



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de restauration des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche (Moulins)

Rapport final

BRGM/RP-72339-FR

Version 0 du 16 janvier 2023

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public BRGM

F. Lucassou, J.-M. Schroëtter, F. Koch avec la collaboration de G. Deray, A. Debel, M. Escudier (EPTB Vilaine)

Vérificateur :	
Nom :	Bruno MOUGIN
Fonction :	Hydrogéologue
Date :	14/12/2022
Signature :	

Approbateur :	
Nom :	Pauline DRZEWIECKI
Fonction :	Directrice du BRGM Bretagne
Date :	16/01/2023
Signature :	

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

Ce rapport a été réalisé en partenariat avec :



Avertissement

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

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers 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 : hydrogéologie, géologie, carte piézométrique, formation superficielle, Bretagne, Ille-et-Vilaine, Moulins, Seiche, Quincampoix

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

F. Lucassou, J.-M. Schroëtter, F. Koch avec la collaboration de G. Deray, A. Debel, M. Escudier (EPTB Vilaine) (2023) – ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de restauration des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche (Moulins). Rapport final V0. BRGM/RP-72339-FR, 132 p.

© BRGM, 2023, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-20/01/2022

Synthèse

Le projet appelé « ANTISEICHE » (Apport des eaux souterraines pour les actions de restauration des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche – secteur de Moulins (35)) a été co-construit par le Syndicat Mixte du bassin versant de la Seiche, ayant intégré l'Établissement Public Territorial de Bassin (EPTB) Vilaine au 01/01/2022, et le BRGM afin d'appréhender les interactions entre les aquifères de socle, les cours d'eau et les zones humides dans le bassin versant de la Seiche (situé dans le département de l'Ille-et-Vilaine). Ce projet a été déposé dans le cadre de l'Appel à contributions 2020-2021 de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne (AELB) concernant l'innovation dans les contrats territoriaux de bassins versants et a bénéficié du financement de l'AELB, du Conseil départemental d'Ille-et-Vilaine, de l'EPTB Vilaine et du BRGM.

La Seiche et ses affluents subissent des étiages sévères récurrents. Les étiages naturellement faibles sur ce territoire sont accentués par diverses problématiques constatées par l'EPTB Vilaine : dégradation des cours d'eau (recalibrage), drainage des terrains agricoles, assèchements de zones humides, régression du bocage favorisant le ruissellement à l'infiltration de l'eau de pluie.

Le projet ANTISEICHE a pour objectif d'identifier et de caractériser les aquifères de socle situés autour de la commune de Moulins (35), traversée par un affluent de la Seiche, la Quincampoix. Il s'agit d'un secteur stratégique pour l'EPTB Vilaine : de fortes dégradations anthropiques (drainage, assèchement de zones humides, ...) des milieux aquatiques y ont été constatées et sur lequel l'EPTB Vilaine souhaite mettre en place des actions ambitieuses de restauration des milieux aquatiques (restauration de zones humides drainées, réhabilitation hydromorphologique du lit mineur), des actions sur le bocage (talus plantés en rupture de pente), et des actions agricoles (échanges parcellaires, préemption environnementale, substitution aux forages existants, etc.). L'objectif du projet ANTISEICHE est de disposer d'une cartographie pouvant servir de base pour définir des secteurs où, dans le cadre de la restauration des milieux aquatiques, des actions spécifiques pourraient être entreprises, notamment le retrait de drains, dans le but d'améliorer les infiltrations d'eau de pluie vers l'eau souterraine dans ces secteurs sans toutefois limiter les possibilités d'exploitation agricole, afin d'améliorer la contribution des eaux souterraines à l'étiage des cours d'eau du secteur.

Une première phase du projet a consisté à acquérir des données hydrogéologiques (piézométrie hautes et basses eaux, qualité de l'eau souterraine, volumes d'eau souterraine prélevés), géologiques (cartographie des altérites et de la fracturation), et hydrologiques (débit des cours d'eau, qualité des cours d'eau) sur le secteur d'étude.

Une analyse multicritère a ensuite été réalisée à partir de 3 paramètres (épaisseur de la zone non saturée, pente des terrains et formations géologiques) et a ainsi permis de définir les secteurs les plus favorables à l'infiltration d'eau et au retrait de drains.

Les données récoltées ont permis de réaliser quatre cartes sur le secteur d'étude :

- une carte géologique de détail (formations superficielles et caractérisation des zones argileuses) à l'échelle 1/10 000,
- deux cartes piézométriques (hautes et basses eaux),

- une carte interprétative des secteurs favorables à l'infiltration (« indice ANTISEICHE »), réalisée grâce à une analyse multicritère à partir de 3 paramètres (épaisseur de la zone non saturée, pente des terrains et formations géologiques).

Compte tenu des informations utilisées et de leurs échelles de validité, une telle cartographie doit être considérée comme indicative. En particulier, elle ne doit pas être utilisée à une échelle inférieure au 1/10 000.

Ces cartes pourront être confrontées aux données de l'EPTB Vilaine sur la dégradation des têtes de bassins versants pour envisager un programme de reconquête.

La carte de l'indice ANTISEICHE permet d'avoir une vision homogène sur le secteur d'étude des secteurs les plus favorables à l'infiltration. Elle pourra permettre d'orienter les actions à mettre en œuvre et le choix des secteurs prioritaires sur lesquels le retrait de drains pourrait être envisagé.

Le projet ANTISEICHE a permis de définir les données essentielles à acquérir pour pouvoir décliner cette étude dans d'autres bassins versants. Un suivi des actions qui seront mises en place sera nécessaire afin d'évaluer leurs bénéfices sur les eaux souterraines et le débit des cours d'eau.

Il serait intéressant d'appliquer cette méthodologie sur un bassin versant instrumenté (suivi du débit de la rivière et suivi piézométrique existants) afin d'évaluer l'efficacité des actions mises en œuvre.

Sommaire

1. Introduction	11
1.1. Contexte du projet	11
1.2. Objectifs	12
1.3. Secteur d'étude	12
1.4. Contexte géologique	15
1.5. Contexte hydrogéologique	18
1.6. Méthodologie proposée	23
2. Acquisition de données géologiques, hydrogéologiques et hydrologiques	27
2.1. Caractérisation des formations géologiques superficielles	27
2.1.1. <i>La cartographie des altérites</i>	27
2.1.2. <i>La caractérisation de l'argilosité</i>	31
2.2. Données hydrologiques	35
2.2.1. <i>Evaluation des écoulements superficiels</i>	35
2.2.2. <i>Campagnes de jaugeages</i>	37
2.3. Cartes piézométriques	40
2.3.1. <i>Campagnes piézométriques</i>	40
2.3.2. <i>Validation des données piézométriques</i>	46
2.3.3. <i>Interpolation des cartes piézométriques</i>	47
2.3.4. <i>Clés de lecture des cartes piézométriques</i>	57
2.3.5. <i>Carte piézométrique de basses eaux</i>	58
2.3.6. <i>Carte piézométrique de hautes eaux</i>	58
2.3.7. <i>Indice de confiance</i>	61
2.3.8. <i>Sens d'écoulement et axes de drainage</i>	64
2.3.9. <i>Zone non saturée</i>	65
2.4. Qualité de l'eau	68
2.4.1. <i>Température</i>	70
2.4.2. <i>pH</i>	73
2.4.3. <i>Conductivité</i>	75
2.4.4. <i>Nitrates</i>	77
2.4.5. <i>Fer</i>	82
2.4.6. <i>Sulfates</i>	84
2.4.7. <i>Phosphore</i>	86
2.5. Evaluation des prélèvements en eau souterraine	86
2.5.1. <i>Source de données</i>	86
2.5.2. <i>Bilan des prélèvements d'eau</i>	88
2.6. Equipement de 3 points d'eau avec suivi piézométrique	90
3. Identification des secteurs propices à la suppression de drains	95
3.1. Méthodologie : analyse multicritère	95
3.2. Paramètres retenus et notes attribuées	95
3.2.1. <i>L'épaisseur de la zone non saturée en hautes eaux</i>	96
3.2.2. <i>Les pentes des terrains du secteur d'étude</i>	99
3.2.3. <i>Les formations géologiques</i>	100
3.3. Croisement des données	101
3.4. Comparaison avec les parcelles drainées	105
3.5. Suivis à mettre en place	109
3.6. Méthodologie simplifiée reproductible sur d'autres territoires	109
4. Conclusion	111

5. Bibliographie 113

Liste des illustrations

Illustration 1 : Localisation du secteur d'étude sur fond de carte IGN (1/25 000) 13

Illustration 2 : Plans d'eau et altérations du lit mineur sur le secteur d'étude (en blanc) – source : EPTB Vilaine..... 14

Illustration 3 : Altitudes sur le secteur d'étude (Modèle Numérique de Terrain 5 m – EPTB Vilaine) 15

Illustration 4 : Extrait de la carte géologique au 1/50 000, Feuille 354, La Guerche de Bretagne (Trautmann & Clément, 1997 ; Le nord parallèle à la bordure de carte) 16

Illustration 5 : Extrait de la coupe géologique au 1/50 000, Feuille n°354, La Guerche de Bretagne (modifiée d'après Trautmann & Clément, 1997)..... 17

Illustration 6 : Profil théorique de l'altération des roches au niveau du bassin versant de la Seiche, inspiré et adapté de Wyns, 1998, avec l'évolution de l'altération de la densités des fractures et de leur origine en fonction de la profondeur 17

Illustration 7 : A - Argiles d'altération sur un plateau au-dessus de schistes briovériens s.l. ; B - Coupe d'un talus de route à la limite isaltérite-allotérite ; C - Coupe d'un talus de route dans les allotérites et D – Cernes concentriques d'oxyde de fer dans les microdiorites du secteur caractéristique de la zone fissurée (pierres de structure de l'église de Moulins) 18

Illustration 8 : Profil d'altération stratiforme idéalisé dans les roches de type granitique, recoupé par la topographie, d'après Wyns et al., 1998 et Wyns et al., 2004 20

Illustration 9 : Moyenne des débits de la zone fissurée « utile » du profil d'altération en Bretagne (en m³/h) – Projet SILURES (Mougin et al., 2008a) 20

Illustration 10 : En haut, classement de 100 forages d'eau parmi les plus productifs en Bretagne par typologie hydrogéologique avec les effectifs de forages de chaque typologie et en bas, leur répartition en Bretagne (Schroetter et al., 2020). 21

Illustration 11 : Photographies dans une ancienne carrière du secteur de la typologie n°6 – A : Faille N150 avec un pendage de 70 à 80° Ouest, qui recoupe une alternance de grès et argilites, tapissée de mousses soulignant les circulations d'eaux souterraines ; B – Détail de la fracturation du massif rocheux avec des fractures satellites NS verticales et N150 d'inclinaison 70 à 80° Ouest, qui drainent l'eau superficielle vers les eaux souterraines (©BRGM) 22

Illustration 12 : Contribution globale annuelle des eaux souterraines à l'alimentation des rivières. Echelle : 1/250 000 (Mougin et al., 2008)..... 23

Illustration 13 : A gauche – Schéma de principe de fonctionnement des drains agricoles (Perrey, 1981b ; A droite – Différents types de drains en fonction des périodes et régions (Perrey, 1981a) 23

Illustration 14 : Pourcentage des surfaces agricoles utiles drainées en Europe de l'ouest (Données résultant du croisement de différences sources : les déclarations des États membres de l'ICID (International Commission on Irrigation and Drainage), les bases de données FAO et la Banque mondiale)..... 24

Illustration 15 : Coupe schématique du secteur d'étude 25

Illustration 16 : Coupe géologique schématique. Ronds rouges correspondent aux affleurements importants relevés sur le terrain.	27
Illustration 17 : Relevés de terrain (BRGM, septembre 2021) sur le secteur d'étude (délimité en rouge) et annotations associées.	29
Illustration 18 : Nouvelle carte géologique BRGM au 1/10 000 du secteur d'étude.....	30
Illustration 19 : En haut, possibilité de savoir dans la BSS, si une coupe géologique est présente ou pas ; En bas, exemple de descriptions disponibles (Source : ©InfoTerre).	31
Illustration 20 : Description associée au RPA de 2021 (Source EPTB Vilaine).	32
Illustration 21 : Nouvelle carte géologique du projet avec les points complémentaires d'information sur l'argilosité des sols : Forages de la BSS – cercles bleus et RPA 2021 – losanges fonction de l'information de l'illustration 20.	32
Illustration 22 : Schéma de principe du levé aéroporté de la radiométrie spectrale gamma (radioactivité naturelle de la roche, Source : BRGM)	33
Illustration 23 : Superposition de la radiométrie spectrale gamma – Teneurs en potassium et de la cartographie du régolithe (des formations géologiques superficielles)	34
Illustration 24 : Evaluation de l'écoulement des eaux de surface pendant la campagne piézométrique de basses eaux (novembre 2020)	36
Illustration 25 : Localisation des jaugeages réalisés en mars 2021	38
Illustration 26 : Jaugeages au micromoulinet le 29/03/2021 (photographies BRGM)	39
Illustration 27 : Résultats des jaugeages réalisés sur la Quincampoix et ses affluents en mars 2021	40
Illustration 28 : Chronique piézométrique 2020 à Arbrissel (source : ADES).....	41
Illustration 29 : Localisation des points mesurés pendant la campagne piézométrique basses eaux et altitude de la nappe	42
Illustration 30 : Chronique piézométrique 2021 à Arbrissel (source : ADES).....	43
Illustration 31 : Localisation des points mesurés pendant la campagne piézométrique hautes eaux et altitude de la nappe	44
Illustration 32 : Nature des points d'eau mesurés pendant les campagnes piézométriques.....	45
Illustration 33 : Statistiques de profondeur de la nappe pendant les 2 campagnes piézométriques et du battement de la nappe.....	46
Illustration 34 : Principe de la modélisation d'une carte piézométrique sous GDM.....	47
Illustration 35 : Variogramme (en noir) et modèle de variogramme (en rouge) pour la campagne de basses eaux.....	49
Illustration 36 : Paramètres du modèle de variogramme pour la campagne de basses eaux....	49
Illustration 37 : Variogramme (en noir) et modèle de variogramme (en rouge) pour la campagne de hautes eaux.....	50
Illustration 38 : Paramètres du modèle de variogramme pour la campagne de hautes eaux	50
Illustration 39 : Principe de modélisation de la surface piézométrique en domaine de socle (Wyns et al., 2004)	51
Illustration 40 : Variogramme (en noir) et modèle de variogramme (en rouge) des résidus pour la campagne de basses eaux.....	52

Illustration 41 : Paramètres du modèle de variogramme des résidus pour la campagne de basses eaux.....	52
Illustration 42 : Variogramme (en noir) et modèle de variogramme (en rouge) des résidus pour la campagne de hautes eaux.....	53
Illustration 43 : Paramètres du modèle de variogramme des résidus pour la campagne de hautes eaux.....	53
Illustration 44 : Localisation des données utilisées pour l'interpolation de la carte piézométrique de basses eaux.....	55
Illustration 45 : Localisation des données utilisées pour l'interpolation de la carte piézométrique de hautes eaux	56
Illustration 46 : Exemple d'une carte piézométrique de la nappe du Lutétien en période de hautes eaux 2014 avec indication du sens d'écoulement général et des crêtes piézométriques (Bault et al., 2015).....	58
Illustration 47 : Carte piézométrique de basses eaux 2020	59
Illustration 48 : Carte piézométrique de hautes eaux 2021	60
Illustration 49 : Carte des écarts-types de krigeage pour la carte piézométrique de basses eaux	61
Illustration 50 : Carte des écarts-types de krigeage pour la carte piézométrique de hautes eaux	62
Illustration 51 : Carte des indices de confiance pour la carte piézométrique de basses eaux... ..	63
Illustration 52 : Carte des indices de confiance pour la carte piézométrique de hautes eaux	64
Illustration 53 : Epaisseur de la zone non saturée en basses eaux	66
Illustration 54 : Epaisseur de la zone non saturée en hautes eaux.....	67
Illustration 55 : Paramètres analysés sur site à chaque campagne de terrain	68
Illustration 56 : Nombre de points de prélèvements.....	68
Illustration 57 : Points eau de surface et eau souterraine sur lesquels des analyses d'eau ont été réalisées lors des différentes campagnes	69
Illustration 58 : Evolution des températures mesurées dans les eaux souterraines (à gauche) et dans les eaux de surface (à droite) lors des 3 campagnes de mesures	71
Illustration 59 : Evolution des températures mesurées dans les eaux de surface (triangles) et les eaux souterraines (carrés) lors des 3 campagnes de mesures	72
Illustration 60 : Evolution du pH mesuré dans les eaux souterraines (à gauche) et dans les eaux de surface (à droite) lors des 3 campagnes de mesures.....	74
Illustration 61 : Evolution de la conductivité mesurée dans les eaux de surface (triangles) et les eaux souterraines (carrés) lors des 3 campagnes de mesures	76
Illustration 62 : Evolution des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines en fonction de la profondeur des ouvrages	78
Illustration 63 : Evolution des teneurs en nitrates mesurées dans les eaux de surface (triangles) et les eaux souterraines (carrés) lors des 3 campagnes de mesures.....	79
Illustration 64 : Evolution des teneurs en nitrates mesurées dans les eaux de surface (en haut) et les eaux souterraines (en bas) lors des 3 campagnes de mesures	80

Illustration 65 : Carte globale de l'évolution des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines et les eaux de surface entre juillet 2020, novembre 2020 et mars 2021	81
Illustration 66 : Evolution des concentrations en fer mesurées dans les eaux de surface (triangles) et les eaux souterraines (carrés) lors des 3 campagnes de mesures	83
Illustration 67 : Evolution des concentrations en sulfates mesurées dans les eaux de surface (triangles) et les eaux souterraines (carrés) lors des 3 campagnes de mesures.....	85
Illustration 68 : Diagramme binaire nitrates-phosphates dans les eaux souterraines (campagne de juillet 2020).....	86
Illustration 69 : Evolution des volumes prélevés sur le secteur d'étude entre 2008 et 2020 (source : BNPE)	87
Illustration 70 : Détail par volume et usage des 35 points d'eau recensés dans la BSS sur le secteur d'étude.....	88
Illustration 71 : Localisation des prélèvements d'eau recensés sur le secteur d'étude (source de données : BNPE et BSS).....	89
Illustration 72 : Localisation des 3 puits équipés pour un suivi piézométrique en continu.....	91
Illustration 73 : Caractéristiques des 3 puits équipés pour un suivi piézométrique en continu...	91
Illustration 74 : Chroniques piézométriques des 3 ouvrages équipés sur le secteur d'étude, du piézomètre d'Arbrissel et chronique de précipitations à Arbrissel sur la période juillet 2021-novembre 2022 (octobre 2022 pour la pluviométrie).....	92
Illustration 75 : Chronique piézométrique 2021-2022 à Arbrissel (source : ADES).....	92
<i>Illustration 76 : Extrait « Les ouvrages d'infiltration et la fonction filtration - recommandations à l'usage des gestionnaires – GESSOL, 2015»</i>	<i>97</i>
Illustration 77 : Cartographie des notes attribuées pour l'épaisseur de la zone non saturée	98
Illustration 78 : Cartographie des notes attribuées pour le paramètre « pente »	100
Illustration 79 : Cartographie des formations superficielles sur le secteur d'étude et note associée en fonction de la présence d'argile	101
Illustration 80 : Influence des paramètres sur les différents compartiments	102
Illustration 81 : Tableau récapitulatif des notes attribuées à chaque paramètre.....	102
Illustration 82 : Cartographie de l'indice ANTISEICHE sur le secteur d'étude sur fond IGN scan 25.....	104
Illustration 83 : Localisation des parcelles drainées sur le territoire d'étude (source : EPTB Vilaine, d'après photographies aériennes, données CTMA, RPA 2021 et DPR2).....	106
Illustration 84 : Parcelles drainées et écoulements constatés dans les cours d'eau en novembre 2020	107
Illustration 85 : Superposition de la cartographie de l'indice ANTISEICHE, des zones humides et des parcelles drainées.....	108
Illustration 86 : Données à acquérir pour reproduire le même type d'étude sur d'autres bassins versants	110

Liste des annexes

Annexe 1 Fiche de terrain et exemple de résultats	115
---	-----

Annexe 2 Géostatistique et interpolation par la géostatistique	119
Annexe 3 Analyses réalisées sur les eaux de surface et les eaux souterraines en juillet 2020, novembre 2020 et mars 2021 (données EPTB Vilaine).....	129

1. Introduction

1.1. CONTEXTE DU PROJET

La Seiche est une rivière qui s'écoule de l'Est vers l'Ouest, sur 97,3 km, depuis le département de la Mayenne (Pays de la Loire) vers celui de l'Ille-et-Vilaine en région Bretagne. Il s'agit d'un affluent de la Vilaine dont la longueur du linéaire est d'environ 97,3 km.

