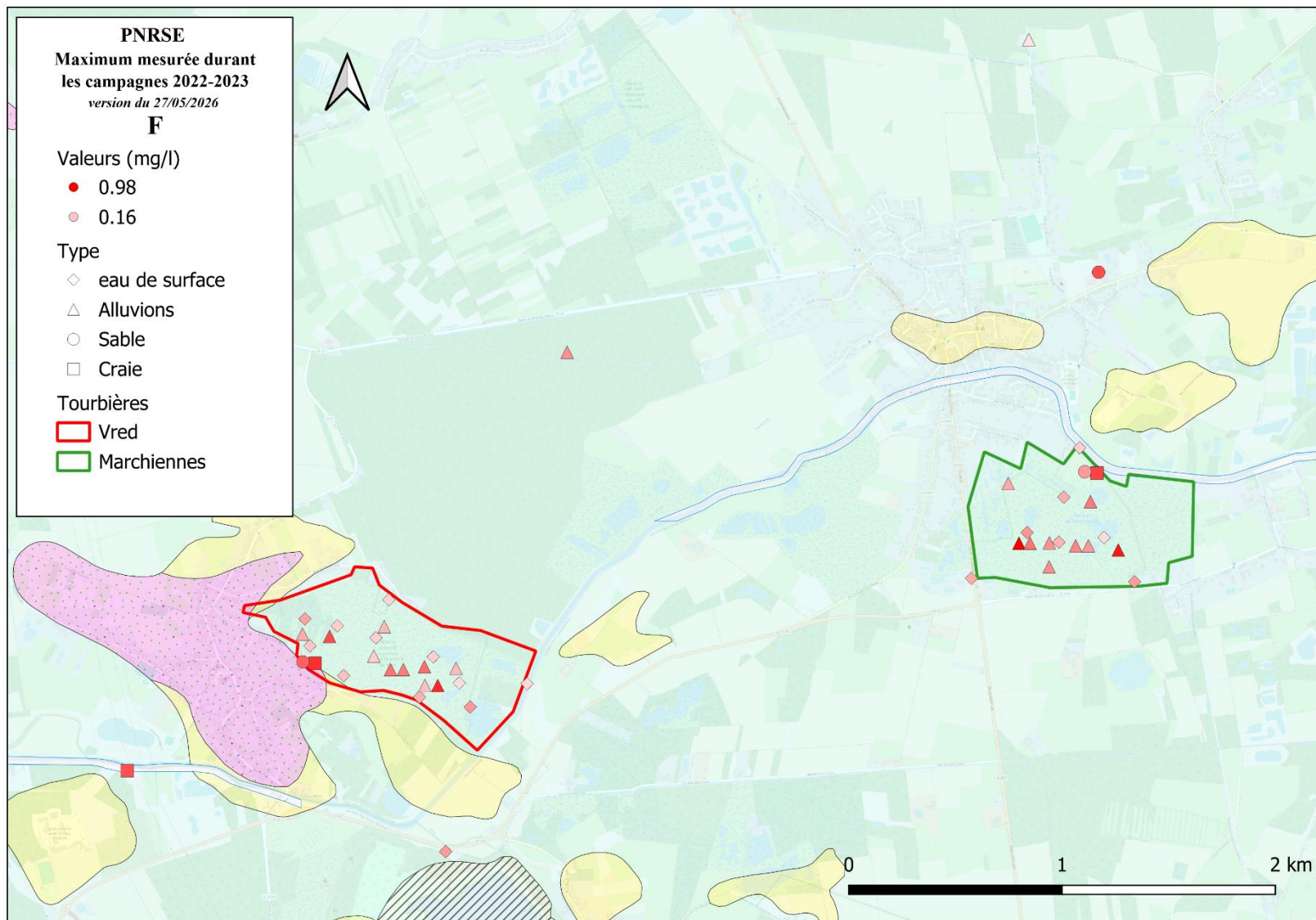


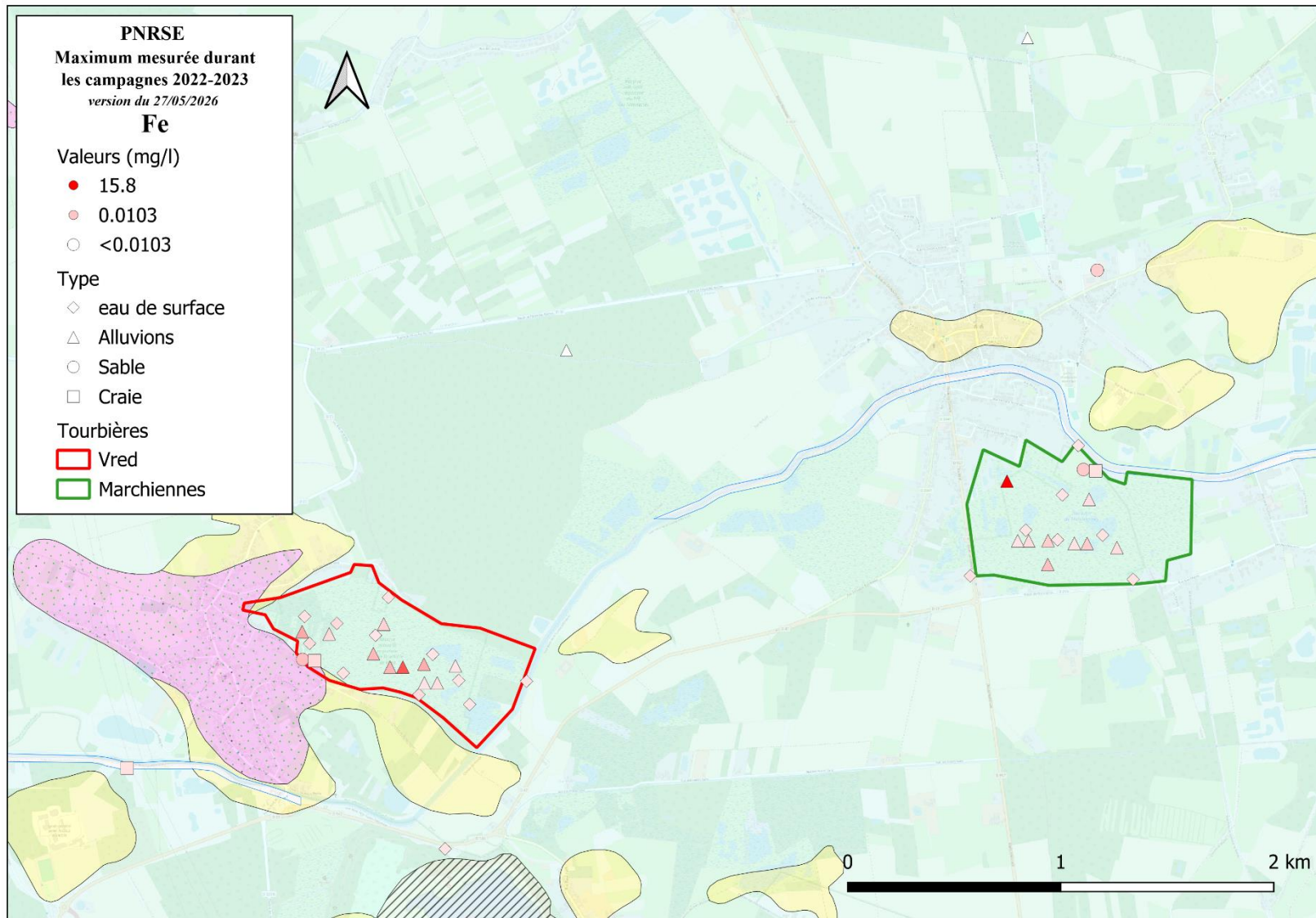