La Seiche et ses affluents subissent des étiages sévères récurrents. Les étiages naturellement faibles sur ce territoire sont accentués par diverses problématiques constatées par le Syndicat Mixte du bassin versant de la Seiche (SMBV Seiche), ayant intégré l'Etablissement Public Territorial de Bassin (EPTB) Vilaine au 01/01/2022 : dégradation des cours d'eau (recalibrage), drainage des terrains agricoles, assèchement de zones humides, régression du bocage favorisant le ruissellement à l'infiltration de l'eau de pluie.

Cette problématique des débits d'étiage a des conséquences non négligeables sur la qualité de l'eau de surface et sur la biodiversité des cours d'eau, et ce en particulier dans le contexte actuel de changement climatique. Les têtes de bassin versant, qui représentent 70% de la surface du bassin versant de la Seiche, sont les principaux contributeurs des débits d'étiage du cours d'eau, avec une forte hétérogénéité sur la capacité de stockage souterrain : il est donc important de cibler les travaux de restauration des milieux aquatiques sur les têtes de bassin versant les plus contributrices aux débits d'étiage.

Récemment, le BRGM, à travers le programme ANAFORE : ANALYse multicritère des données de FORages les plus productifs de bretagne (Schroëtter et al., 2020) et la définition des Zones Potentiellement Productives (ZPP) en eaux souterraines en Bretagne, a mis en évidence par combinaison de l'information géologique des failles, de la nature des roches et des surfaces d'altération, la présence d'aquifères qui n'avaient jusqu'à présent pas été scientifiquement reconnus. Ces avancées ont suscité l'intérêt du SMBV Seiche, qui a pour objectif global l'atteinte du bon état écologique sur les 16 masses d'eau de surface du bassin versant, en améliorant la qualité des eaux de surface et en restaurant les milieux aquatiques.

Pour ce faire, il souhaite mener des actions plus efficaces de restauration des zones humides qui seraient notamment importantes : 1) pour la préservation et la reconquête de la qualité de l'eau (fonctions épuratrices), 2) pour réduire les étiages sévères de la Seiche en leur redonnant notamment une fonction de « réservoir » tampon (valable également en période de crue), et 3) pour préserver et restaurer la biodiversité des milieux fragiles. Dans ce cadre, l'ex-SMBV Seiche (qui sera désigné par « EPTB Vilaine » dans la suite de ce rapport) a proposé au BRGM Bretagne de co-construire un projet qui permettra de caractériser et d'appréhender les interactions entre les aquifères de socle et les cours d'eau et zones humides, jusqu'à maintenant peu étudiées sur ce bassin versant, afin de mieux cibler certaines actions destinées à améliorer la recharge naturelle des aquifères. Ce ciblage permettra d'optimiser les phases de concertation avec les propriétaires et les exploitants agricoles concernés par ces actions et d'améliorer l'efficacité des actions mises en œuvre.

Ce projet, intitulé « ANTISEICHE » (Apport des eaux souterraines pour les actions de restauration des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche), s'est focalisé sur le secteur de Moulins (en Ille-et-Vilaine), traversé par un affluent de la Seiche, la Quincampoix.

Ce projet a été déposé dans le cadre de l'Appel à contributions 2020-2021 de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne concernant l'innovation dans les contrats territoriaux de bassins versants et a été

financé par l'AELB, le Conseil départemental d'Ille-et-Vilaine, l'EPTB Vilaine et le BRGM. En effet, le bassin versant de la Seiche bénéficie d'un contrat territorial sur la période 2019-2024 et le programme de travaux de restauration des milieux aquatiques 2019-2024 cible ses actions sur les têtes de bassin versant de 5 masses d'eau de surface prioritaires, dont celle de la Quincampoix.

1.2. OBJECTIFS

Le projet ANTISEICHE a pour objectifs d'identifier et de caractériser les aquifères de socle pertinents situés sur des secteurs stratégiques pour l'EPTB Vilaine, sur le bassin de la Seiche, en têtes de bassin versant, sur lesquels de fortes dégradations anthropiques (drainage agricole, assèchement de zones humides, ...) des milieux aquatiques ont été constatées. Sur ces secteurs, pourront ensuite être réalisées des actions ambitieuses de restauration des milieux aquatiques par l'EPTB Vilaine (restauration de zones humides drainées, réhabilitation hydromorphologique du lit mineur), des actions sur le bocage (talus plantés en rupture de pente), et des actions agricoles (échanges parcellaires, préemption environnementale, substitution aux forages existants, etc.).

Afin de mieux appréhender le fonctionnement hydro(géo)logique du secteur d'étude, différentes investigations sur le terrain ont été menées. L'ensemble des informations acquises ont ensuite été confrontées afin de proposer des éléments pertinents sur les ressources en eaux souterraines sur ce territoire et leur interaction avec les eaux superficielles.

Ce projet s'est déroulé en 4 étapes :

1. Acquisition de données piézométriques et des débits sur les cours d'eau en période de basses eaux et de hautes eaux (prestation en partie réalisée par l'EPTB Vilaine) ;
2. Acquisition de données géologiques et hydrogéologiques (hors piézométrie) sur les têtes de bassins versants sélectionnées : cartographie des altérites et de la fracturation au 1/10 000, réalisation de cartes piézométriques hautes et basses eaux, évaluation des prélèvements ;
3. Caractérisation des interactions entre eau de surface et eau souterraine par croisement de l'ensemble des données acquises ;
4. Mise en place d'un suivi quantitatif et qualitatif des nappes.

1.3. SECTEUR D'ETUDE

En croisant les informations géologiques existantes au BRGM :

- forages de la Banque de données du Sous-Sol,
- direction des failles des cartes géologiques à 1/50 000,
- présence d'altérites cartographiées,
- lithologie,
- Zones Potentiellement Productives du projet ANAFORE (Schroëtter et al., 2020),

et les données de l'EPTB Vilaine :

- diagnostic des cours d'eau avec la méthode Réseau d'Evaluation des Habitats (REH, évaluation de la qualité des cours d'eau par rapport aux exigences globales des poissons),
- inventaires des zones humides et des cours d'eau,
- études spécifiques des zones humides dégradées, densité bocagère...),

le secteur autour de la commune de Moulins (dans le département de l'Ille-et-Vilaine) est apparu comme une zone prioritaire pour l'EPTB Vilaine et de dimension raisonnable (19 km²) pour engager ces réflexions (Illustration 1).

Ce secteur est traversé d'est en ouest par la Quincampoix (affluent de la Seiche), et plusieurs affluents, 3 en rive droite et 3 en rive gauche (notamment le ruisseau de Coquerelle). Ce secteur est concerné par une Zone Soumise à Contraintes Environnementales.

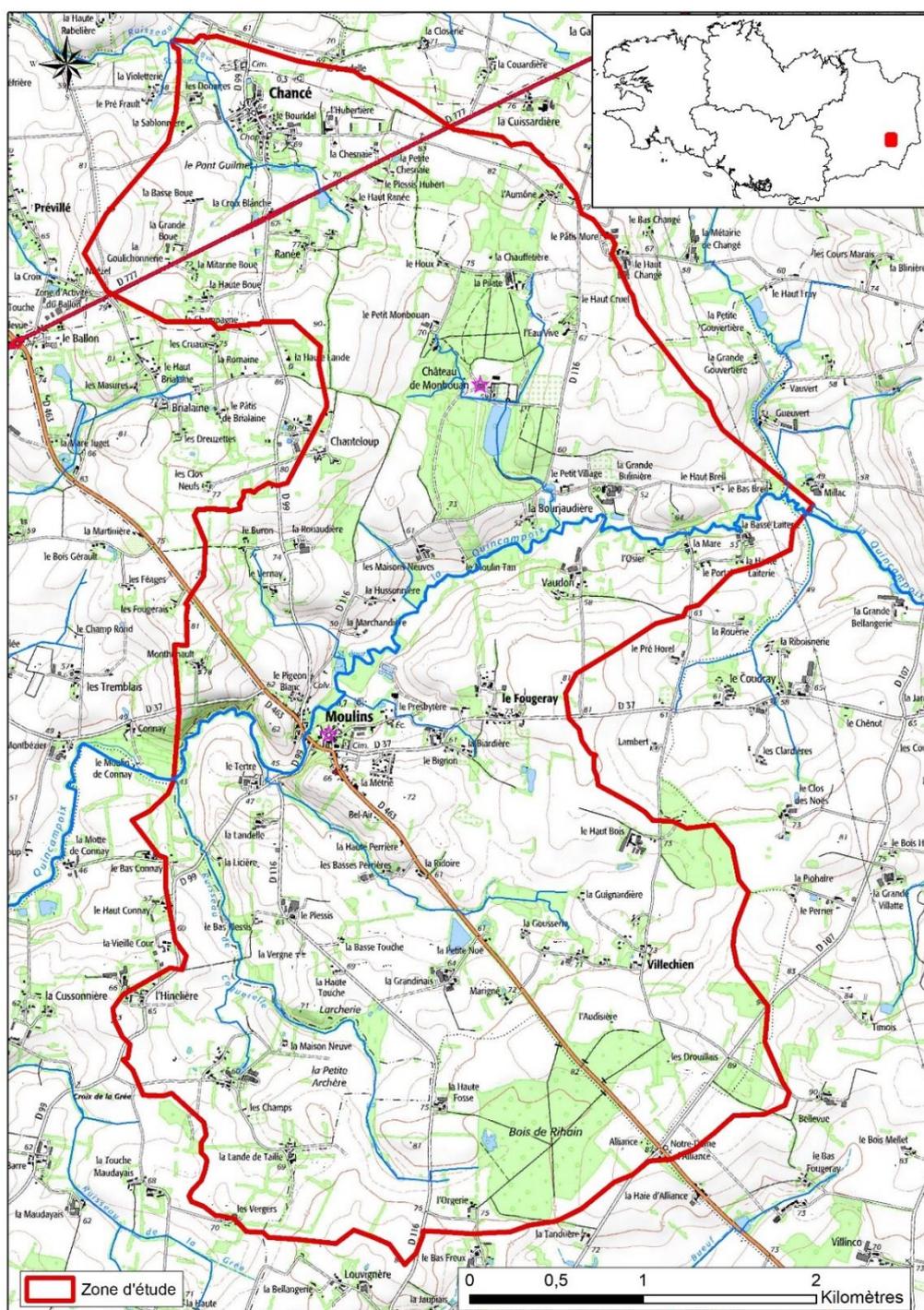


Illustration 1 : Localisation du secteur d'étude sur fond de carte IGN (1/25 000)

Les principales altérations du lit mineur ont été identifiées en 2011 et 2017 à travers la méthode REH (Réseau d'Évaluation des Habitats - Illustration 2). 70% des cours d'eau de la zone d'étude présentent un état d'altération fort à très fort. 54 plans d'eau ont été identifiés au niveau du talweg dont 34 directement connectés au cours d'eau et 4 en dérivation (surface médiane de 1 000m², minimum de 72m² et maximum de 3ha). En période de basses eaux, ces plans d'eau peuvent avoir un impact cumulé négatif sur les débits des cours d'eau situés à l'aval.

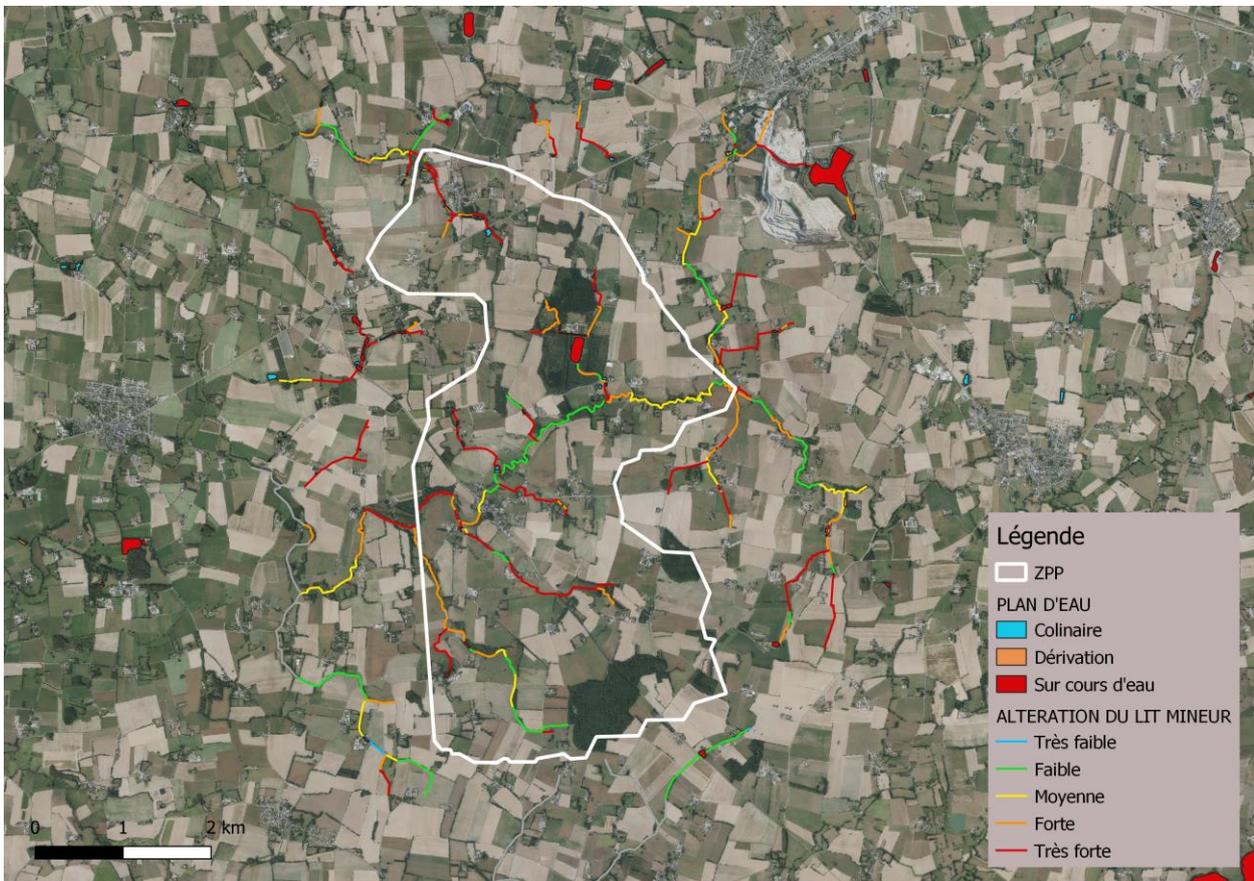


Illustration 2 : Plans d'eau et altérations du lit mineur sur le secteur d'étude (en blanc) – source : EPTB Vilaine

Les altitudes s'échelonnent de 43 m (en aval de la Quincampoix, à l'ouest du secteur d'étude) à 94 m au sud-est du secteur d'étude (Illustration 3).

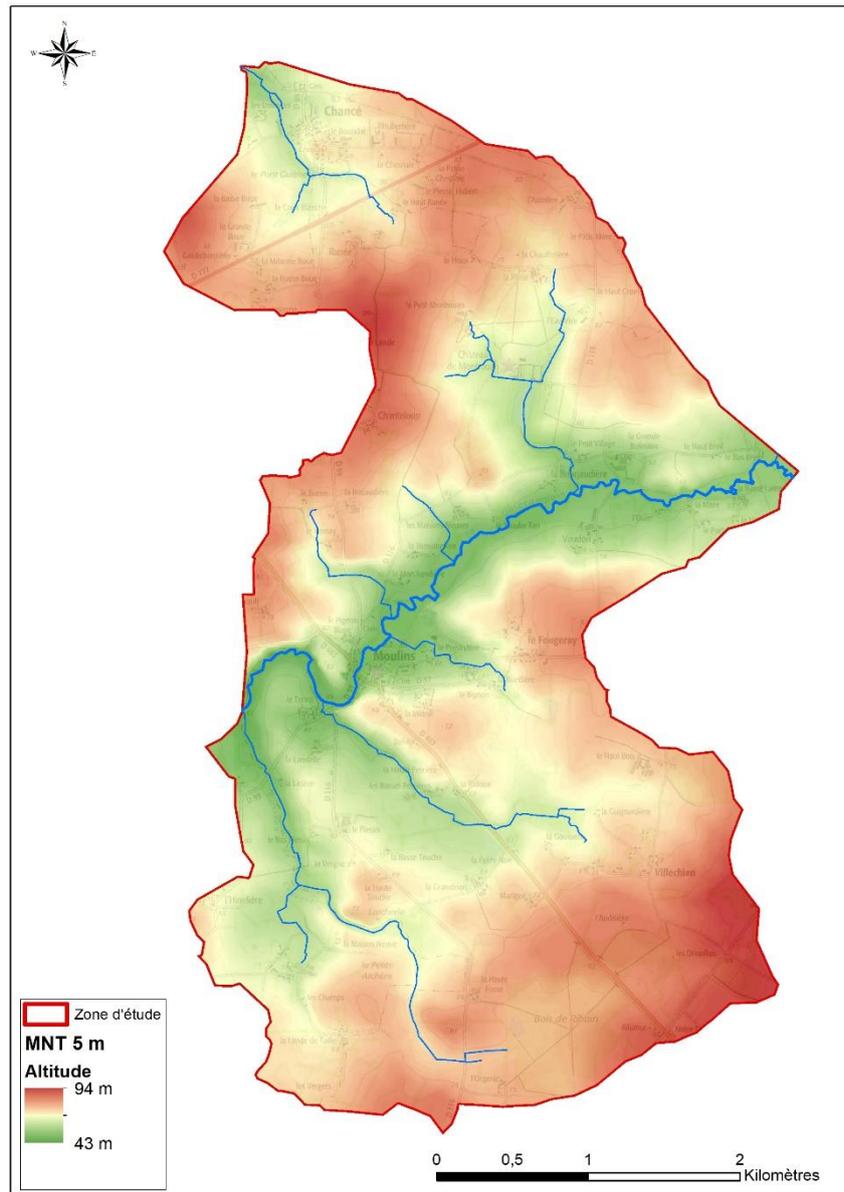


Illustration 3 : Altitudes sur le secteur d'étude (Modèle Numérique de Terrain 5 m – EPTB Vilaine)

1.4. CONTEXTE GEOLOGIQUE

La géologie du secteur d'étude est disponible sur la carte géologique au 1/50 000 et sa notice, Feuille n°354, intitulée : La-Guerche-de-Bretagne, des éditions du BRGM (Illustration 4).

La Seiche prend sa source au cœur du petit massif granitique hercynien du Pertre. Son affluent la Quincampoix, d'une longueur de 32,5 km, prend sa source dans les schistes du Briovérien à l'est de Moulins.

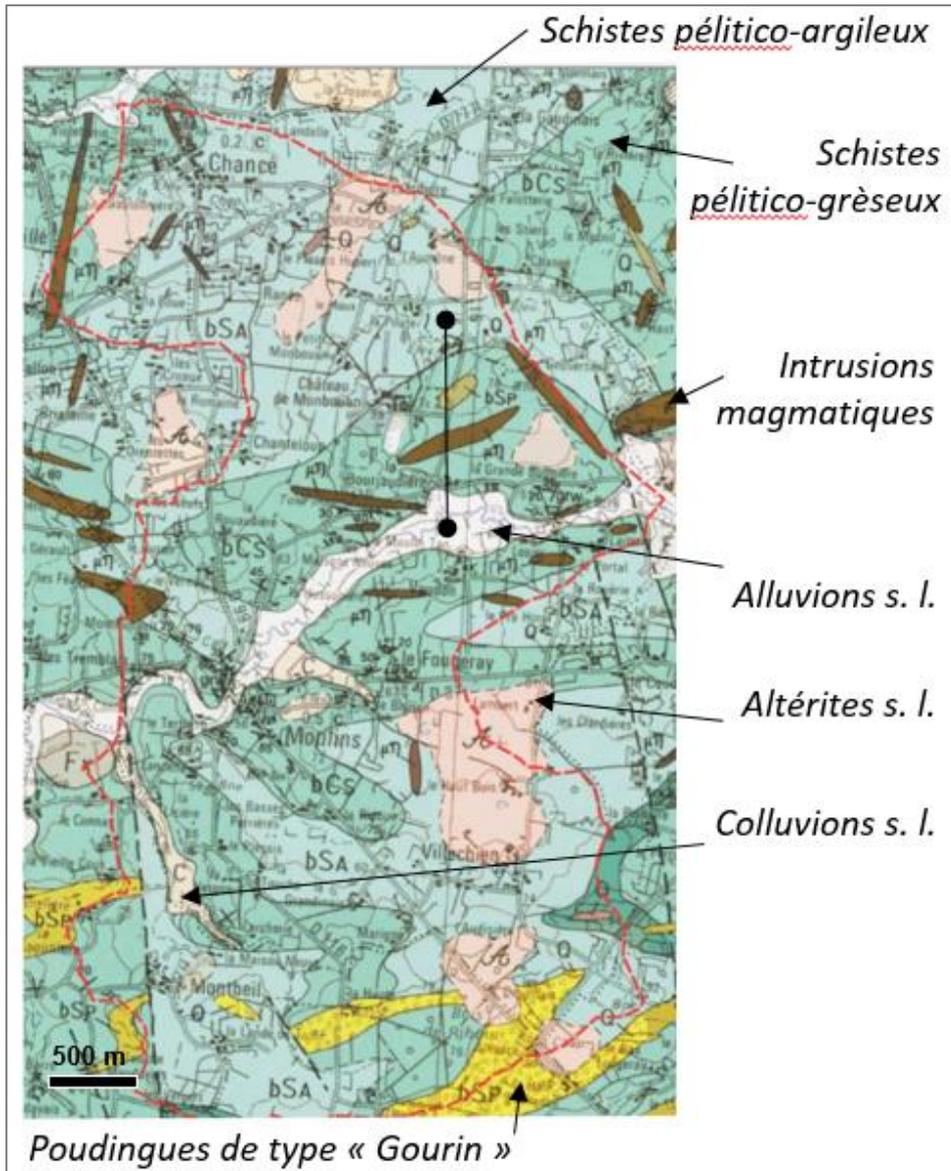


Illustration 4 : Extrait de la carte géologique au 1/50 000, Feuille 354, La Guerche de Bretagne (Trautmann & Clément, 1997 ; Le nord parallèle à la bordure de carte)

Le secteur d'étude (en rouge sur l'illustration 4) de 19 km² environ, a comme soubassement la formation géologique méta-sédimentaire des schistes du Briovérien composés d'une alternance de grès (sables indurés), et de pélites et argilites, d'âge Néoprotérozoïque à Paléozoïque inférieur (Ediacarien ; autour de 540 millions d'années).

Les schistes pélitico-gréseux composés de *siltites (pélites) à lamines et niveaux gréseux* (en vert plus sombre), de la feuille La-Guerche-de-Bretagne sont notées bCs alors que les schistes pélitico-argileux sont composés d'*argilites-siltites et wackes tendres* (en vert plus clair) sont notées bSA.

En vert, sur la carte ci-dessus, les schistes briovériens au sens large (s.l.) sont traversés par des intrusions magmatiques mineures correspondant à des roches volcaniques filoniennes de type microdiorites quartziques porphyriques à biotite, notées $\mu\eta$, d'âge indéterminé mais post Briovérien.

Ces schistes briovériens et les intrusions microdioritiques, sont plissés en un système de plis droits à déversés légèrement vers le Sud (Illustration 5), durant la période hercynienne.

Des failles et fractures recoupent l'ensemble, failles et fractures qui sont en moyenne orientées NS à N150° par rapport au nord, et sont post-hercyniennes (après l'Hercynien).

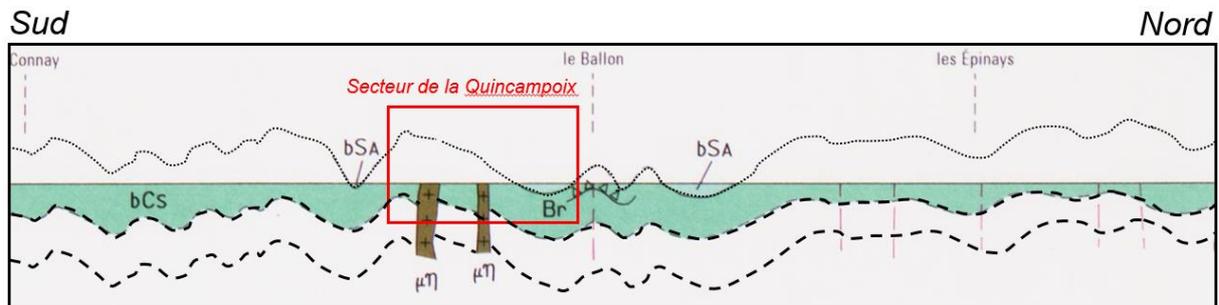


Illustration 5 : Extrait de la coupe géologique au 1/50 000, Feuille n°354, La Guerche de Bretagne (modifiée d'après Trautmann & Clément, 1997)

Sur cet édifice lithologique (nature des roches) et structural (plissé et faillé), plusieurs périodes d'altération vont venir ameublir les roches. Ces phases d'altération vont transformer *in situ*, sous des climats plutôt chauds et hydrolysants (pluviométrie de 1000 mm/an au moins), les roches en limons et argiles d'altération.

Ce sont notamment les minéraux riches en fer, telles que les biotites mais aussi les pyrites, qui vont s'oxyder et produire des oxydes et hydroxydes de fer qui vont, en changeant de volumes, dégrader les roches, et venir tapisser les failles et fractures et qui vont superposer aux diverses porosités de la roche (porosité de fracture, porosité lithologique – intrinsèque) une porosité d'altération (Illustration 6).

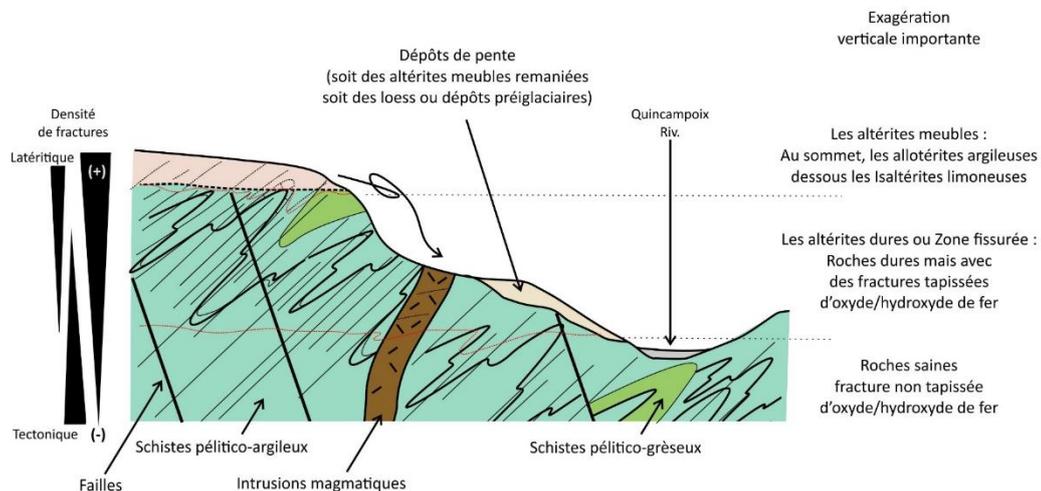


Illustration 6 : Profil théorique de l'altération des roches au niveau du bassin versant de la Seiche, inspiré et adapté de Wyns, 1998, avec l'évolution de l'altération de la densité des fractures et de leur origine en fonction de la profondeur

Ces porosités vont permettre de mettre en communication les eaux superficielles et les eaux souterraines. Les altérites sont organisées de façon tripartite avec, de la base au sommet : (i) au-dessus de la roche saine, une roche dure affectée de fractures tapissées d'oxydes et hydroxydes de fer, appelée la Zone Fissurée, (ii) surmontée de la roche qui commence à devenir meuble mais où il est encore possible de la reconnaître, appelée les isaltérites et enfin (iii) une zone où

la roche n'est plus reconnaissable, composée de limons à oxydes et hydroxydes de fer, et argiles tachetées à kaolinite, zone appelée les allotérites (Illustration 7).

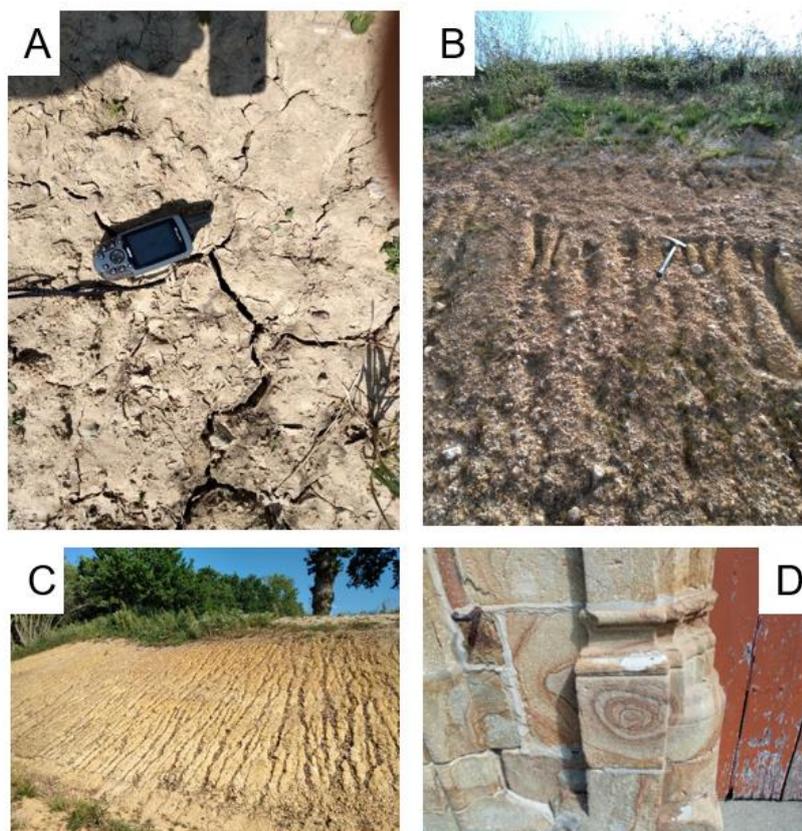


Illustration 7 : A - Argiles d'altération sur un plateau au-dessus de schistes briovériens s.l. ; B - Coupe d'un talus de route à la limite isaltérite-allotérite ; C - Coupe d'un talus de route dans les allotérites et D – Cernes concentriques d'oxyde de fer dans les microdiorites du secteur caractéristique de la zone fissurée (pierres de structure de l'église de Moulins)

1.5. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

Le Massif Armoricaïn est essentiellement constitué de roches dures anciennes (formations dites « de socle »).

La présence d'eau souterraine est fortement conditionnée par le degré d'altération, le degré de fracturation et la géométrie du substrat géologique (projet ANAFORE, Schroetter et al. 2020). En Bretagne, il n'existe pas de grands aquifères, mais des systèmes de petites tailles, de 5 à 15 km² pour les plus importants, séparés entre eux par des secteurs où l'eau souterraine est présente en très faible quantité, indépendants les uns des autres, du moins dans les conditions actuelles des exploitations qui en sont faites.

Trois types d'aquifères sont dénombrés pour le Massif Armoricaïn, même si certains sont très réduits en termes de superficie :

- Le plus important en terme de superficie est **l'aquifère de socle** s.l. (voir <https://sigesbre.brgm.fr/Aquiferes-bretons.html>) situé dans l'altération et la fracturation d'origine latéritique, mais aussi tectonique, des roches du socle du Massif Armoricaïn. L'altération et la fracturation ont généré un horizon meuble de roches altérées (de 20 à 30 m d'épaisseur) avec une porosité permettant l'infiltration et le stockage des eaux

météoritiques vers un horizon plus compact et fissuré de 40 à 60 m d'épaisseur et soutenant le débit des cours d'eau. Cet ensemble socle-altération a subi des événements tectoniques créant de petits bassins d'effondrements tertiaires ;

- Les **bassins sédimentaires** (d'âge Tertiaire), dont le plus important en région Bretagne est celui de Chartres-de-Bretagne (Ille-et-Vilaine), renferment des aquifères de type sédimentaire dans lesquels la ressource en eau, malgré leur superficie réduite, est plus importante et contenue dans les couches sédimentaires les plus perméables (la perméabilité des formations tertiaires est très supérieure à celle des roches de socle) ;
- Le troisième type d'aquifère est **alluvial**, commun à tous les fleuves et cours d'eau. Ces aquifères sont contenus dans les alluvions des fleuves et cours d'eau et leur capacité de production d'eau est importante.

Sur le secteur d'étude, on rencontre essentiellement des aquifères de socle. La zone étudiée se trouve sur l'entité de niveau 3 BD LISA (<https://bdlisa.eaufrance.fr/>) 174AA01 - Socle métamorphique dans les bassins versants de la Vilaine, la Seiche et le Don de leurs sources à la mer.

Classiquement les aquifères en domaine dit « de socle » étaient considérés comme « discontinus » dans les années 1970 et seulement localisés au niveau de fractures, failles, etc.

Ce concept a, depuis les années 1990-2000, évolué à partir de développements méthodologiques dans le secteur de Plabennec pour la Bretagne et sur le Massif Central (Wyns, 1998), mais aussi en Afrique, en Inde, en Guyane ou en Corse et déclinés à l'échelle de bassins versants de la région Bretagne (Mougin et al., 2008b).

Il a été démontré que dans les roches dites de « socle » (granites, schistes, gneiss, etc.), comme celles du Massif Armoricaire, ayant subi une altération importante (désagrégation par l'action de l'eau), les aquifères peuvent être considérés comme relativement « continus », avec une surface piézométrique relativement « stratiforme » parallèle à la surface du sol contemporaine.

Ces « horizons-réservoirs » d'altération en domaine de socle sont composés de trois niveaux principaux, du sommet vers la base du profil d'altération (Illustration 8) :

- Les allotérites : un horizon argilo-limoneux issu de la transformation *in situ* de la roche-mère (granite, gneiss, micaschistes ou schistes etc.) sous l'effet de l'altération, où la structure de la roche-mère est perdue ;
- Les isaltérites : un horizon limono-sableux issu de l'altération *in situ* de la roche mère, pour lequel l'ensemble des structures primaires de la roche originelle (foliation, schistosité, pendage, orientation des filons etc.) sont préservées et mesurables dans une roche très friable ;
- En enfin la zone fissurée : roche-mère dure plus ou moins altérée présentant de nombreuses zones de fissures et fractures, soulignées par des placages d'oxydes (oxydes et hydroxydes de fer notamment et manganèse), témoins de la circulation des eaux souterraines. La fracturation dominante est liée à l'altération supergène qui se surimpose sur la fracturation tectonique. Cet horizon assure la fonction transmissive (flux) de cet aquifère composite, les altérites sus-jacentes, lorsqu'elles sont saturées en eau, en constituent sa partie capacitive (stockage). Cet horizon fissuré est capté par la plupart des forages productifs dans le socle.

ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de restauration des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche (Moulins)

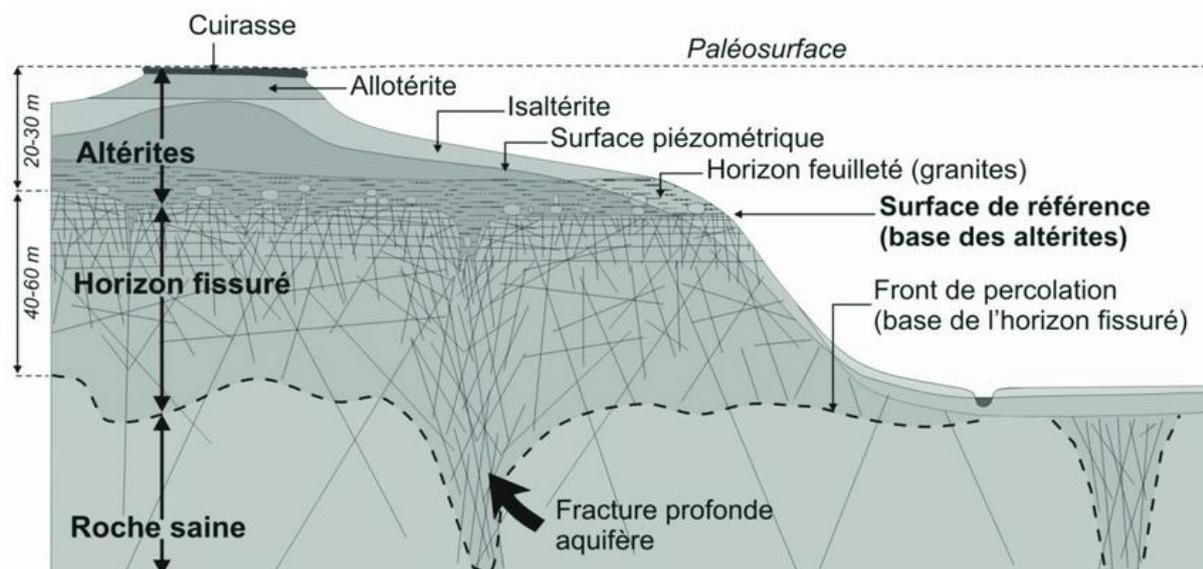


Illustration 8 : Profil d'altération stratiforme idéalisé dans les roches de type granitique, recoupé par la topographie, d'après Wyns et al., 1998 et Wyns et al., 2004

En 2008, sur ce concept d'aquifères issus du profil d'altération, le programme SILURES Bretagne (Mougin et al., 2008a) a permis d'établir une cartographie à l'échelle du 1/250 000 du débit moyen - par type de roches (lithologies) - de la zone fissurée utile (en m^3/h ; Illustration 9).

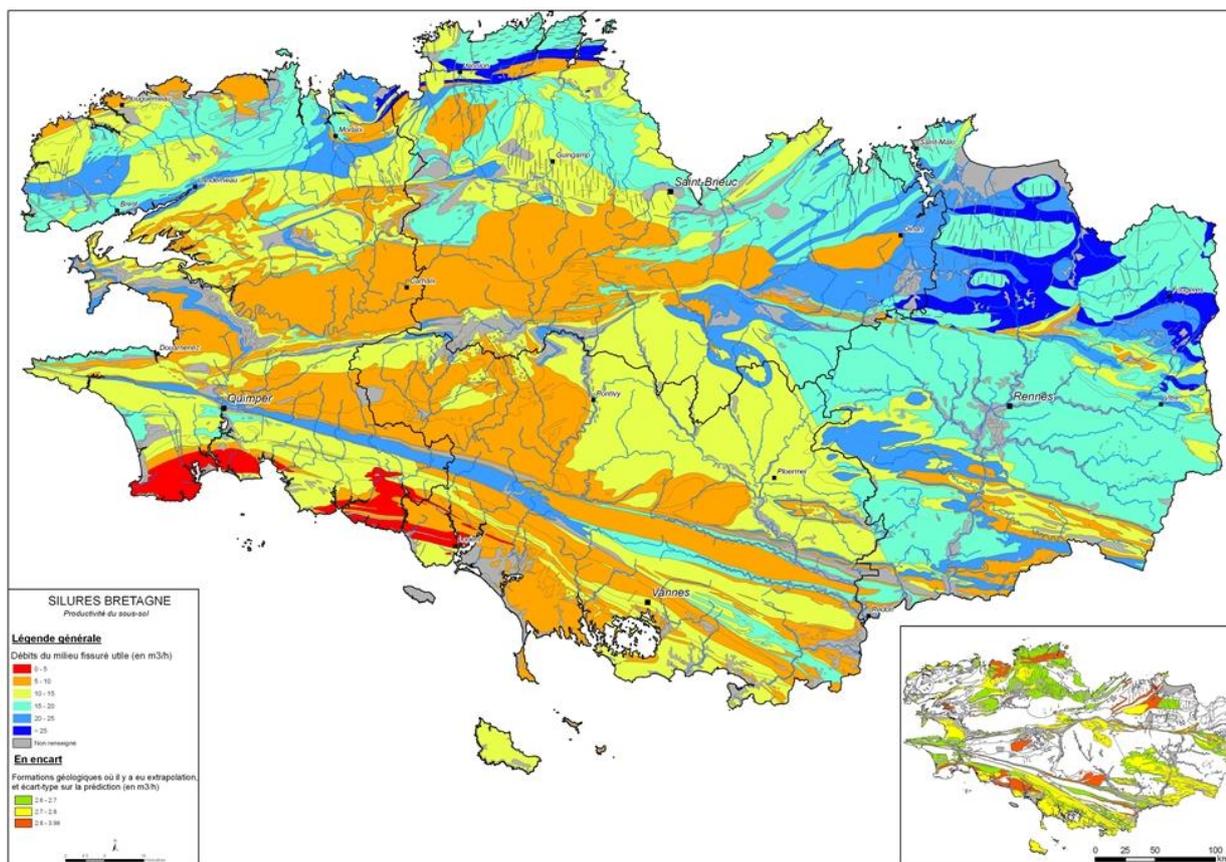


Illustration 9 : Moyenne des débits de la zone fissurée « utile » du profil d'altération en Bretagne (en m^3/h) – Projet SILURES (Mougin et al., 2008a)

Très récemment, le programme ANAFORE (Schroetter et al., 2020) a fait interagir les différents concepts sur l'eau souterraine en combinant les failles, les altérations et les différentes natures et géométries en profondeur que peuvent avoir les roches, à travers l'analyse des 100 forages parmi les plus productifs en Bretagne.