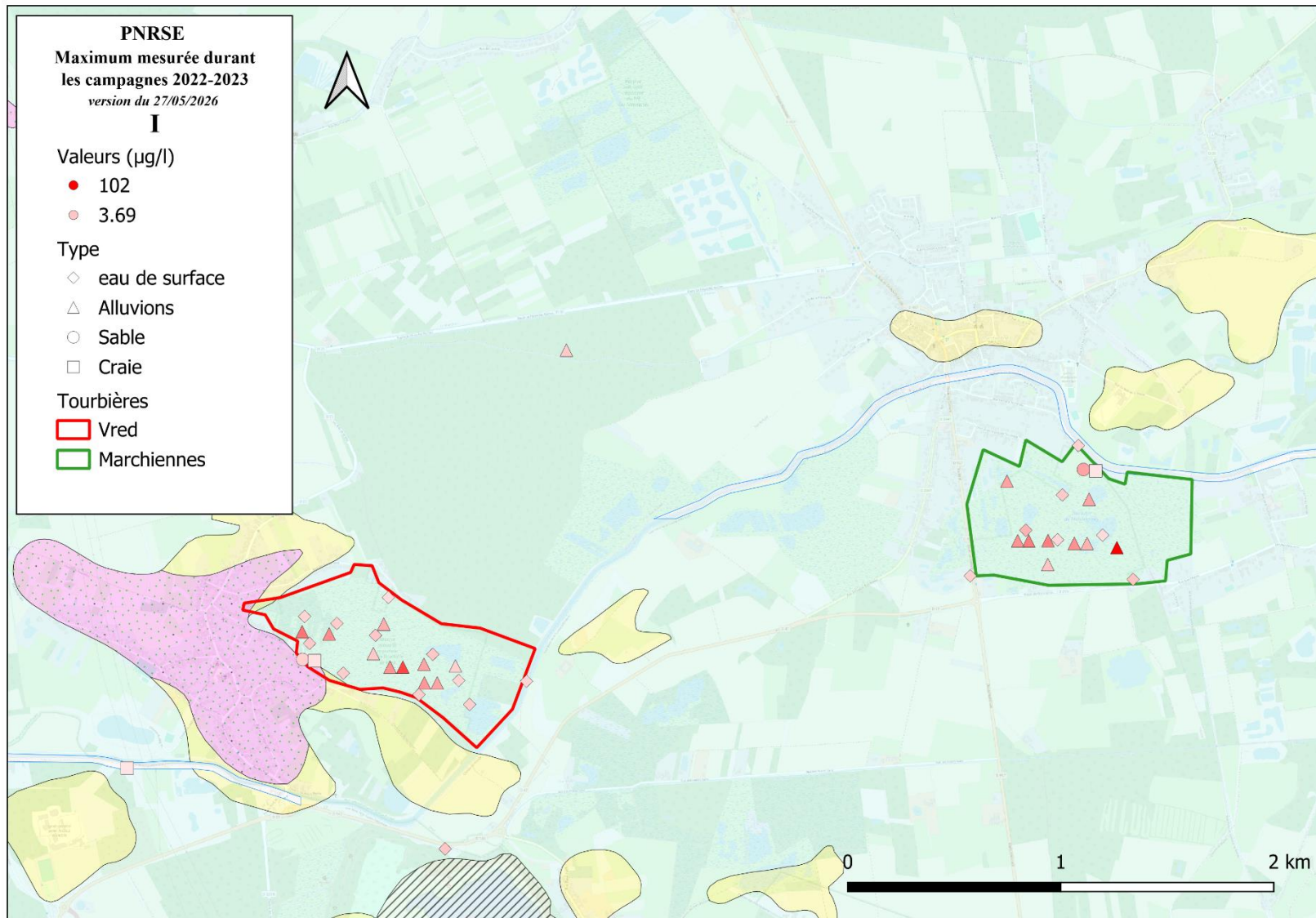


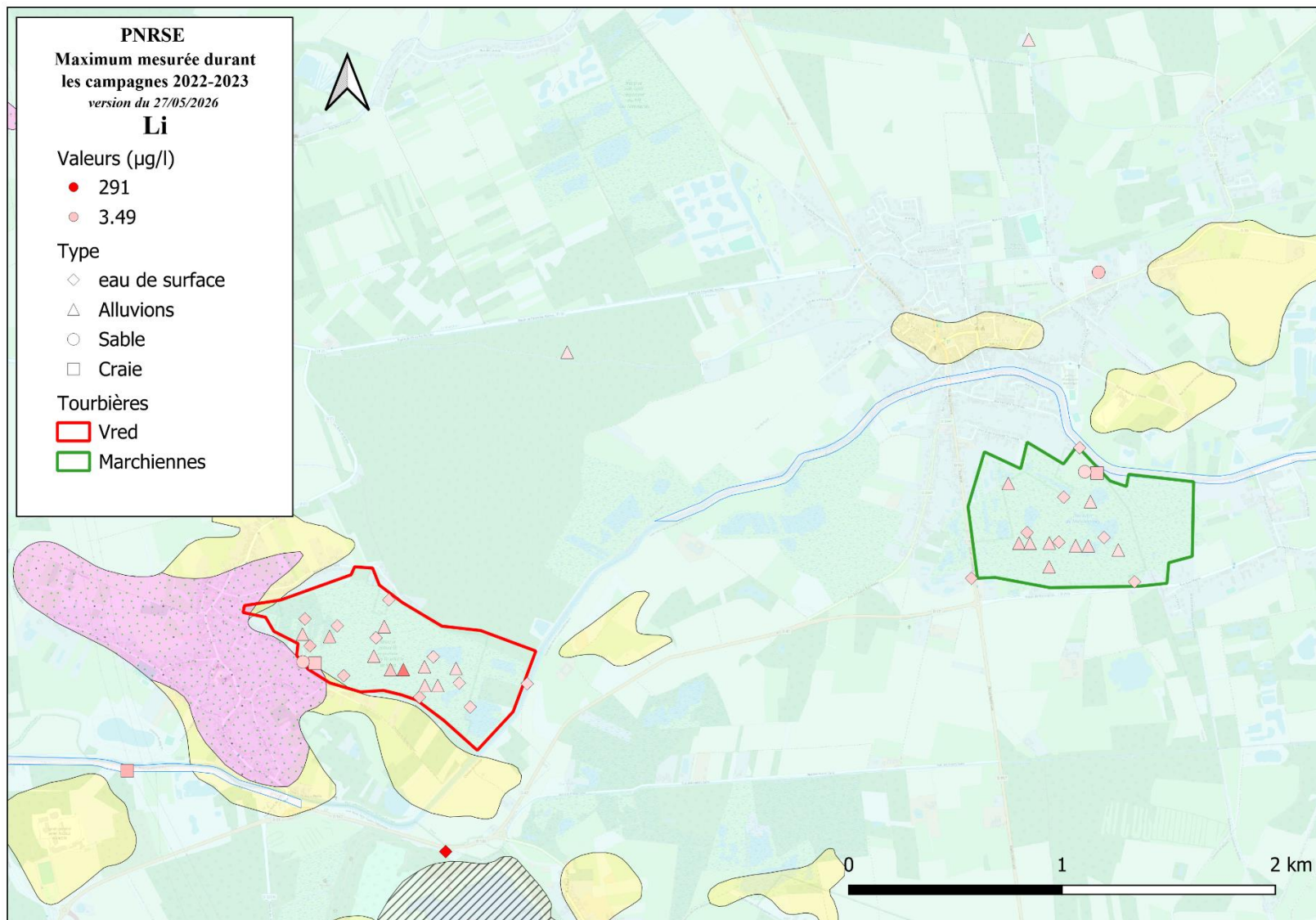