Le programme ANAFORE a montré que les zones potentielles productrices en Bretagne en eaux souterraines peuvent se résumer à 10 typologies distinctes (Illustration 10), dans lesquelles les parts respectives entre failles, altération mais aussi les différentes natures et géométries des roches et leurs structures contribuent à la circulation et au stockage de l'eau souterraine.

Les 10 typologies sont données dans le tableau ci-dessous (Illustration 10 en haut), avec les effectifs de forages correspondant ainsi que leur répartition (Illustration 10 en bas).

TYPLOGIE	EFFECTIF	DESCRIPTION
1	29	Auréole de métamorphisme recoupée par failles/fractures transtensives NS, N150 et/ou N045
2	17	Une lithologie magmatique (granites, granodiorite) recoupée par failles/fractures transtensives NS, N150 et/ou N045
3	12	Synclinal paléozoïque recoupé par failles/fractures transtensives NS, N150 et/ou N045
4	6	Profil d'altération sous le paléozoïque recoupé par failles/fractures transtensives NS, N150 et/ou N045
5	6	Filons magmatiques dans une lithologie recoupés par failles/fractures transtensives NS, N150 et/ou N045
6	5	Lithologie perméable dans une lithologie peu perméable recoupée par failles/fractures transtensives NS, N150 et/ou N045
7	10	Failles/fractures transtensives NS, N150 et/ou N045 recoupant le CSA ou structures satellites
8	9	Failles/fractures transtensives NS, N150 et/ou N045 au Sud du CSA ou structures satellites ou réutilisant une structure ancienne
9	2	Lithologies effusives (volcanites) recoupées par failles/fractures transtensives N150 et N045, et/ou NS
10	4	Aquifère avec multiprofiles d'altération le long du QN/E

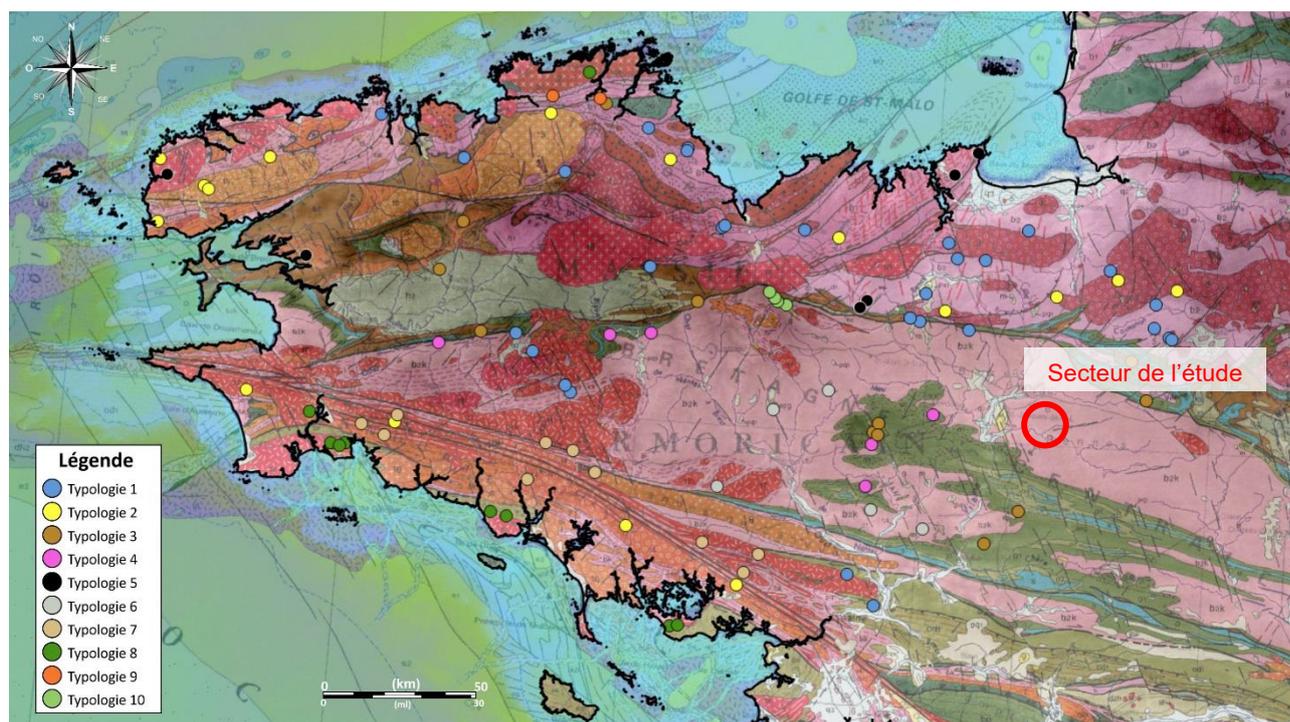


Illustration 10 : En haut, classement de 100 forages d'eau parmi les plus productifs en Bretagne par typologie hydrogéologique avec les effectifs de forages de chaque typologie et en bas, leur répartition en Bretagne (Schroetter et al., 2020).

Le secteur de l'étude se situe donc au-dessus d'un aquifère de socle dont la typologie serait la n°6 (Illustration 10 en bas), correspondant à une lithologie perméable telle que les grès dans une lithologie peu perméable telle que les pélites et argilites, l'ensemble recoupé par des failles NS à N150.

Sur le terrain, il a été possible de valider cette interprétation (Illustration 11).



Illustration 11 : Photographies dans une ancienne carrière du secteur de la typologie n°6 – A : Faille N150 avec un pendage de 70 à 80° Ouest, qui recoupe une alternance de grès et argilites, tapissée de mousses soulignant les circulations d'eaux souterraines ; B – Détail de la fracturation du massif rocheux avec des fractures satellites NS verticales et N150 d'inclinaison 70 à 80° Ouest, qui drainent l'eau superficielle vers les eaux souterraines (©BRGM)

Dans les aquifères de socle, il existe un lien étroit entre eau souterraine et eau de surface, mise en évidence par le projet SILURES Bretagne (Mougin et al., 2008a) qui a évalué la contribution globale annuelle des eaux souterraines au régime des rivières bretonnes et de la Seiche à 53% de l'écoulement total ; pourcentage pouvant être plus important encore durant l'étiage (Illustration 12).

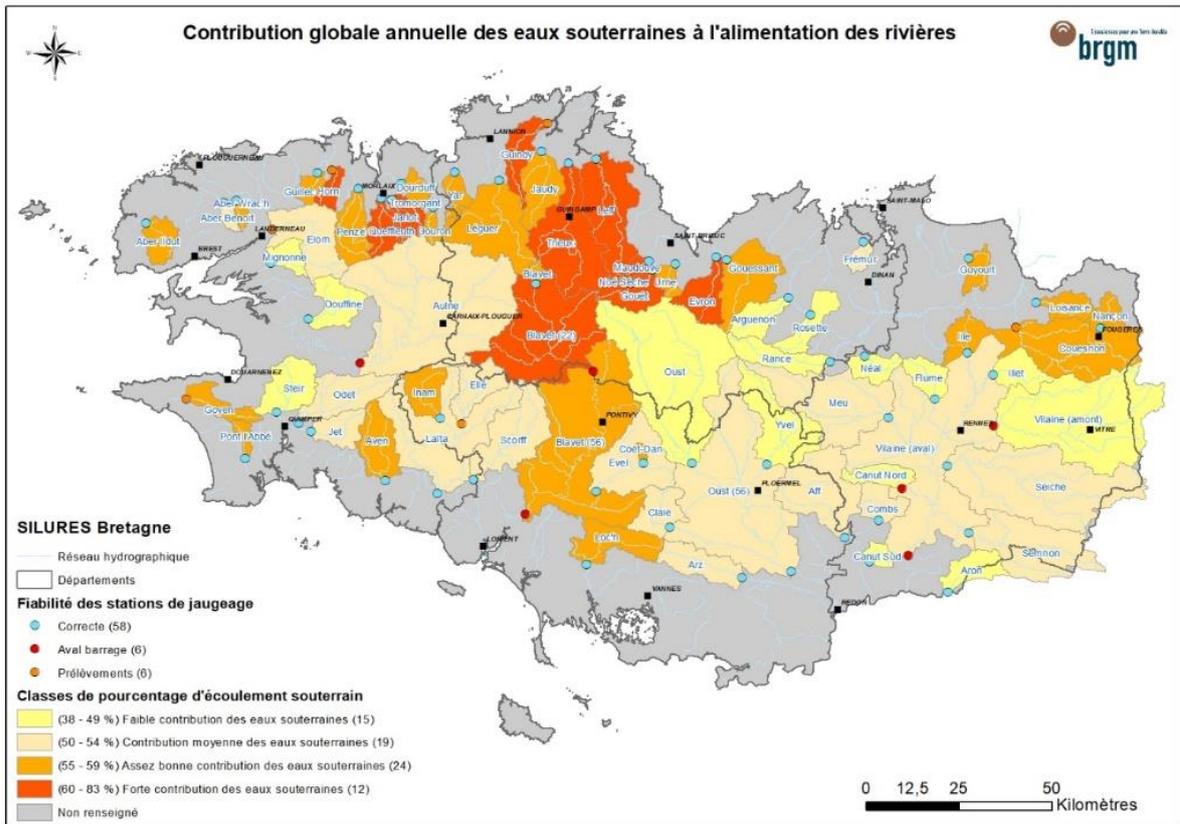


Illustration 12 : Contribution globale annuelle des eaux souterraines à l'alimentation des rivières. Echelle : 1/250 000 (Mougin et al., 2008)

1.6. METHODOLOGIE PROPOSEE

En agriculture, le drainage est l'opération qui consiste à provoquer artificiellement l'évacuation gravitaire de l'eau à la suite de précipitations ou bien de remontée de nappe (notamment en fond de vallée ou au niveau des résurgences), vers le milieu superficiel, en créant une macro-porosité dans les terrains qui doivent être drainés (Illustration 13). L'objectif est de réduire les excès d'eau sur certaines parcelles agricoles trop humides afin d'en améliorer le rendement et l'exploitation.

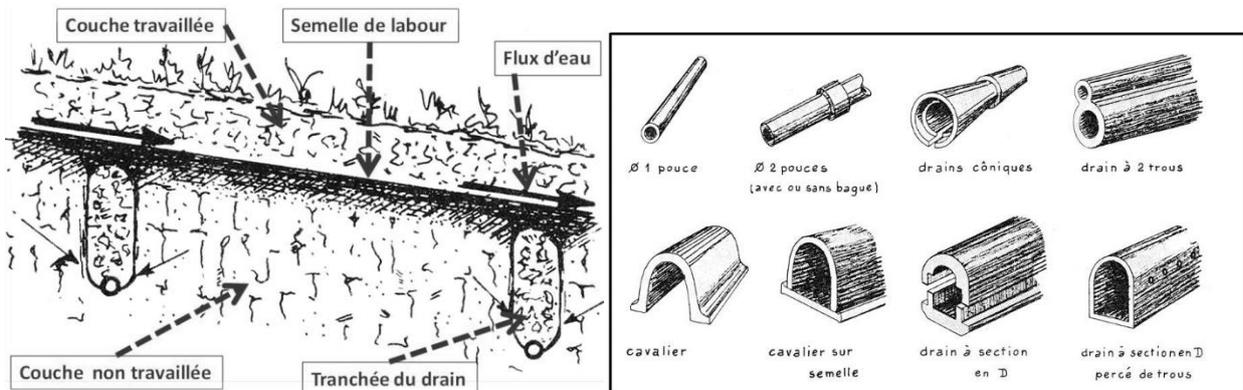


Illustration 13 : A gauche – Schéma de principe de fonctionnement des drains agricoles (Perrey, 1981b) ; A droite – Différents types de drains en fonction des périodes et régions (Perrey, 1981a)

Cette pratique a été intensivement mise en place dans presque tous les bassins hydrographiques de l'Europe de l'Ouest, mais aussi en Asie, Amérique du Nord, et ceci non sans impacts hydrologiques et écologiques (Illustration 14).

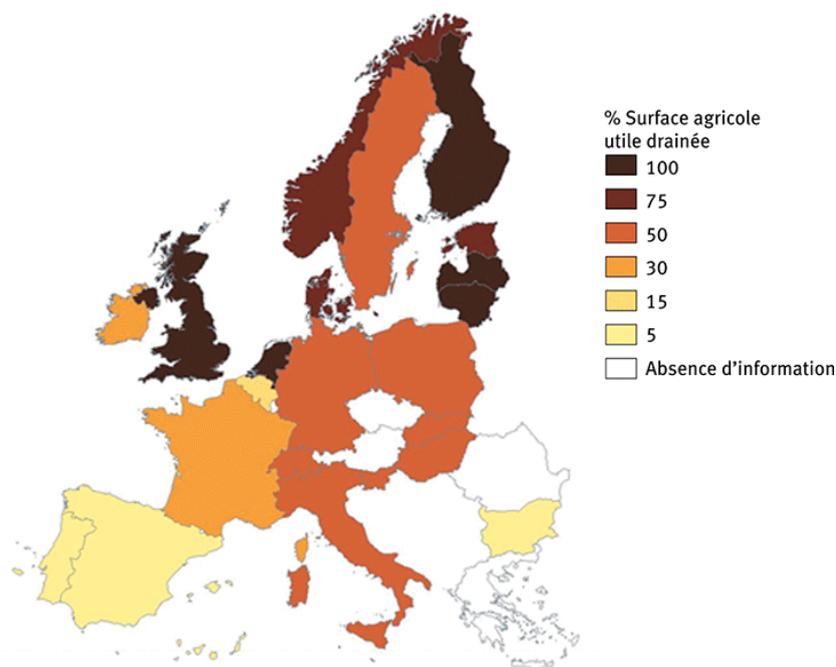


Illustration 14 : Pourcentage des surfaces agricoles utiles drainées en Europe de l'ouest (Données résultant du croisement de données sources : les déclarations des États membres de l'ICID (International Commission on Irrigation and Drainage), les bases de données FAO et la Banque mondiale).

L'évacuation des eaux de surface peut être faite soit par des drains dans les champs des plateaux et des versants, soit par des fossés ou de petits canaux dans les zones plus humides. Le drainage est préconisé en agriculture pour les sols hydromorphes.

Techniquement, les drains dits « agricoles » sont enterrés dans le sol à une certaine profondeur, espacés suivant des calculs fonction des terrains et des conditions climatiques (Illustration 13 à gauche). Si autrefois, ils étaient constitués d'éléments en terre cuite, emboîtés les uns aux autres ; ils ont été remplacés progressivement par des matériaux plastiques, flexibles et crépinés (Illustration 13 à droite).

Les premières traces de drainage remontent à la Préhistoire, mais en Europe et en Asie, de la fin du Moyen Âge au XVIIIe siècle, il fut utilisé pour rendre accessible les zones humides à l'exploitation agricole. C'est en 1847, que le *Land Drainage Act* en Angleterre entraîne des travaux de drainage des terres de grande envergure, qui seront suivis rapidement par la France.

Au milieu du XXe siècle, si l'agriculture parle de « valorisation des zones humides et de terres par le drainage », son impact sur l'environnement n'avait : (1) ni été évalué, (2) ni pris en considération alors qu'il est avéré (Vincent, 2020). En effet, sur la seconde moitié du 20^{ème} siècle, afin de favoriser les rendements agricoles, les collectivités territoriales et l'Etat ont largement subventionné les travaux d'installations drainantes, pratique qui peut avoir des incidences à la fois qualitative et quantitative sur les eaux de surface et les eaux souterraines.

Pour ce qui est de la présente étude, l'impact des drains agricoles sur les eaux souterraines qui sont en connexion avec les eaux de surface et les rivières est résumé par le schéma ci-dessous

(Illustration 15). Avant l'installation des drains, la totalité des pluies efficaces s'infiltrant dans le sol (QH_2O tot. ; Illustration 15) alimentaient les eaux souterraines (et la rivière). La mise en place des drains enlève une part de cette quantité d'eau initiale, fonction de la superficie drainée du bassin versant, qui rejoint directement les eaux de surface au lieu de s'infiltrer.

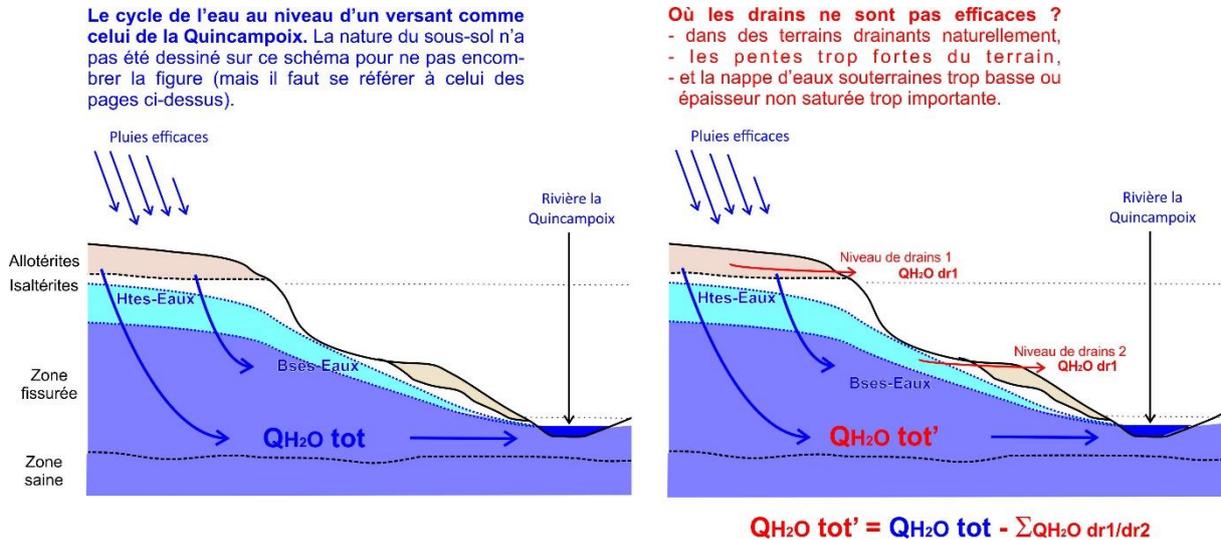


Illustration 15 : Coupe schématique du secteur d'étude

Cependant, les drains ont une fonction avérée pour rendre accessible certaines parcelles à l'exploitation agricole. Ainsi, il est possible d'apporter plus d'eau de surface aux eaux souterraines en réduisant la quantité d'eau drainée (QH_2O dr. ; Illustration 15) mais à la condition d'avoir une connaissance approfondie de certaines informations à l'échelle du bassin versant. En effet, il s'agit de ne pas pénaliser l'exploitation agricole tout en regagnant de l'eau souterraine pour le système hydrogéologique du bassin, afin de lutter contre les étiages sévères des rivières (puisque ces eaux souterraines alimentent en permanence la rivière).

Cette connaissance nécessaire et indispensable est celle de :

- la nature des terrains (et notamment leur argilosité),
- la hauteur (en altitude ou en profondeur) de la nappe d'eau souterraine qui conditionne l'épaisseur de la zone non saturée (ZNS),
- et enfin les pentes des bassins versants.

L'acquisition de ces paramètres hydro-géomorpho-géologiques passent par :

- la cartographie détaillée des formations géologiques superficielles (les altérites etc.),
- la connaissance des écoulements dans l'aquifère de socle à travers la réalisation d'une carte piézométrique (représentant le niveau de la nappe) notamment,
- l'analyse de la géomorphologie du site (carte de pentes).

Suite à l'analyse de ces données, des secteurs où le retrait de drains permettrait d'améliorer l'infiltration des eaux souterraines et donc d'alimenter les rivières et soutenir leur étiage, pourront être proposés.

2. Acquisition de données géologiques, hydrogéologiques et hydrologiques

2.1. CARACTERISATION DES FORMATIONS GEOLOGIQUES SUPERFICIELLES

Les formations géologiques superficielles correspondent à l'ensemble des roches du secteur de l'étude, affectées par le phénomène d'altération (voir Illustration 8) mais aussi aux alluvions des cours d'eau et aux colluvions des versants. Enfin, il existe une dernière formation superficielle que l'on retrouve sur le territoire breton et sur le bassin versant de la Quincampoix, non évoquée jusqu'ici dans ce rapport : ce sont des limons éoliens périglaciaires constituant de très bonnes terres agricoles.

L'ensemble de ces formations géologiques superficielles constitue les sols du bassin versant du secteur de l'étude, et si pour l'ensemble il est plus ou moins facile de prédire leur nature (sable, limons ou argiles), pour les altérites l'analyse de l'argilosité doit passer par une cartographie fine des terrains où les relevés des affleurements doivent être rattachés au schéma conceptuel des aquifères de socle (Illustration 8 et Illustration 16).

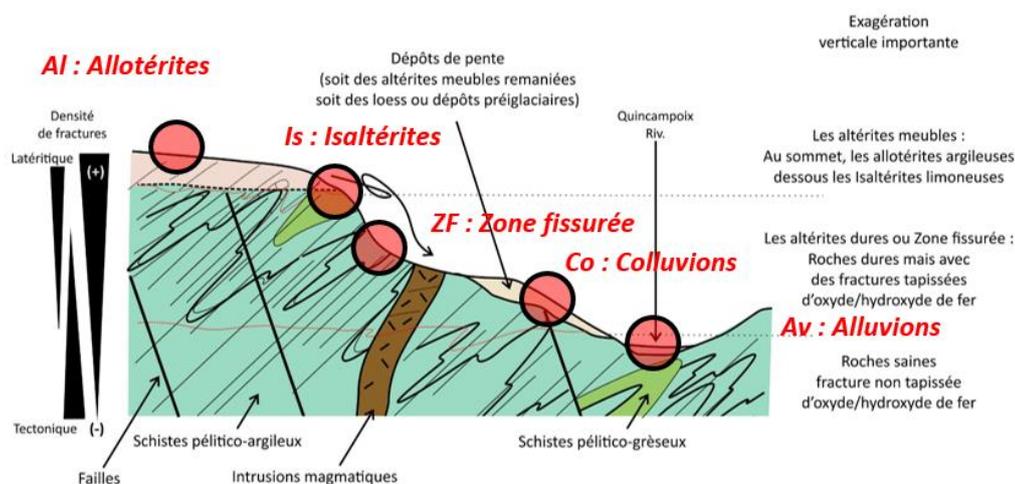


Illustration 16 : Coupe géologique schématique.
Ronds rouges correspondent aux affleurements importants relevés sur le terrain.

Cette cartographie a été complétée par :

- les données de radiométrie spectrale gamma des sols, acquises en 1998, qui correspondent à la cartographie de la radioactivité naturelle des terrains en mesurant les teneurs en Uranium (U), Thorium (Th) et Potassium (K),
- des données de forages issus de la Banque de données du Sous-Sol du BRGM (BSS),
- des données issues des analyses de reliquats azotés post-absorption (RPA) 2021, fournies par l'EPTB Vilaine.

2.1.1. La cartographie des altérites

La cartographie des altérites correspond à l'arpentage sur toutes les voies de communication, chemins, sentiers et bords de route de l'ensemble du bassin versant étudié.

Dès qu'une information géologique est observable, elle vient enrichir la carte géologique du BRGM au 1/50 000.

Lors de ce levé de terrain en septembre 2021, des sondages à la tarière à main pour des investigations de l'ordre de 0.8 m de profondeur ont pu être réalisées dans les fonds de fossés par exemple ou les délaissés de routes communales ou départementales.

42 points d'observation ont pu être relevés sur le terrain (Illustration 17). Tous ces points ont été annotés :

- *ZF* s'ils se situaient dans la zone fissurée du profil d'altération,
- *Is* pour les isaltérites,
- *Al* pour les allotérites,
- *Co* pour colluvions,
- *Fz* pour alluvions,
- *Ar* pour des secteurs argileux sans que l'attribution à des argiles d'altération (ou pas) ne soit possible,
- Et enfin *Oe* ou *Oer* ou *Oear* pour les limons éoliens périglaciaires avec *r* s'ils semblaient remaniés et constituaient des colluvions ou *ar* s'ils étaient argileux ;
- Accessoirement, la notation *Qtz* pour quartz a été utilisée dans des secteurs riches en quartz pouvant correspondre à un filon de quartz ou une faille.

21 points complémentaires ont pu être ajoutés à partir des cartes géologiques au 1/50 000 du BRGM (Illustration 17).

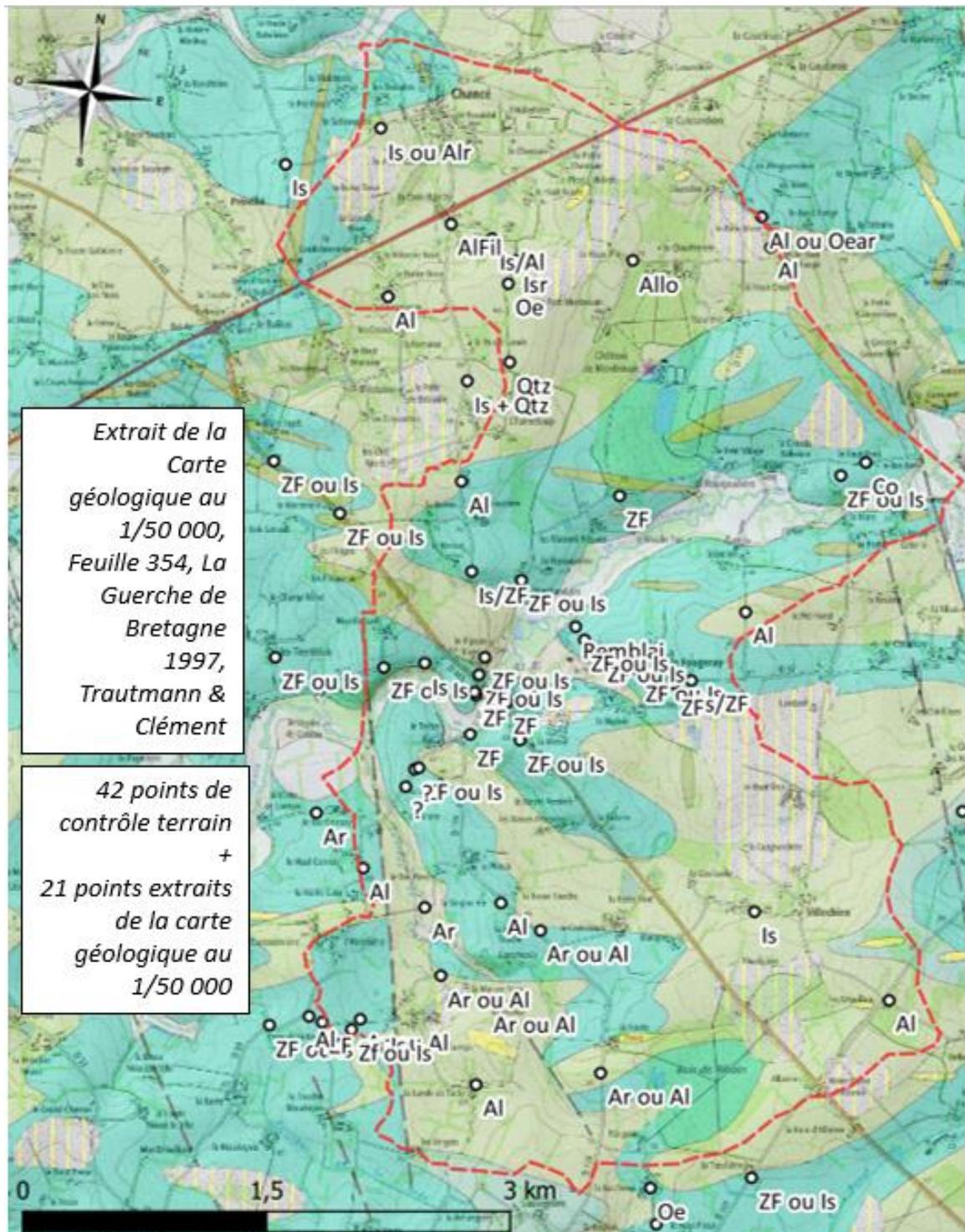


Illustration 17 : Relevés de terrain (BRGM, septembre 2021) sur le secteur d'étude (délimité en rouge) et annotations associées.

A partir de ces 42 points d'observation, complétés par les 21 points extraits de la carte géologique au 1/50 000 du BRGM (Feuille n°354, La Guerche-de-Bretagne), une nouvelle carte géologique au 1/10 000 a été dressée (Illustration 18).

ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de resTauratiOn des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche (Mouliens)

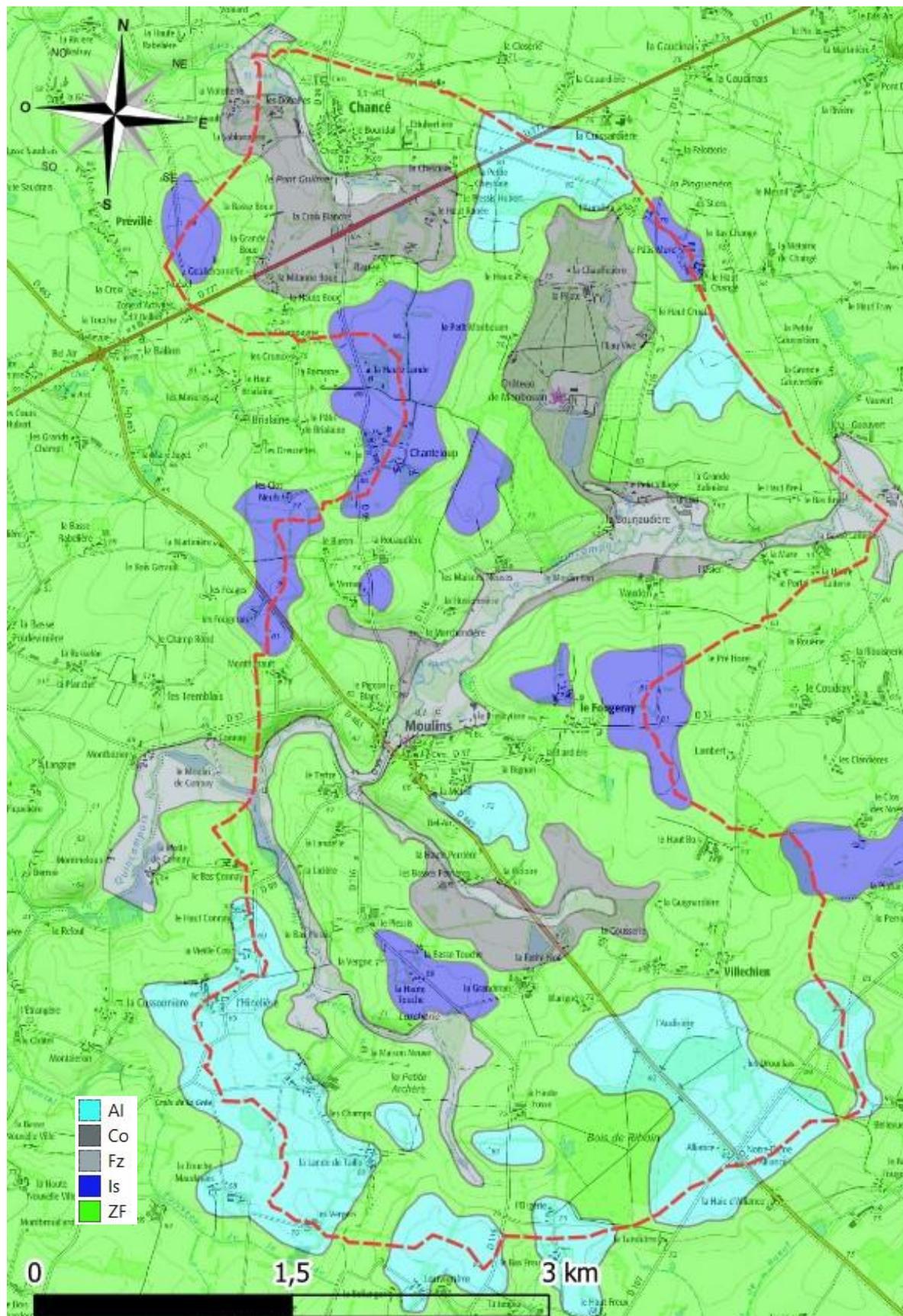


Illustration 18 : Nouvelle carte géologique BRGM au 1/10 000 du secteur d'étude

Légende de l'illustration n°17 :

Al : Allotérites - altérites argilo-limoneuses
Is : Isaltérites – altérites sablo-limoneuses
ZF : Zone fissurée
Fz : Alluvions gravelo-sablo-limono-argileux
Co : Colluvions des versants

2.1.2. La caractérisation de l'argilosité

a) *Les forages issus de la Banque de données du Sous-Sol (BSS) et les relevés issus de reliquats azotés post-absorption (RPA) 2021*

Le BRGM est chargé de recenser les ouvrages souterrains (forages, sondages, puits) réalisés sur le territoire français, et déclarés dans le cadre du code minier.

Ces forages et autres ouvrages souterrains sont bancarisés et classifiés dans la BSS consultable à travers le portail internet ©InfoTerre (<https://infoterre.brgm.fr>).

La classification des forages est fonction de la qualité des données disponibles lors de la déclaration. Il est ainsi possible de réutiliser les informations géologiques disponibles.

Sur le secteur d'étude, on recense dans la BSS 16 ouvrages avec des terrains argileux décrits dans les premières tranches du sol (Illustration 19 et Illustration 21). Les forages utilisés dans le cadre de cette étude sont les cercles bleus de l'illustration 21.

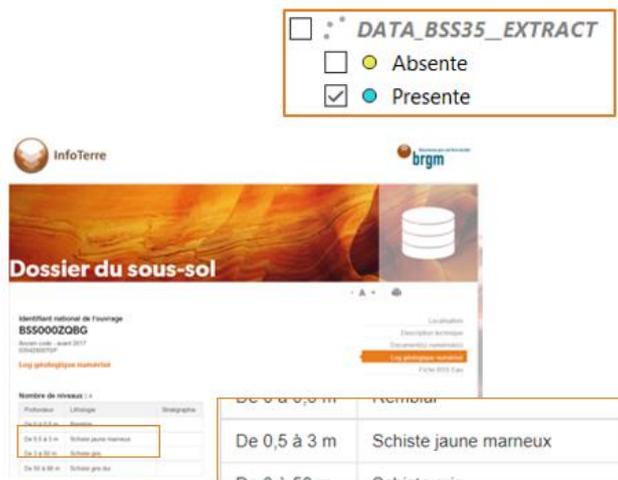


Illustration 19 : En haut, possibilité de savoir dans la BSS, si une coupe géologique est présente ou pas ; En bas, exemple de descriptions disponibles (Source : ©InfoTerre).

Les autres informations sont des sondages pédologiques réalisés lors des analyses de reliquats azotés post-absorption (RPA, 2021). Lors de ces relevés, une base de données associée fait état de la présence de cailloux, qui peut être interprétée par rapport au profil théorique de l'altération, pour la caractérisation des allotérites – « peu ou pas de cailloux », les isaltérites – « quelques cailloux » ou encore la zone fissurée – « beaucoup de cailloux » (Illustration 8 et 20).

La description est succincte avec : « beaucoup de cailloux, peu ou pas et quelques cailloux » (Illustration 20).

ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de restauration des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche (Moulins)



Illustration 20 : Description associée au RPA de 2021 (Source EPTB Vilaine).

L'ensemble des points complémentaires (BSS et RPA 2021) sont présentés ci-dessous. Ils confirment la cartographie de terrain et apportent des informations supplémentaires (Illustration 20).

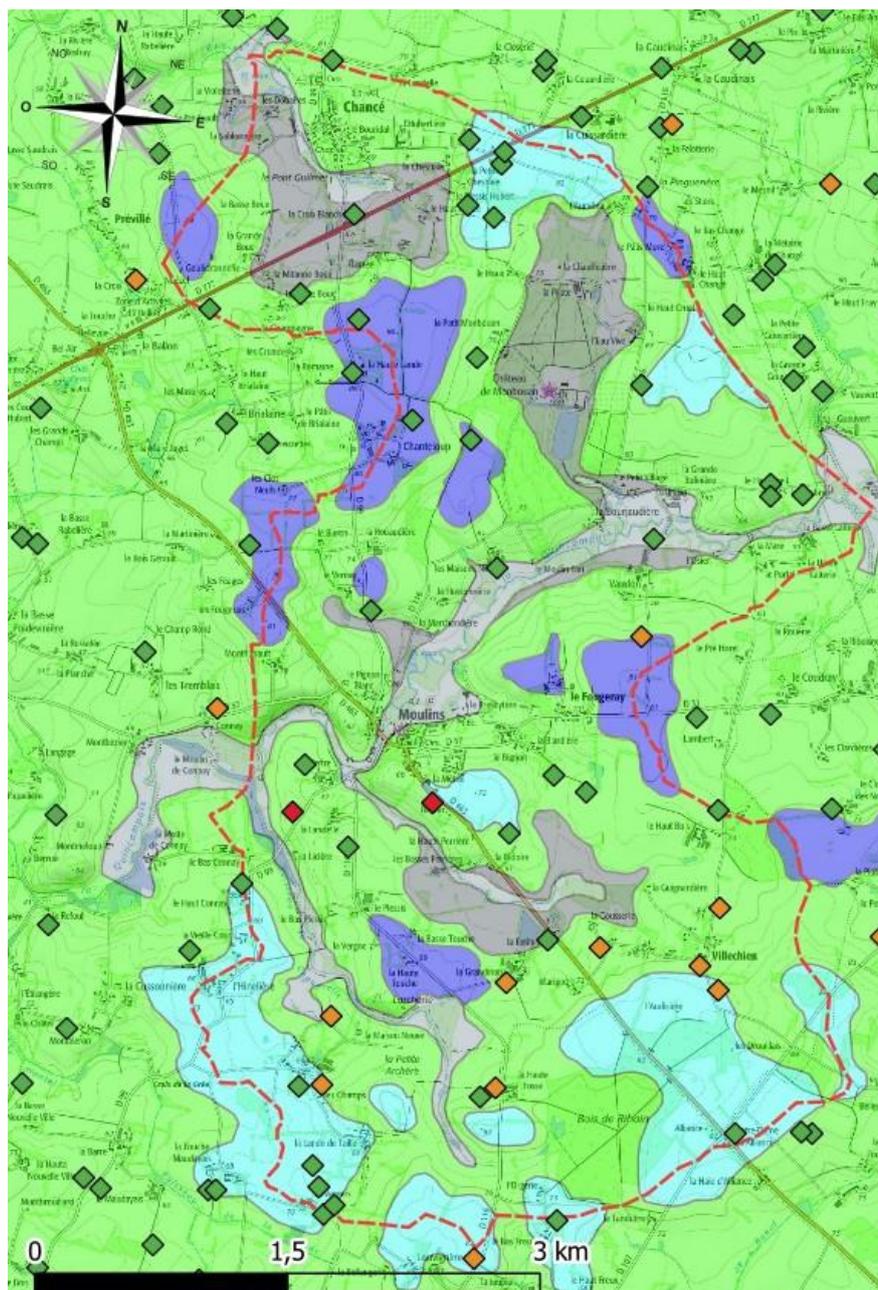


Illustration 21 : Nouvelle carte géologique du projet avec les points complémentaires d'information sur l'argilosité des sols : Forages de la BSS – cercles bleus et RPA 2021 – losanges fonction de l'information de l'illustration 20.

b) La spectrométrie gamma U/Th/K

En 1998, le BRGM a conduit une campagne de géophysique aéroportée sur le Massif armoricain (Bretagne, Pays de Loire et une partie de la Basse Normandie). Réalisée à la demande du Ministère de l'Industrie, cette opération avait pour objectif de doter la région de données géophysiques, compléments indispensables aux données géologiques (Illustration 22).