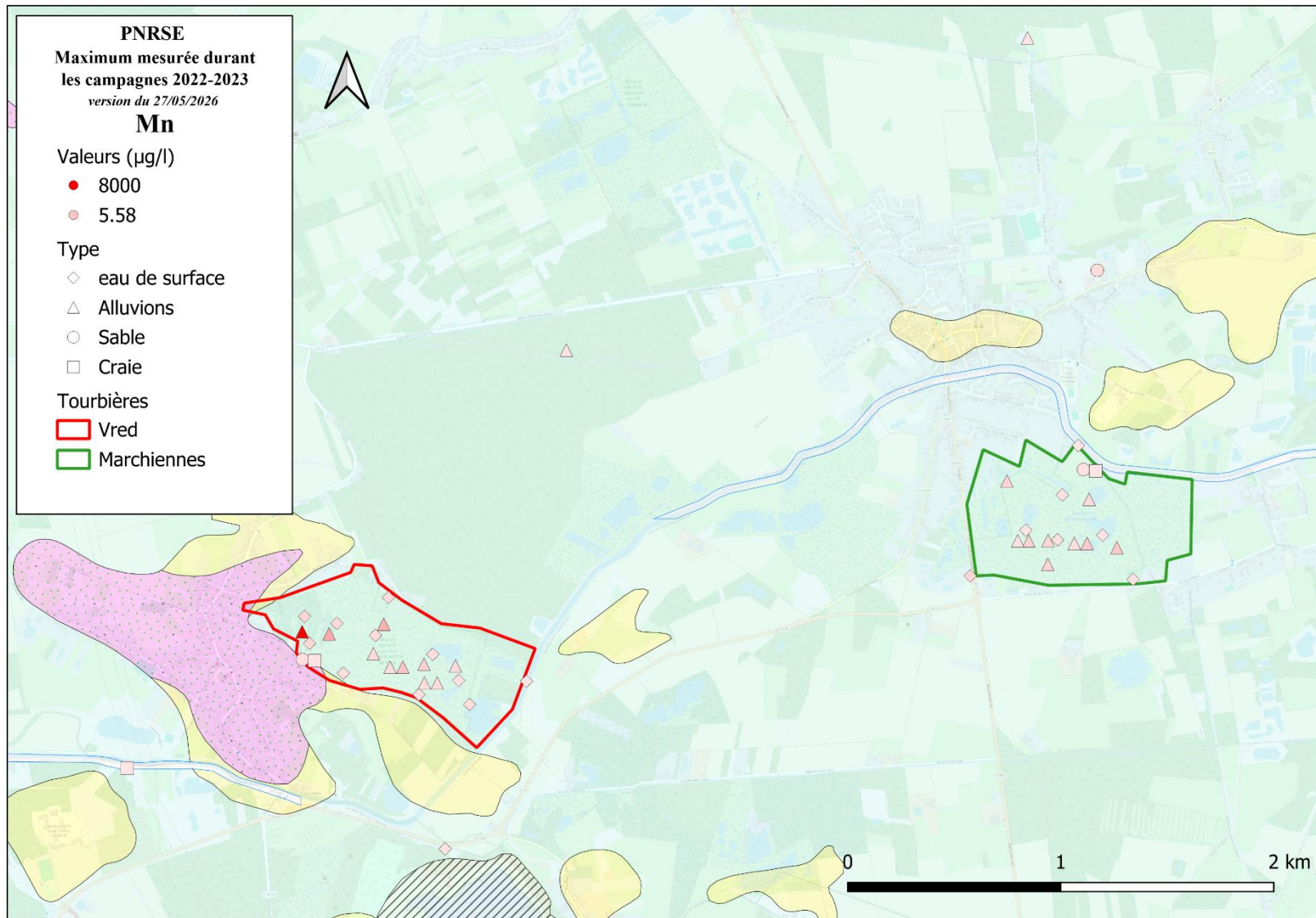


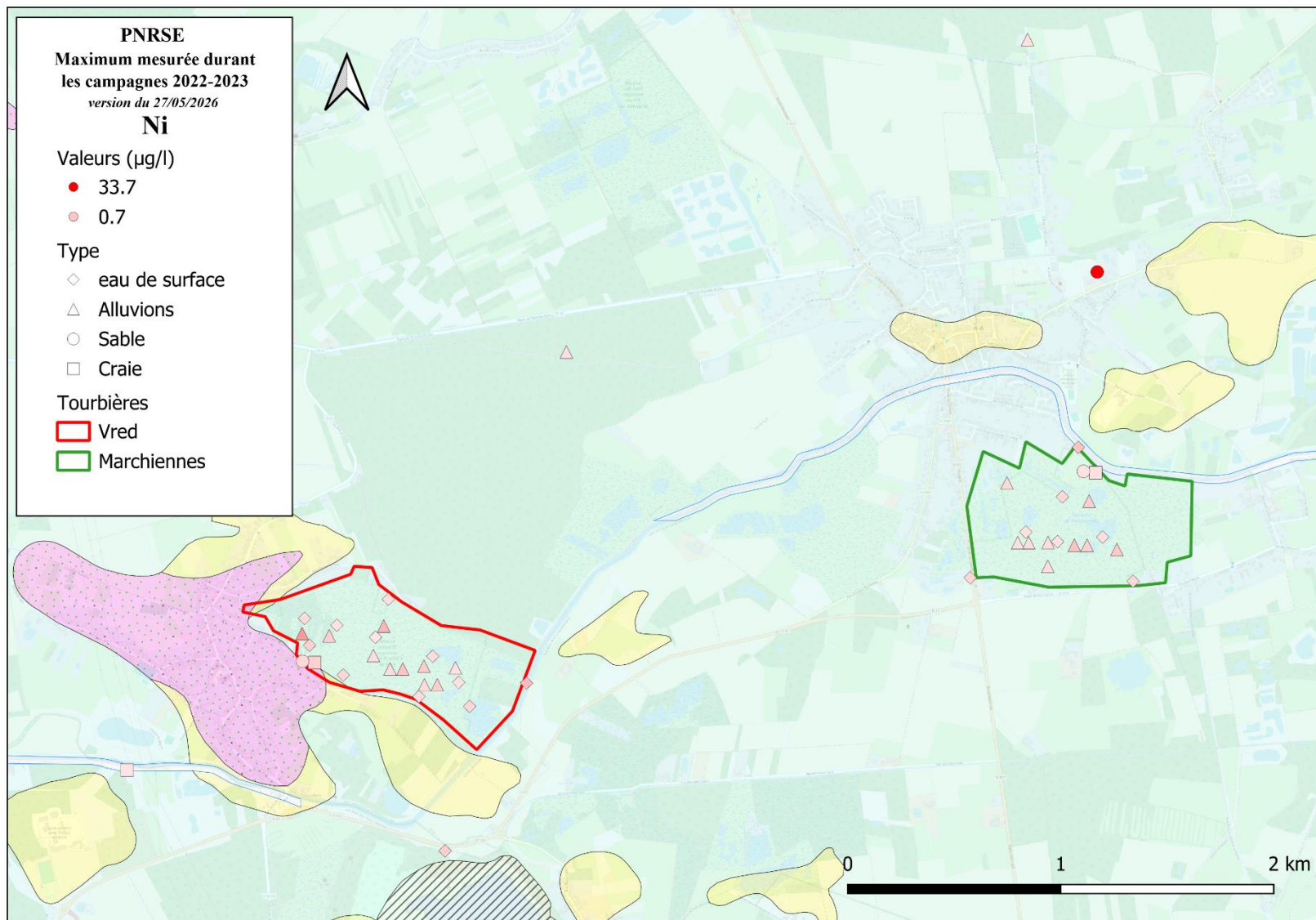


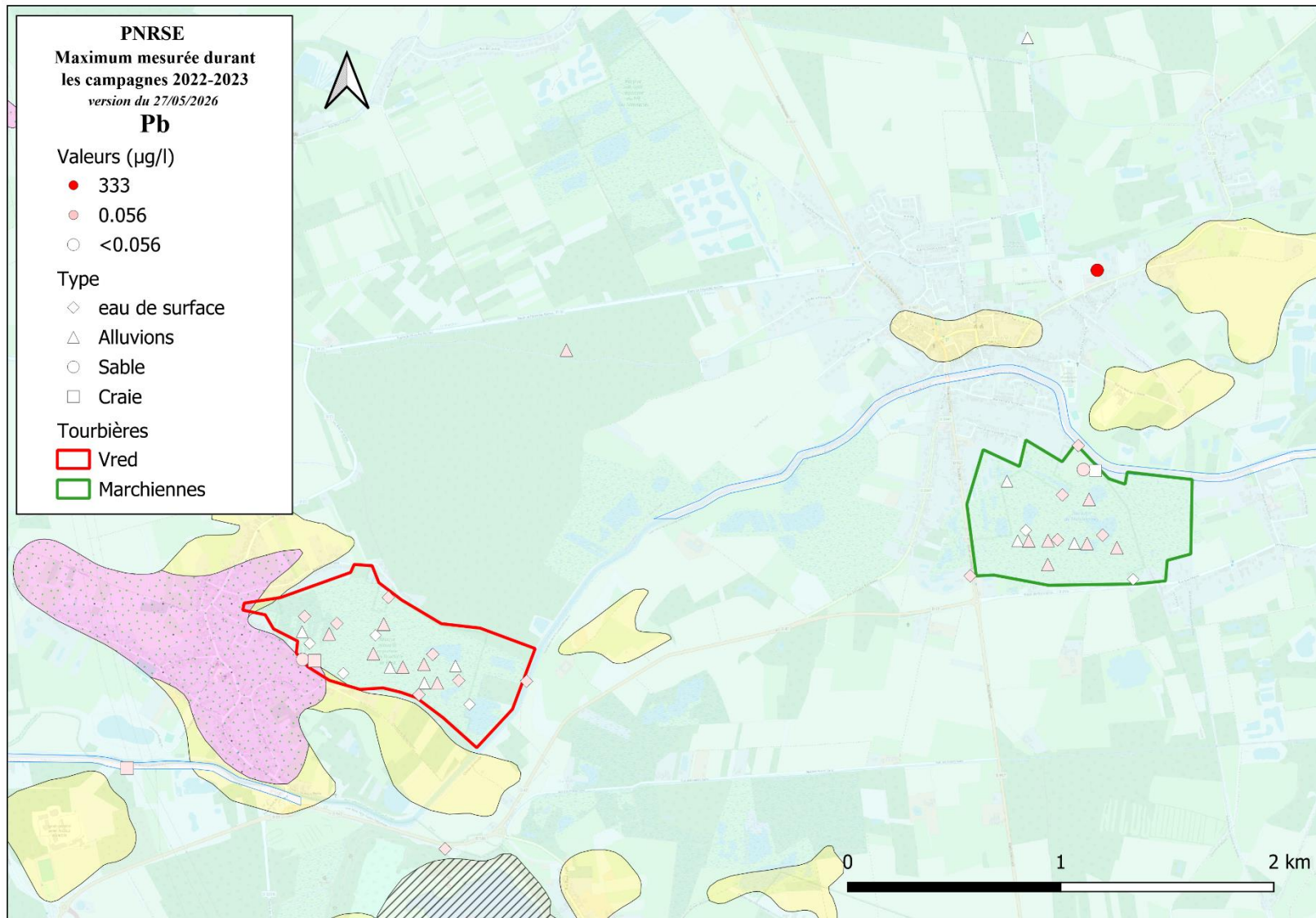


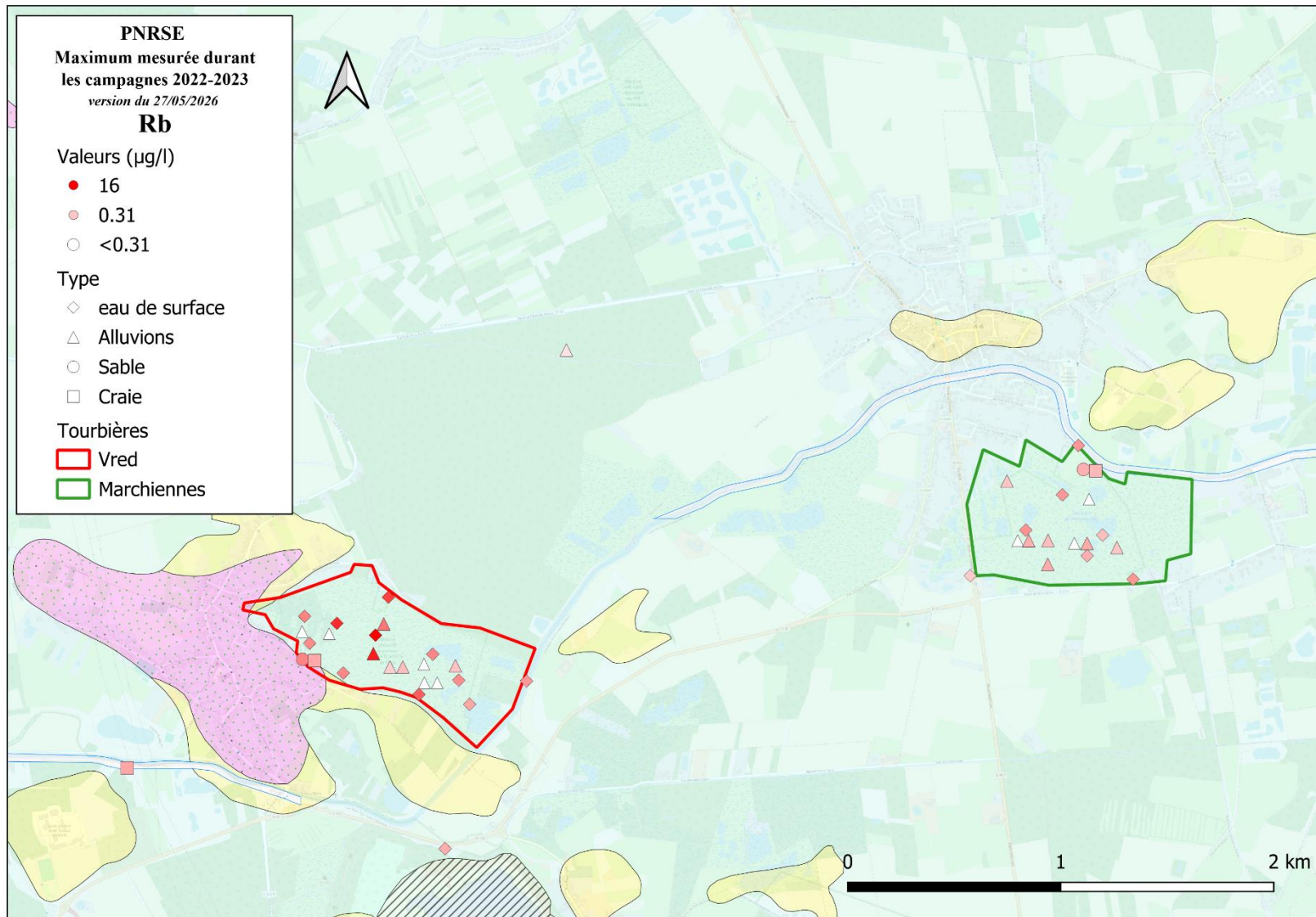