La radiométrie spectrale gamma ou spectrométrie gamma permet d'évaluer, les concentrations des radioéléments naturels : Uranium (U), Thorium (Th) et Potassium (K), dans les sols et les formations géologiques affleurantes.

Ces concentrations U/Th/K sont ensuite interprétées en termes de lithologies (nature des roches) et de caractérisation des formations superficielles (d'altération). La méthode est peu pénétrante, sur 0,5 m environ de profondeur.

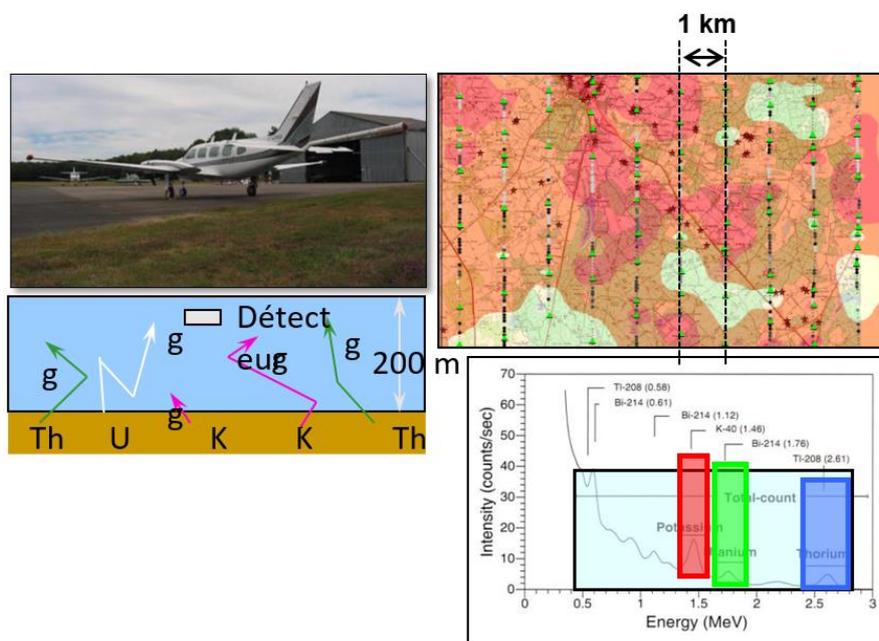


Illustration 22 : Schéma de principe du levé aéroporté de la radiométrie spectrale gamma (radioactivité naturelle de la roche, Source : BRGM)

Les informations de radiométrie spectrale gamma obtenues en 1998 ont été utilisées afin de valider la cartographie géologique des formations géologiques superficielles haute résolution (1/10 000) de la zone d'étude.

En effet, l'altération modifie fortement la teneur en radioéléments. Chaque élément va avoir un comportement spécifique caractéristique d'un phénomène géologique comme l'altération ou le métamorphisme.

Par exemple, l'oxydation et le lessivage de l'uranium des granites vont le redéposer dans des formations sédimentaires éloignées, tandis que le thorium, qui n'a pas de forme soluble, se déplace peu, d'où une diminution du rapport U/Th lié à l'altération.

En revanche, le transport du potassium, très soluble, par l'eau sous forme colloïdale, va entraîner des concentrations faibles caractéristiques de la présence de profils d'altération. Plus les teneurs vont être faibles et plus la zone sera altérée donc argileuse.

Ainsi on remarque sur la zone d'étude (Illustration 23), que les plateaux montrent en règle générale des teneurs en potassium les plus faibles (en rouge sur l'illustration 22). Ceci confirme la cartographie des altérites.

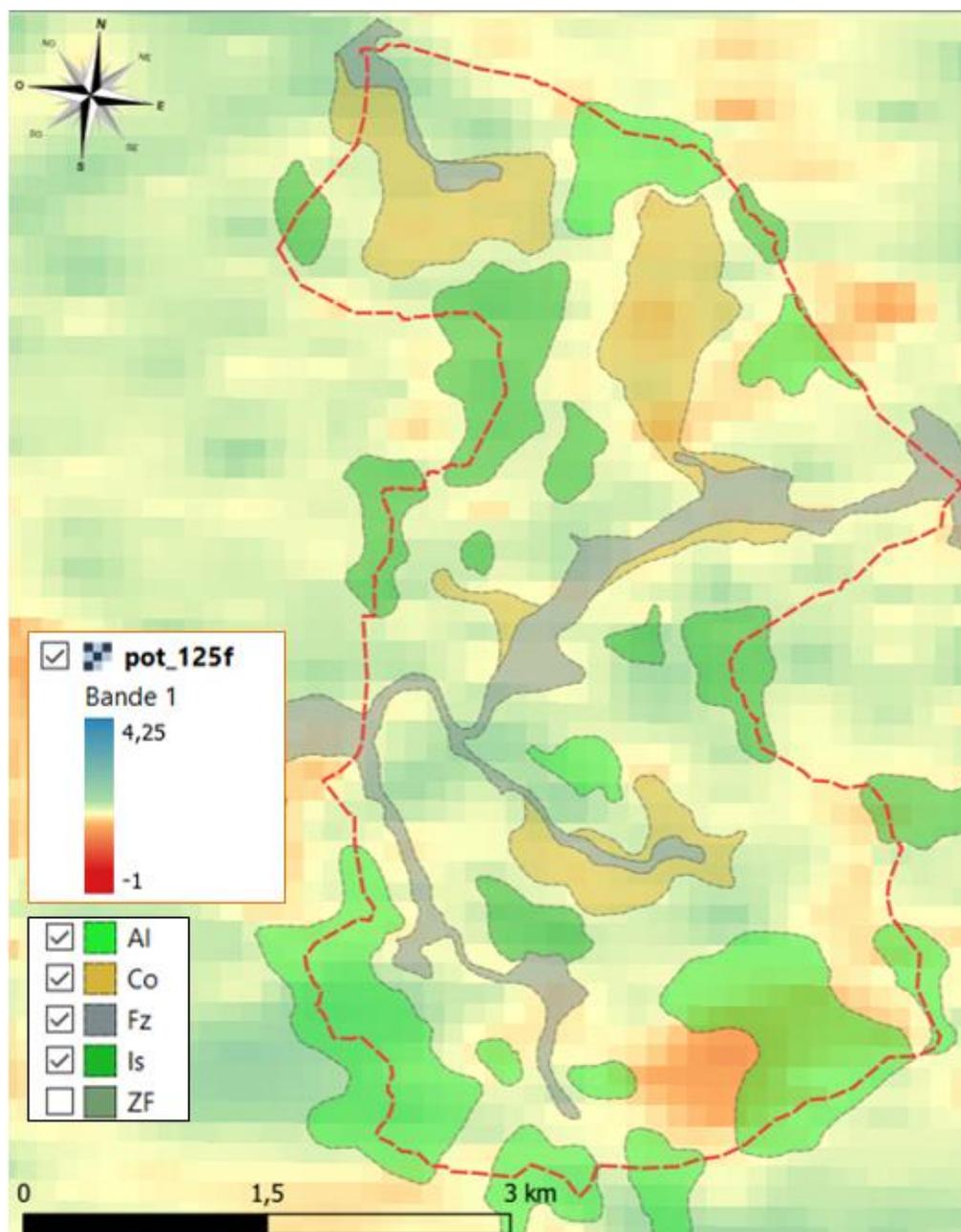


Illustration 23 : Superposition de la radiométrie spectrale gamma – Teneurs en potassium et de la cartographie du régolithe (des formations géologiques superficielles)

Les investigations et les données utilisées diverses : géologiques (cartographie et forages), pédologiques (sondages) et géophysiques (radiométrie spectrale gamma) ont permis de produire une carte géologique au 1/10 000 de la zone d'étude et de caractériser les zones argileuses.

Toutes ces données convergent vers un modèle cartographique cohérent qui pourra être utilisé afin de définir les zones d'infiltration potentielles et/ou les zones où les drains agricoles n'ont a priori aucune efficacité.

Il est cependant indispensable de superposer cette cartographie au modèle de nappe souterraine et à la carte des pentes des terrains du secteur étudié.

2.2. DONNEES HYDROLOGIQUES

2.2.1. Evaluation des écoulements superficiels

L'EPTB Vilaine a réalisé un suivi des écoulements des cours d'eau sur le terrain pendant les campagnes piézométriques de novembre 2020 (basses eaux) et mars 2021 (hautes eaux). L'information sur la présence d'un écoulement dans les cours d'eau est importante pour l'élaboration des cartes piézométriques (prise en compte des cours d'eau comme exutoires des nappes si un écoulement est observé).

En novembre 2020, des ruptures d'écoulement (absence d'écoulements mais présence de trous d'eau) voire des assecs (aucune trace d'eau) ont été constatés (Illustration 24). La présence d'écoulement entre les stations de mesure n'a pas été vérifiée sur le terrain mais a été extrapolée à partir des observations sur les stations.

En mars 2021, aucune rupture d'écoulement et aucun assec n'ont été constatés sur les cours d'eau de la zone d'étude.

ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de restauration des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche (Moulins)

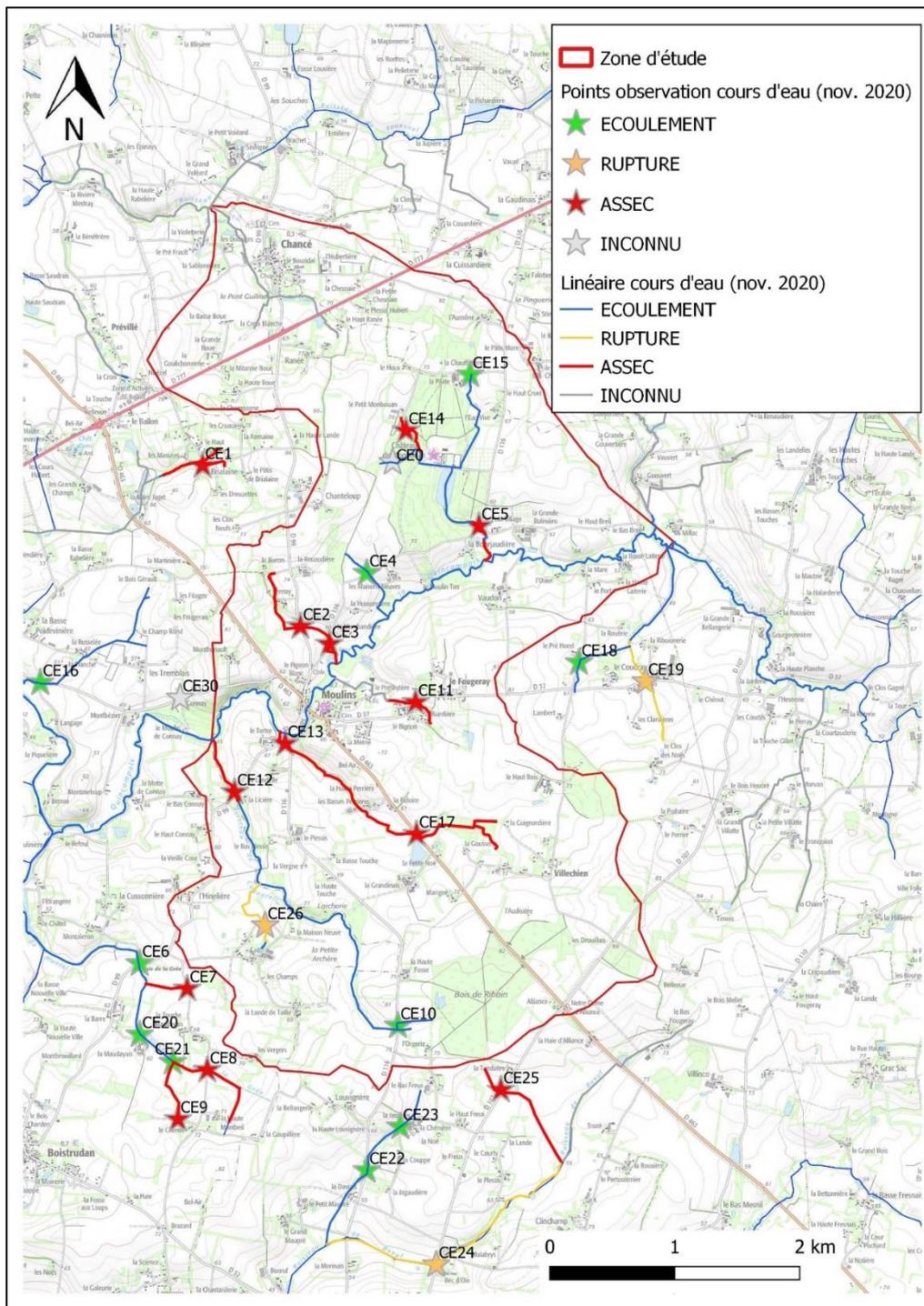


Illustration 24 : Evaluation de l'écoulement des eaux de surface pendant la campagne piézométrique de basses eaux (novembre 2020)

2.2.2. Campagnes de jaugeages

Il n'existe pas de station hydrométrique sur la Quincampoix.

Une campagne de jaugeage au micromoulinet a donc été réalisée par le BRGM pendant la campagne piézométrique de hautes eaux les 29 et 31/03/2021, par temps sec, afin de mesurer le débit des cours d'eau. Les jaugeages ont été réalisés avec un micromoulinet C2 de la société OTT. Le micromoulinet permet de calculer la vitesse du courant à partir du nombre de tours de son hélice. Les mesures sont réalisées sous forme de profils dans le cours d'eau, avec des mesures effectuées à différentes profondeurs. Un débit moyen sur la section considérée peut ainsi être calculé.

4 points ont été jaugés sur la Quincampoix et 6 points sur ses affluents dans le secteur d'étude et en aval (Illustration 25).

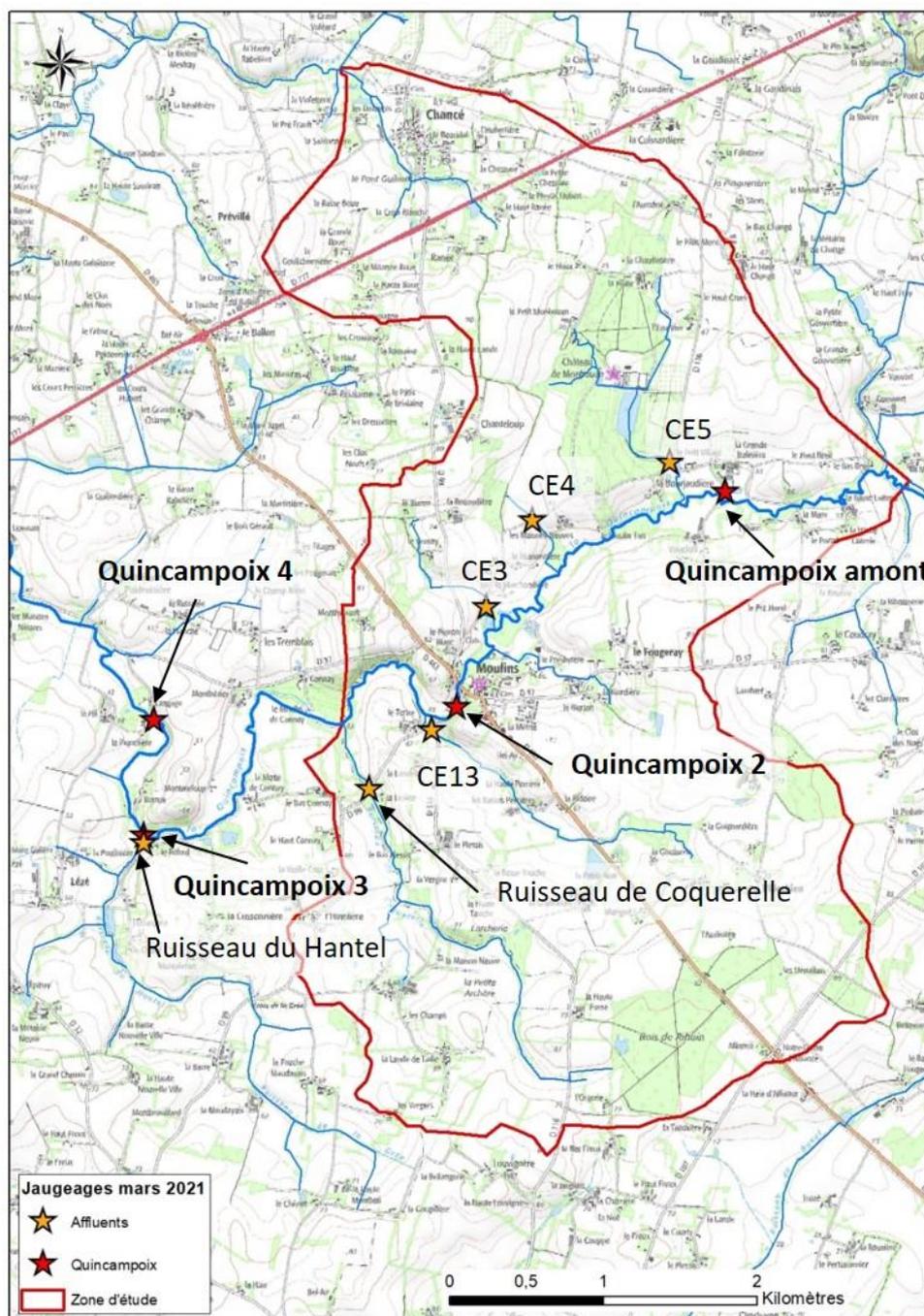


Illustration 25 : Localisation des jaugeages réalisés en mars 2021

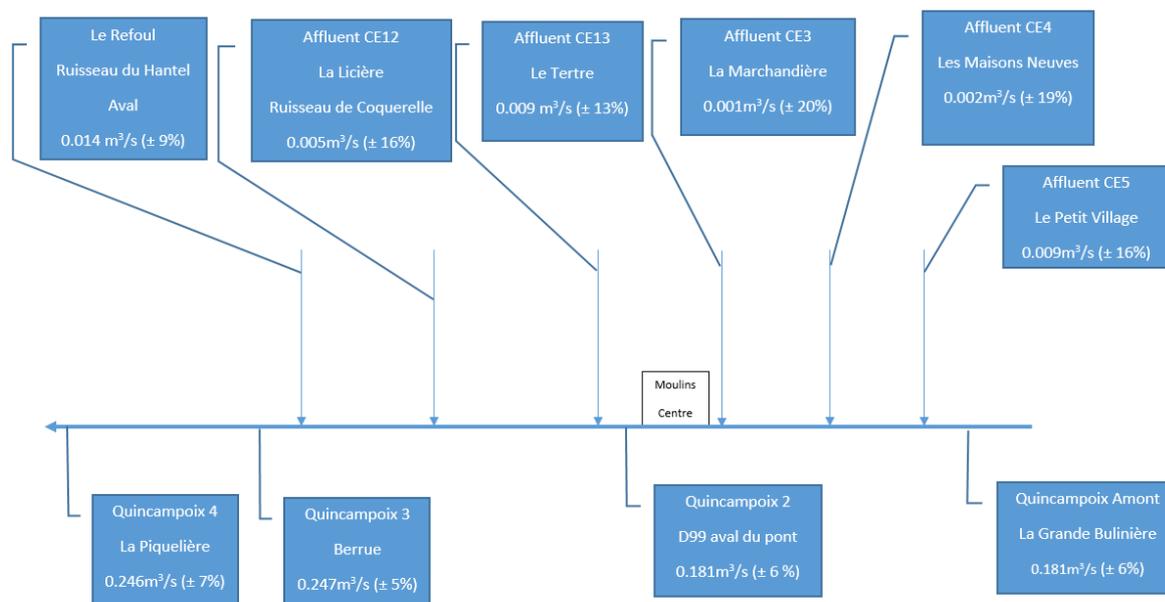
ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de restauration des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche (Moulins)



Illustration 26 : Jaugeages au micromoulinet le 29/03/2021 (photographies BRGM)

Les résultats des jaugeages sont les suivants :

ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de restauration des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche (Moulins)



Point jaugé	Lieu-dit	Jaugeage mars 2021 (m ³ /s)	Surface BV amont (km ²)	Débit spécifique (m ³ /s/km ²)
Quincampoix amont	La Grande Bulinière	0.181	66.90	0.00271
CE5	Le Petit Village	0.009	2.51	0.00359
CE4	Les Maisons Neuves	0.002	0.36	0.00556
CE3	La Marchandière	0.001	0.52	0.00192
Quincampoix 2	D99	0.181	73.13	0.00248
CE13	Le Tertre	0.009	3.35	0.00269
CE12 (Ruisseau de Coquerelle)	La Licière	0.005	4.28	0.00117
Ruisseau du Hantel	Le Refoul	0.014	5.42	0.00258
Quincampoix 3	Berrue	0.247	88.86	0.00278
Quincampoix 4	La Piquelière	0.246	89.50	0.00275

Illustration 27 : Résultats des jaugeages réalisés sur la Quincampoix et ses affluents en mars 2021

Une marge d'erreur de 5 à 20 % a été estimée sur ces jaugeages. L'incertitude est d'autant plus forte que le débit mesuré est faible.

Les débits mesurés sont compris entre 0,181 m³/s et 0,246 m³/s sur la Quincampoix. Ils sont croissants vers l'aval, entre les stations Quincampoix 2 et Quincampoix 3, mais montrent peu de différences entre les stations Quincampoix amont et Quincampoix 2, ainsi qu'entre Quincampoix 3 et Quincampoix 4. L'augmentation de débit observée entre les points Quincampoix 2 et Quincampoix 3 (+ 0,066 m³/s) ne semble pas s'expliquer uniquement par la contribution des 3 affluents (CE13, CE 12 et Ruisseau du Hantel : écoulement total de 0,028 m³/s). Cet écart peut s'expliquer par les incertitudes de mesure ou par une contribution plus forte des eaux souterraines à l'alimentation de la Quincampoix dans ce secteur.

2.3. CARTES PIEZOMETRIQUES

2.3.1. Campagnes piézométriques

c) Préparation

En amont des campagnes piézométriques, l'ensemble des points d'eau souterraine (puits, forages, sources) ont été recensés sur la zone d'étude à partir des données disponibles dans la BSS (Banque de données du Sous-Sol ; <https://infoterre.brqm.fr/page/banque-sol-bss>). Toutes

les données sur les ouvrages (forages, sondages, puits et sources) souterrains sont collectées pour être conservées dans cette base de données nationale gérée par le BRGM.

Ce premier recensement a permis d'identifier 11 points d'eau dans la BSS (parmi les 38 ouvrages enregistrés en BSS sur la zone d'étude) mais sans information sur le niveau de leur accessibilité sur le terrain. La BSS étant une base de données déclarative (pour des ouvrages de plus de 10 m de profondeur) récoltant des informations recueillies durant la foration, le devenir des ouvrages n'est pas toujours bancarisé. Certains de ces ouvrages peuvent donc être rebouchés, ou avec des incertitudes de localisation (selon la qualité des données fournies par le pétitionnaire). A l'inverse, il existe probablement des ouvrages non déclarés en BSS sur le secteur d'étude.

Les mesures réalisées sur le terrain ont fait l'objet de fiche de terrain (Annexe 1) et comportent notamment les informations suivantes :

- les coordonnées X, Y du site,
- la cote topographique Z du sol,
- l'identification d'un repère et la mesure de sa hauteur par rapport au sol,
- le niveau piézométrique relevé par rapport au repère de mesure,
- la profondeur de l'ouvrage par rapport au repère de mesure,
- l'usage de l'ouvrage et la présence ou non d'un prélèvement par pompage,
- les photographies du site.

La cote topographique du sol, celle du repère de mesure et du niveau piézométrique, ont été déterminées par calcul à partir du Modèle numérique de terrain (MNT) à 5 m fourni par l'EPTB Vilaine. La plupart des points ont également bénéficié d'un nivellement par GPS différentiel (voir § e)) : c'est cette cote topographique qui a été utilisée dans la suite de l'étude.

Une campagne préparatoire a par ailleurs, été réalisée par l'EPTB Vilaine afin de recenser les points d'eau accessibles et de réaliser des premières mesures piézométriques en juillet 2020.

d) Campagne piézométrique basses eaux

Cette campagne a été réalisée par l'EPTB Vilaine, du 3 au 6 novembre 2020. Pour les eaux souterraines, cette période est normalement caractéristique des basses eaux.

Le piézomètre de référence du BRGM le plus proche du secteur d'étude est situé à Arbrissel (BSS000ZQXN - <https://ades.eaufrance.fr/Fiche/PtEau?Code=03546X0017/F>), à 10 km au sud de Moulins. Il capte les schistes du Briovérien. Il indiquait effectivement une période de basses eaux, avec les niveaux les plus bas enregistrés sur l'année 2020 et conformes aux moyennes de novembre calculées sur la période 2005-2022.

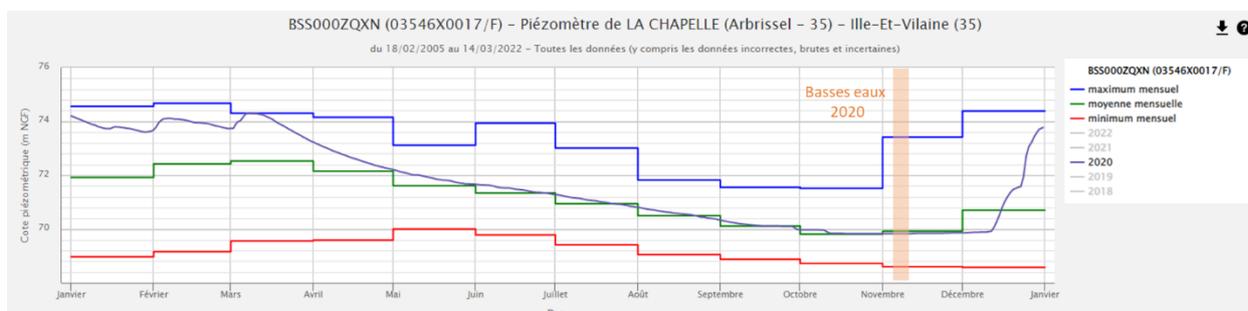


Illustration 28 : Chronique piézométrique 2020 à Arbrissel (source : ADES)

Lors de la campagne piézométrique de basses eaux, 43 points d'eau ont été mesurés, dont 24 dans le secteur d'étude soit une densité de 1 point tous les 0,8 km² sur le secteur d'étude (Illustration 12).

Parmi les points mesurés, aucun n'était sec (un niveau sec indique que le niveau piézométrique au droit de l'ouvrage est plus bas que le fond de l'ouvrage) et 2 étaient en pompage (le niveau dynamique mesuré est donc plus bas que le niveau piézométrique statique de la nappe au repos).

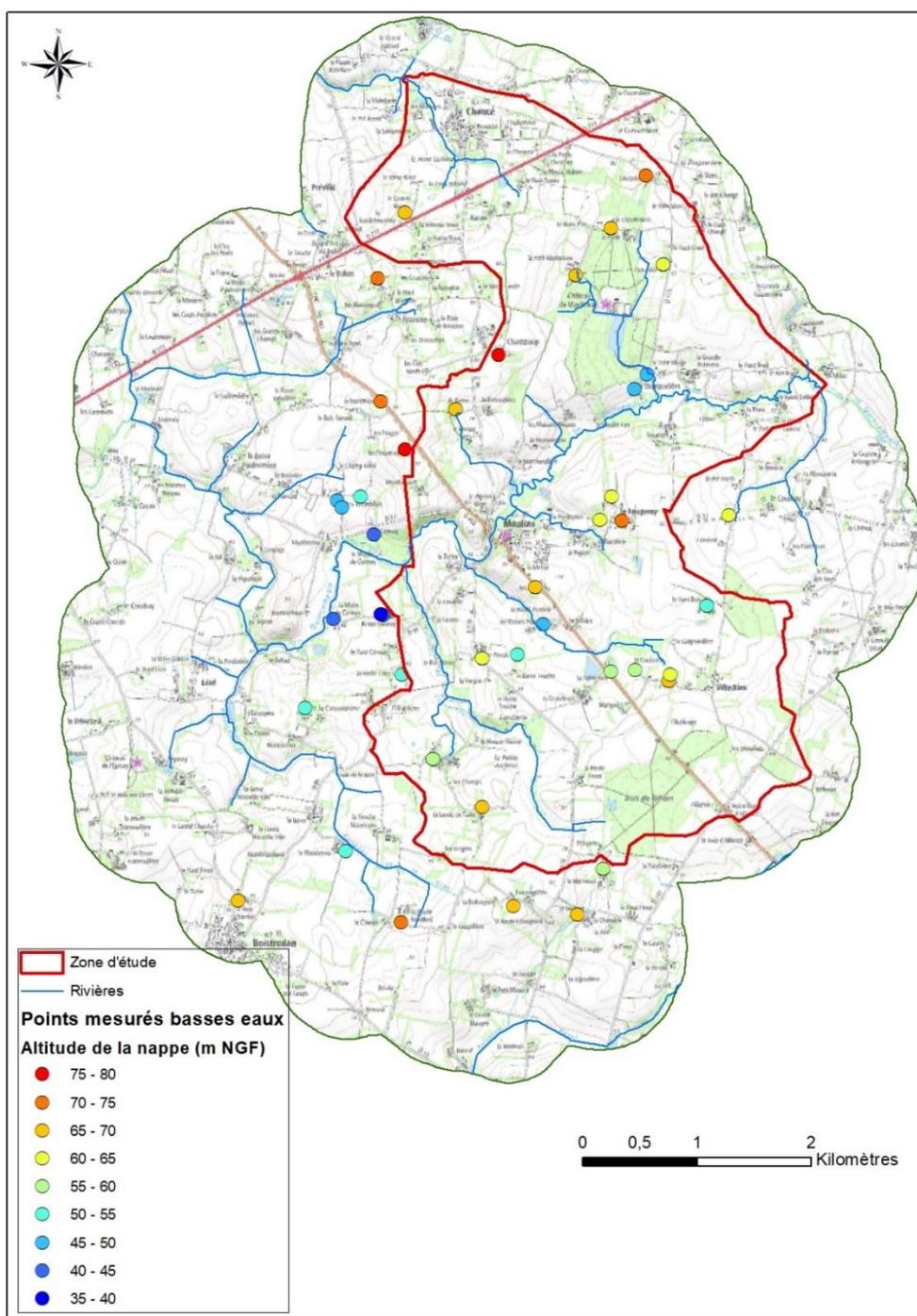


Illustration 29 : Localisation des points mesurés pendant la campagne piézométrique basses eaux et altitude de la nappe

e) Campagne piézométrique hautes eaux

La deuxième campagne piézométrique s'est déroulée du 30 mars au 1^{er} avril 2021. Pour les eaux souterraines, cette période est normalement caractéristique des hautes eaux.

En 2021, la vidange des nappes a commencé de manière précoce, dès le mois de février. Les niveaux observés fin mars 2021 sur le piézomètre d'Arbrissel ne correspondent donc pas aux plus hautes eaux de l'année hydrologique (atteintes entre décembre 2020 et février 2021) mais il s'agit plutôt de niveaux historiques moyens pour un mois de mars, correspondant au début de la vidange des nappes, comme le montre la chronique piézométrique ci-dessous (Illustration 30).

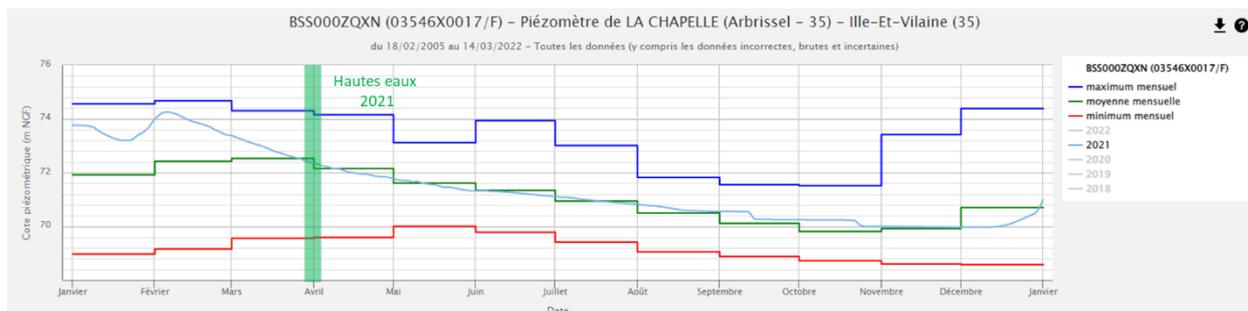


Illustration 30 : Chronique piézométrique 2021 à Arbrissel (source : ADES)

Lors de la campagne piézométrique de hautes eaux, 43 points d'eau ont été mesurés (dont 25 sur le secteur d'étude, soit une densité équivalente à celle de la campagne précédente, de 1 point tous les 0,8 km² sur le secteur d'étude et Illustration 31). Par rapport à la campagne basses eaux, 4 nouveaux points ont été mesurés et à l'inverse, 4 points mesurés en basses eaux n'ont pas pu être mesurés lors de la campagne hautes eaux (propriétaire absent).

Parmi les points mesurés, aucun n'était sec et 2 étaient en pompage.

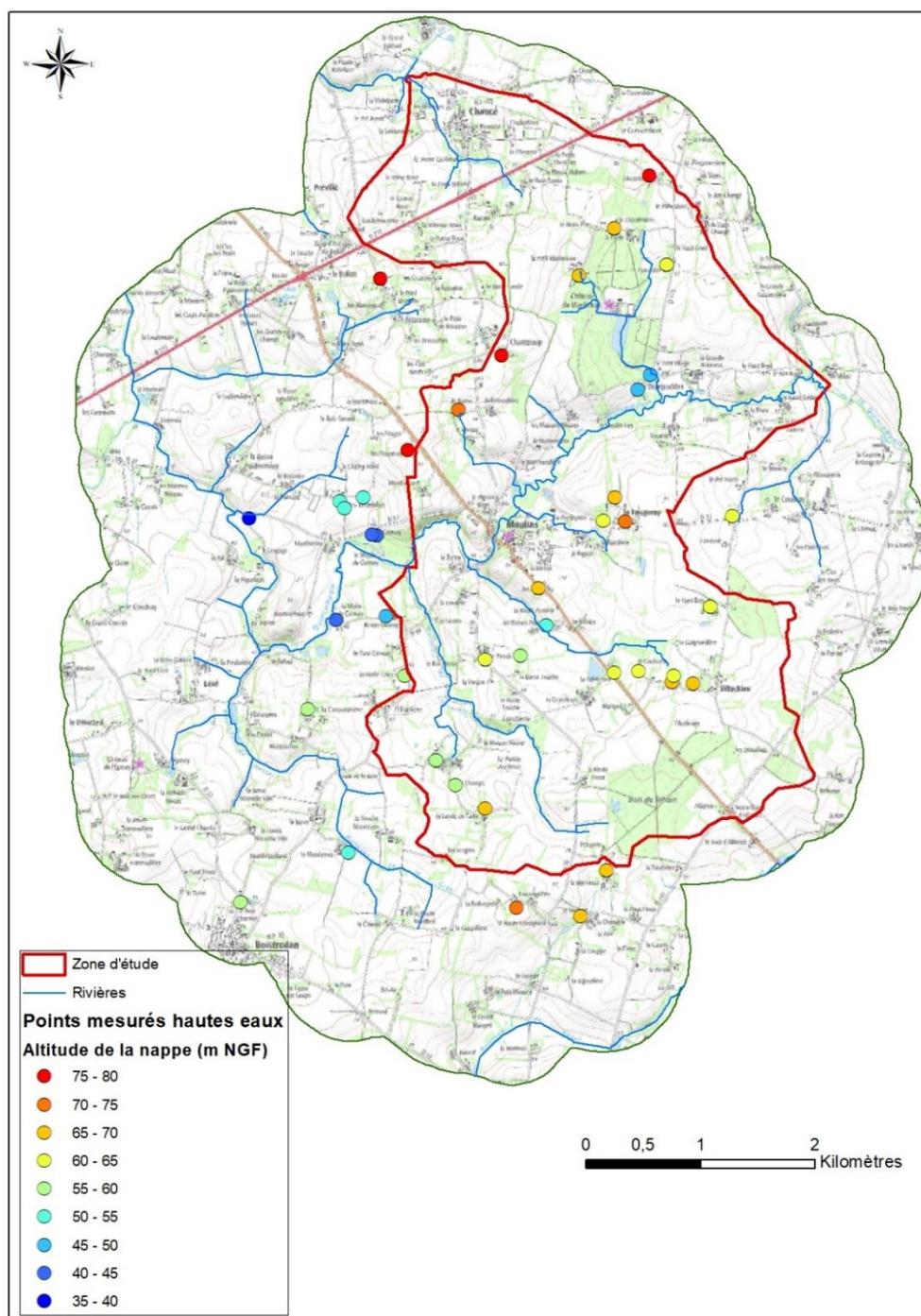


Illustration 31 : Localisation des points mesurés pendant la campagne piézométrique hautes eaux et altitude de la nappe

Lors de cette 2^{ème} campagne, 39 points de mesures ont été nivelés par le BRGM grâce à des GPS différentiels, permettant d'obtenir une précision en altitude (Z) inférieure à 3 cm pour 83% des points nivelés (et inférieure à 2 cm pour 37% des points nivelés). Seuls 2 points nivelés ont une précision en Z de plus de 10 cm, en raison de la localisation de ces points (pied d'un bâtiment ou sous des arbres) ne permettant pas une réception optimale du signal GPS.

f) *Bilan des campagnes piézométriques*

Au total, 47 points ont été mesurés pendant ces campagnes piézométriques (43 en basses eaux et 4 en hautes eaux) et 39 points ont été mesurés en hautes eaux et en basses eaux. Il s'agit majoritairement de puits (35) dont la profondeur varie entre 2,5 et 16,5 m mais 12 forages ont également été mesurés (profondeur comprise entre 25 et 120 m - Illustration 32).

Parmi les points mesurés, 24 étaient situés dans le secteur d'étude en basses eaux et 25 en hautes eaux (soit une densité de 1 point pour 0,8 km²).

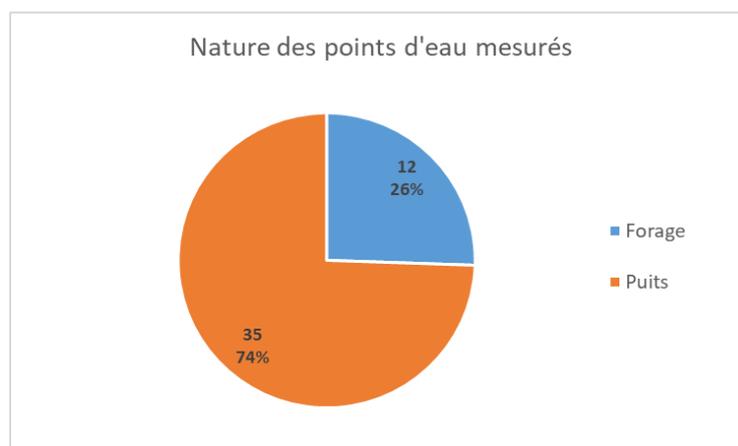


Illustration 32 : Nature des points d'eau mesurés pendant les campagnes piézométriques

Seuls 3 points d'eau sur les 11 bancarisés en BSS ont pu être mesurés sur le terrain. Certains points présents dans la BSS n'ont pu être retrouvés sur le terrain. Ils ont probablement été rebouchés sans que l'information ait été mise à jour dans la BSS (base déclarative au moment de la création de l'ouvrage). D'autres forages n'étaient pas accessibles (pompage, refus propriétaire, ...). A l'inverse, 44 points d'eau non enregistrés en BSS, identifiés directement sur le terrain lors des différentes campagnes piézométriques, ont pu être mesurés. Ces 44 points ont par la suite été bancarisés dans la BSS.