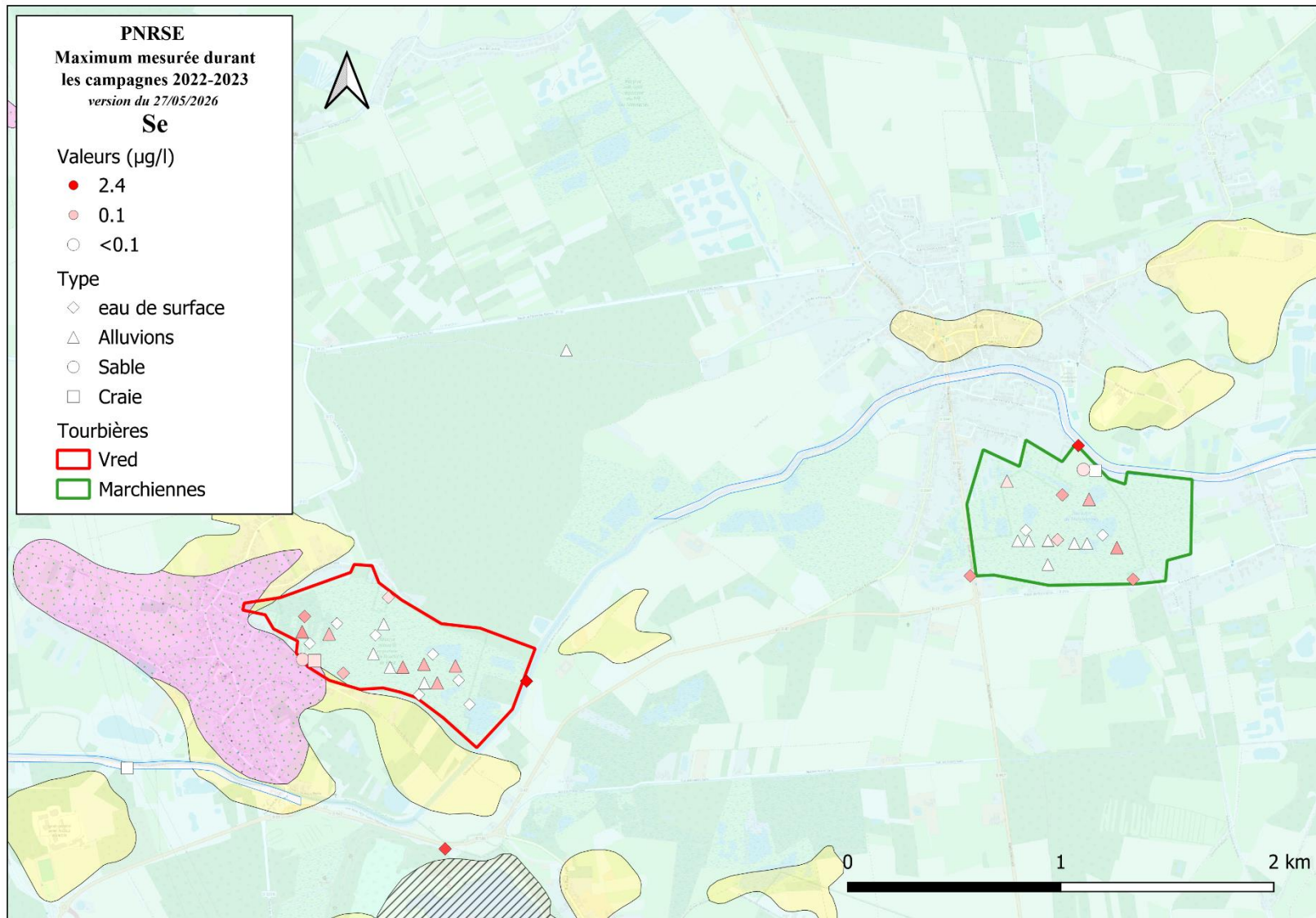


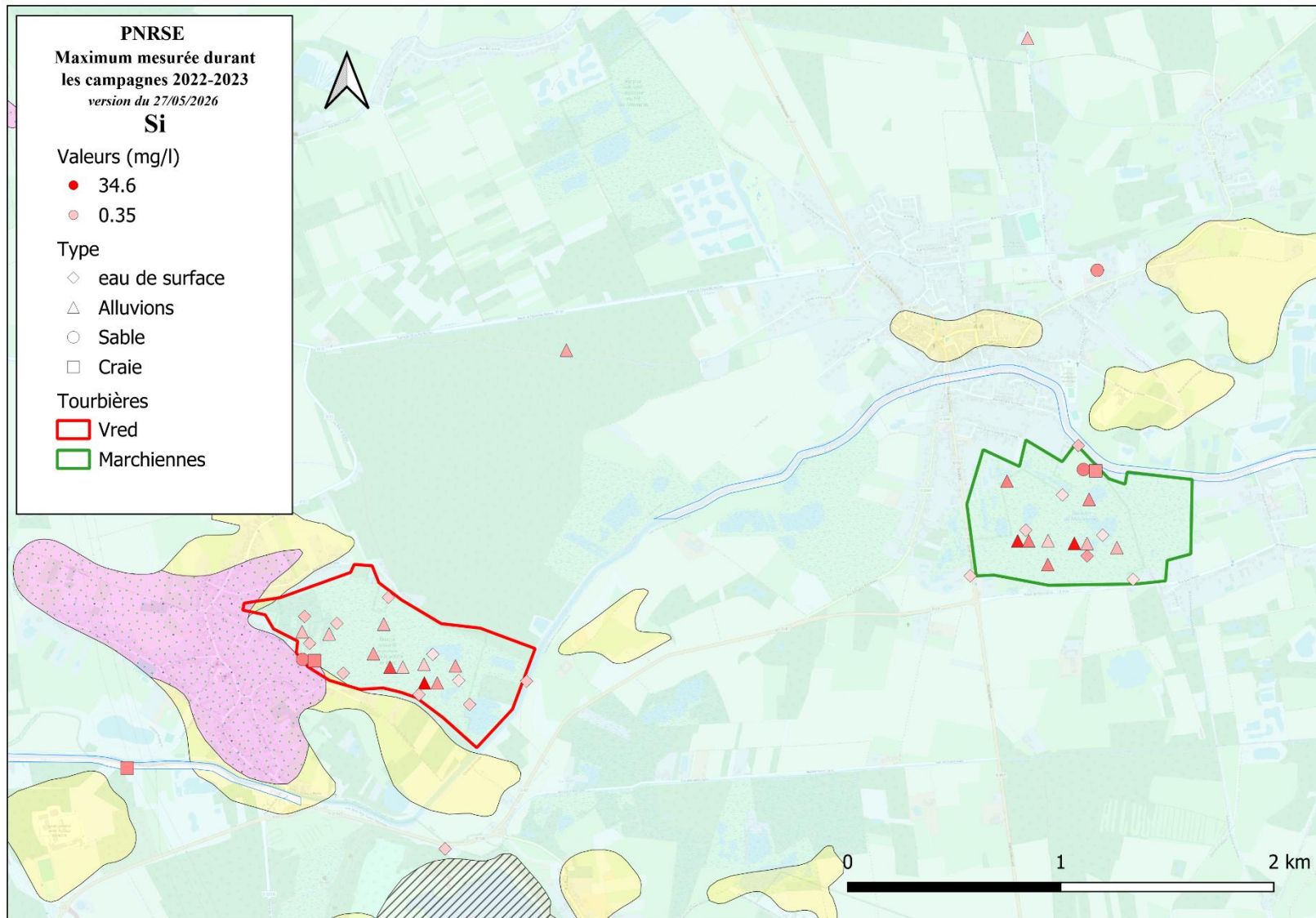


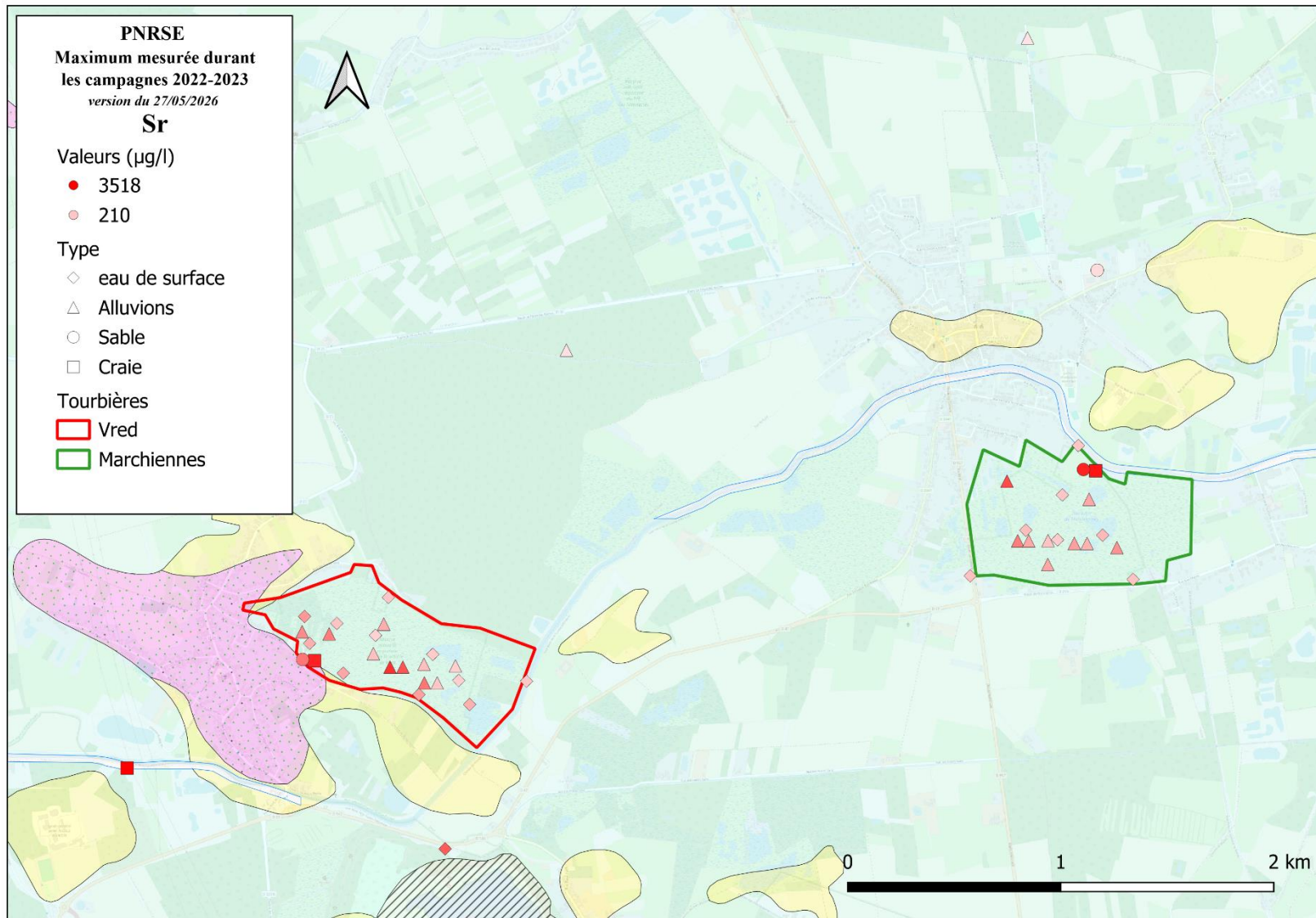


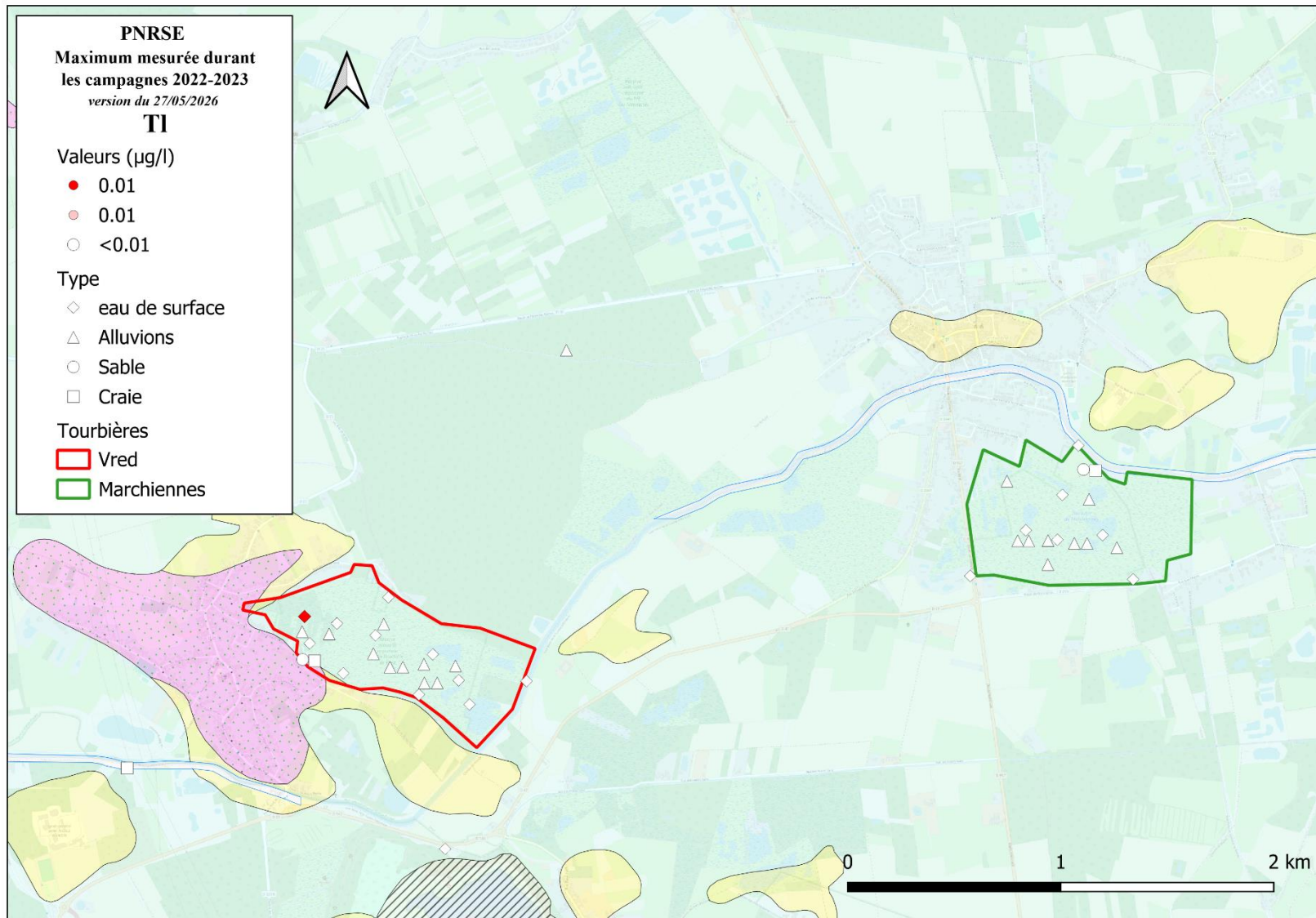


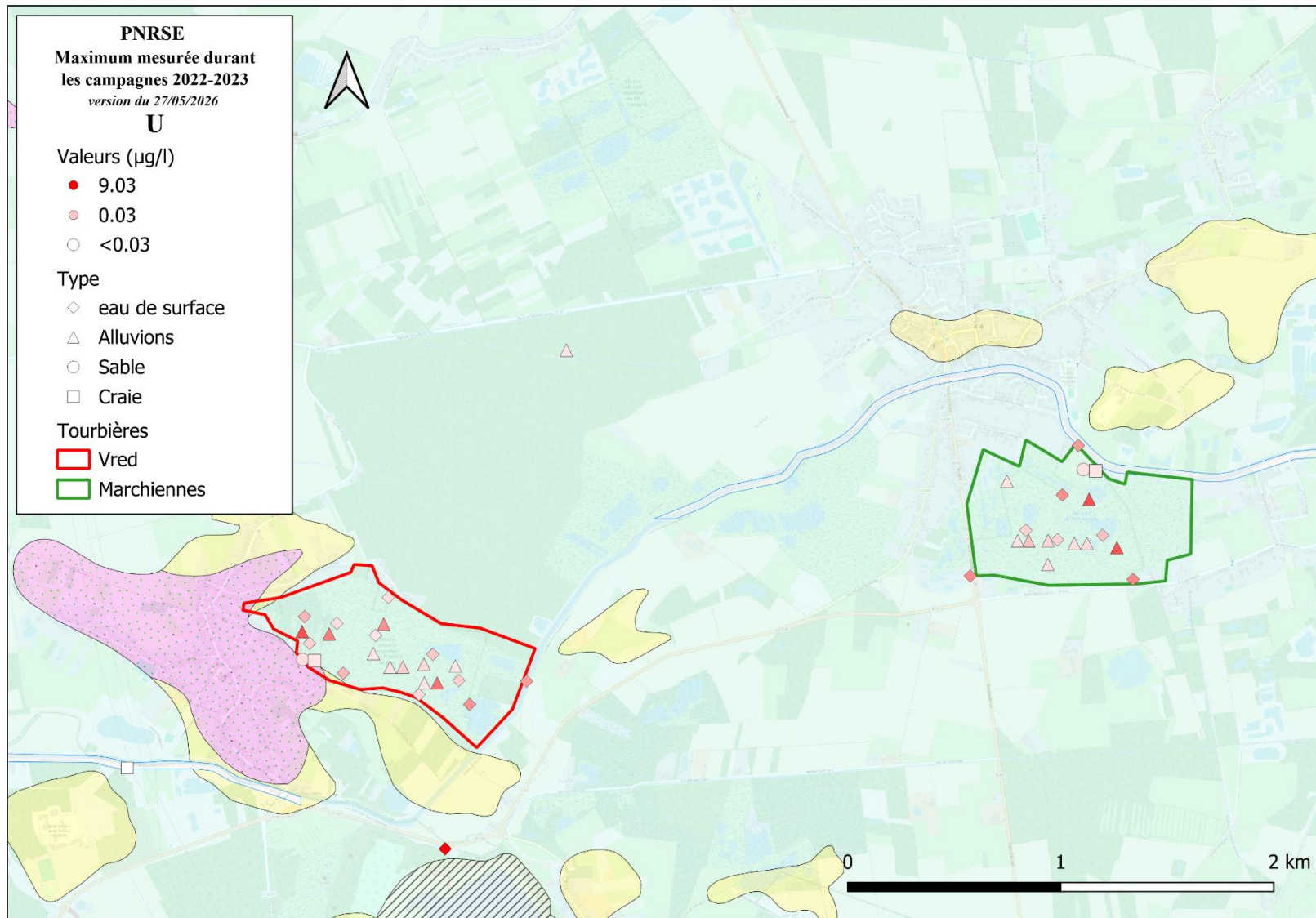


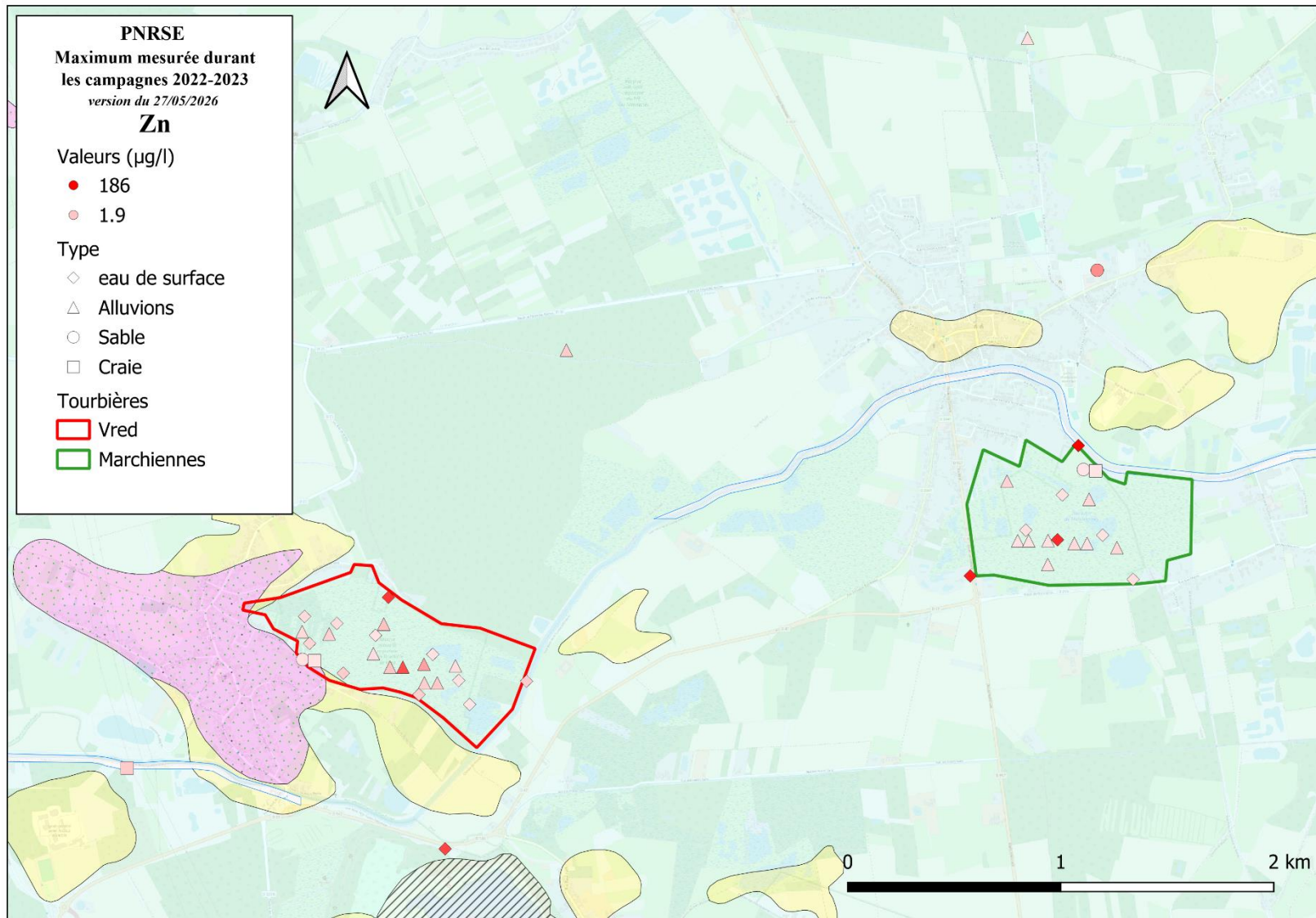














Direction régionale Hauts-de-France
2 rue des Peupliers BP 1040659814
Tél. : 03.20.19.15.40
www.brgm.fr