Grâce à une recherche minutieuse d'ouvrages directement sur le terrain, le nombre de mesures est proche de ce qui était espéré au début de l'étude (objectif initial de 1 point tous les 0,75 km²), mais la répartition de ces points n'est pas homogène (manque de données au niveau des plateaux). Le bilan de ces campagnes est néanmoins satisfaisant car la densité de points permet de réaliser une interpolation de bonne qualité. Cette interpolation a permis de produire une grille des altitudes de la nappe (hautes et basses eaux) au pas de 50 m.

Sur les points de mesure, la profondeur moyenne de la nappe par rapport au niveau du sol se situe à 4,79 m en basses eaux et à 3,02 m en hautes eaux. Un seul point présente un niveau piézométrique plus élevé en basses eaux qu'en hautes eaux (+ 32 cm). Le battement moyen de la nappe est de 1,87 m entre basses eaux et hautes eaux (il est de 2,5 m sur le piézomètre d'Arbrissel sur cette même période), et de 5,98 m au maximum.

Aucun point d'eau artésien (niveau piézométrique situé au-dessus de la surface du sol) n'a été rencontré.

	Profondeur de la nappe (m)		Battement (m)
	Basses eaux (novembre 2020)	Hautes eaux (mars 2021)	Hautes eaux - Basses eaux
Minimum	1.3	0.77	-0.32
Maximum	10.5	7.98	5.98
Moyenne	4.79	3.02	1.87

Illustration 33 : Statistiques de profondeur de la nappe pendant les 2 campagnes piézométriques et du battement de la nappe

2.3.2. Validation des données piézométriques

a) Vérification des données des campagnes piézométriques et suppression des anomalies

Au droit de chaque ouvrage ayant fait l'objet d'une mesure du niveau piézométrique et n'ayant pas été nivelé lors des campagnes de mesure, l'altitude du sol (Zsol) a été extraite du MNT 5 m fourni par l'EPTB Vilaine. L'altitude de la nappe a été calculée en chaque point, en prenant en compte la hauteur du repère de mesure et la profondeur de la nappe par rapport à ce repère.

Chaque mesure du niveau piézométrique a fait l'objet d'une validation par un hydrogéologue. Certaines informations essentielles ont notamment été vérifiées, afin d'identifier les mesures ne représentant pas le niveau piézométrique statique de la nappe :

- les coordonnées géographiques ;
- la cohérence entre l'altitude mesurée du point et celle calculée d'après le MNT ;
- les éventuelles influences (pompage en cours ou pompage sur un point voisin), ...

Le contrôle des données et la phase d'élaboration des cartes piézométriques ont permis d'identifier et d'écartier certaines données incohérentes : influence d'un pompage (niveau dynamique), niveau statique incohérent... Plusieurs mesures ont été écartées :

- en basses eaux, 2 mesures de niveau ont été effectuées alors qu'un pompage était en cours et n'ont pas été prises en compte pour l'interpolation. Ces points peuvent tout de même servir de points de contrôle de la carte piézométrique (la cote piézométrique au droit de ces points doit être supérieure au niveau piézométrique dynamique mesuré) ;
- en hautes eaux, 2 mesures ont également été effectuées alors qu'un pompage était en cours et ont été écartées pour l'interpolation.

Finalement, les cartes piézométriques basses eaux 2020 et hautes eaux 2021 ont été interpolées et élaborées chacune sur la base de 41 mesures validées du niveau statique.

b) Création d'une base de données pour l'interpolation de l'altitude de la nappe

Les informations suivantes ont été intégrées dans une base de données utilisée pour la construction des cartes piézométriques :

- les 41 mesures piézométriques de la campagne basses eaux 2020 et les 41 mesures de la campagne hautes eaux 2021 ;
- 30 sources provenant de l'IGN (BD TOPO®) ;

- les cours d'eau, représentés par 124 points associés à une altitude (celle du modèle numérique de terrain - MNT 5 m au droit du point) et disposés le long des rivières tous les 500 m environ.

L'interpolation finale de l'altitude de la nappe fournit une grille au pas de 5 m (grille du MNT fourni par l'EPTB Vilaine au pas de 5 mètres intégrée au calcul).

Les informations sur l'état des cours d'eau (écoulement ou à sec) issues des campagnes de terrain de novembre 2020 (Illustration 24) et mars 2021 de l'EPTB Vilaine ont également été intégrées à la base de données (voir chapitre 2.2.1).

2.3.3. Interpolation des cartes piézométriques

Les cartes piézométriques ont été réalisées selon la démarche suivante (Illustration 34) :

- analyse et codage des données : des mesures piézométriques et des points de contrainte imposés ;
- approche géostatistique avec interpolation par krigeage avec modèle de variogramme de la cote piézométrique (cf. Annexe 2) ;
- contrôle des résultats.

Les cartes piézométriques ont été réalisées en utilisant le logiciel Suite GDM 2018 (Geological Data Management - <http://gdm.brgm.fr> et <https://www.brgm.fr/fr/logiciel/gdm-suite-gerer-modeliser-visualiser-donnees-geoscientifiques-3-dimensions>). La suite GDM 2018, développée et éditée par le BRGM, est conçue pour compiler, interpoler et visualiser des données géoscientifiques, dont des données hydrogéologiques. Le « workflow » mis en place comprend la vérification des données, la gestion des paramètres de calcul, les contrôles de cohérence entre les données, la génération des interpolations des surfaces piézométriques et les restitutions graphiques en cartes des interpolations (Illustration 34).

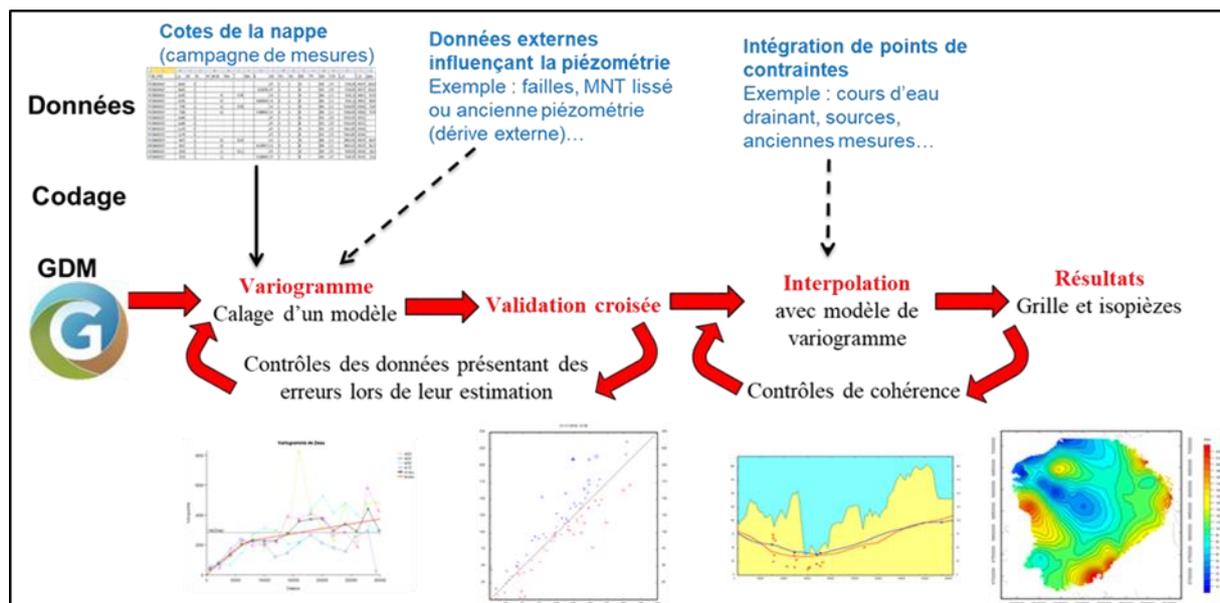


Illustration 34 : Principe de la modélisation d'une carte piézométrique sous GDM

La base de données rassemblant les informations nécessaires à l'élaboration des cartes piézométriques a été organisée de façon à utiliser les mesures des piézomètres comme « points de passage » (équivalent aux données d'entrée) dans l'interpolation. L'ensemble des données est codé avec une valeur de « Zeau », correspondant au toit de la nappe, c'est-à-dire à l'altitude de la surface piézométrique (une colonne Zeau3 pour les basses eaux et une colonne Zeau4 pour les hautes eaux ; cf. Annexe 1).

Pour procéder à l'interpolation des surfaces piézométriques, une grille de calcul de maille 5 m par 5 m a été générée, identique à celle du MNT.

Tous les points de passage (Zeau) ont été pris en compte dans un premier temps lors du calcul du variogramme. Dans un second temps, des sources provenant de l'IGN (BD TOPO®) ont été intégrées au calcul du variogramme afin de pallier au manque de mesures et de mieux caractériser les zones géographiques de vallée (24 sources en basses eaux et 30 en hautes eaux, d'après les informations disponibles sur l'écoulement des cours d'eau pendant les 2 campagnes piézométriques)). Il faut en effet trouver un variogramme représentatif de tous les contextes (densité homogène en plateau, vallée, coteau). C'est ce nouveau variogramme, calculé après ajout des sources, et le modèle ajusté qui ont été utilisés dans la suite de l'étude, en hautes eaux et en basses eaux.

La méthode d'interpolation utilisée est le krigeage, avec un modèle de variogramme pour la surface piézométrique (Illustration 35). Le variogramme permet d'évaluer la corrélation entre les observations en fonction de la distance qui sépare les points d'observation. La méthode d'interpolation par krigeage avec modèle de variogramme permet de procéder à une validation des estimations par la méthode nommée « validation croisée ». Cette méthode permet d'identifier rapidement des points erronés, sur ou sous-estimés. Une fois les points aberrants identifiés puis corrigés ou éliminés, un nouveau variogramme est calculé pour détecter les erreurs résiduelles. Le processus peut être réitéré plusieurs fois pour éliminer toutes les erreurs.

a) *Variogramme et calage d'un modèle sur les mesures piézométriques et les sources*

Plusieurs méthodes d'interpolation, intégrant des modèles de variogrammes différents, ont été testées (cf. Annexe 2). Selon la connaissance du contexte hydrogéologique, le modèle de variogramme le plus approprié et robuste a été adopté :

- en basses eaux, il s'agit d'un modèle sphérique (Illustration 35 et Illustration 36). La variance est de 117,5 et l'écart type de 10,8.

ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de restauration des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche (Moulins)

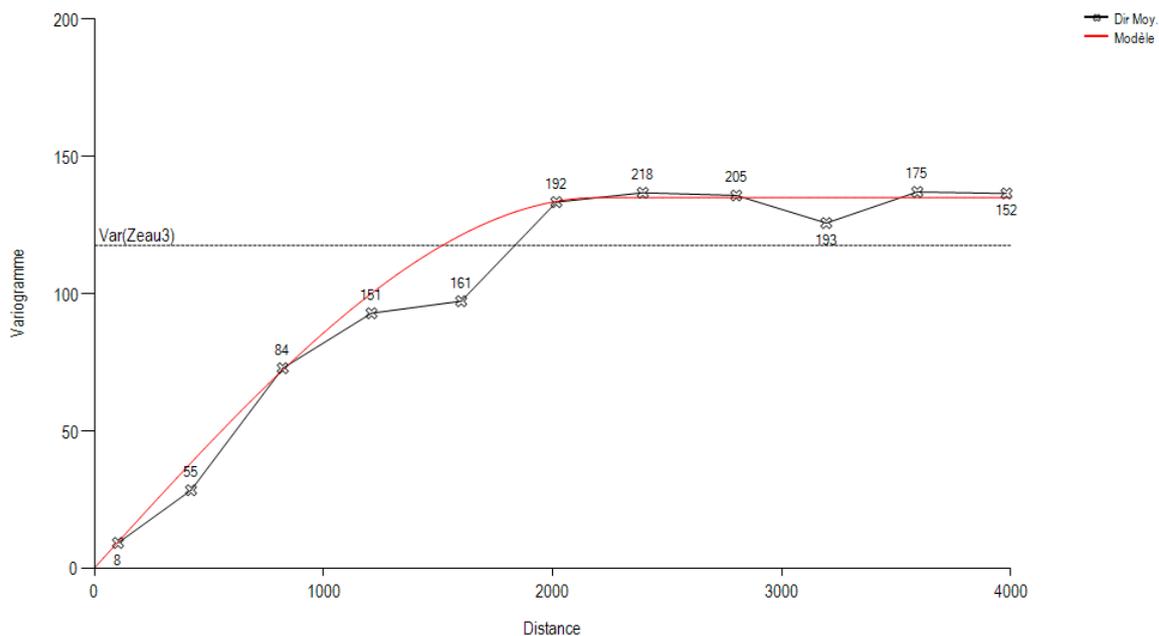


Illustration 35 : Variogramme (en noir) et modèle de variogramme (en rouge) pour la campagne de basses eaux

Effet de pépite : 0

Composantes du modèle				
N°	Type du modèle	Palier (ou exposant du modèle puissance)	Portée / Facteur d'échelle (direction PSI)	Type d'anisotropie
1	Sphérique	135	2200	Isotropique

Illustration 36 : Paramètres du modèle de variogramme pour la campagne de basses eaux

- en hautes eaux, il s'agit d'un modèle emboîté sphérique et cubique (Illustration 37 et Illustration 38). La variance est de 119,35 et l'écart type de 10,92.

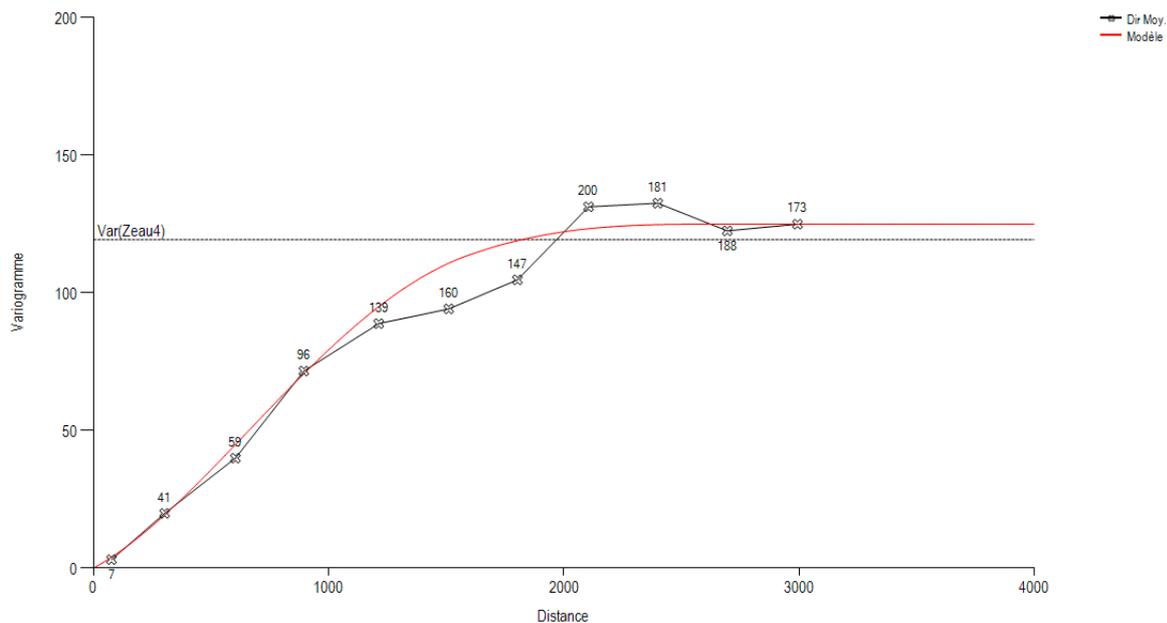


Illustration 37 : Variogramme (en noir) et modèle de variogramme (en rouge) pour la campagne de hautes eaux

Effet de pépite :

Composantes du modèle				
N°	Type du modèle	Palier (ou exposant du modèle puissance)	Portée / Facteur d'échelle (direction PSI)	Type d'anisotropie
1	Sphérique	50	1600	Isotropique
2	Cubique	75	2800	Isotropique

Illustration 38 : Paramètres du modèle de variogramme pour la campagne de hautes eaux

Les interpolations réalisées à partir de ces variogrammes n'ont cependant pas donné de résultats suffisamment satisfaisants, compte tenu du manque de points de mesure. D'autres solutions existent en domaine de socle pour améliorer l'interpolation, notamment en prenant en compte les cours d'eau.

a) Intégration des cours d'eau drainants

En contexte de nappe libre de socle, les cours d'eau pérennes sont considérés comme des zones d'affleurement de la surface piézométrique (Illustration 39). Les rivières représentent les exutoires de la nappe et la surface piézométrique remonte sous les plateaux. La surface piézométrique est donc toujours comprise dans l'intervalle limité vers le haut par la surface topographique et vers le bas par la surface-enveloppe des rivières pérennes (ou enveloppe de la base des thalwegs).

Lors de l'interpolation de la carte piézométrique sur le territoire de Rennes Métropole (Pinson et al., 2019a) et de Brest Métropole (Lucassou et al., 2021), l'intégration de points de contraintes représentant l'altitude des cours d'eau a permis d'améliorer les résultats de l'interpolation et de tenir compte du contexte hydrogéologique local.

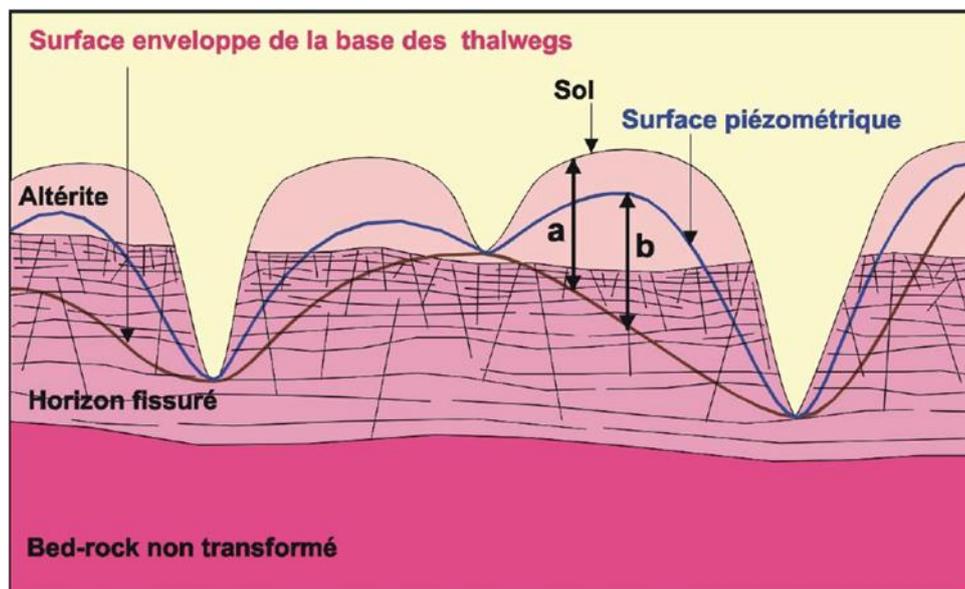


Illustration 39 : Principe de modélisation de la surface piézométrique en domaine de socle (Wyns et al., 2004)

Au droit d'une vallée humide, l'altitude de la nappe est imposée par le niveau de la rivière lorsque celle-ci est en communication hydraulique avec la nappe. Il a été vérifié pour l'ensemble des cours d'eau si ceux-ci étaient ou non en communication hydraulique avec la nappe, en vérifiant si la surface piézométrique brute (tracée uniquement avec les mesures piézométriques des campagnes 2020-2021 et les sources) recoupait la topographie.

Dans un premier temps, des points à niveau piézométrique imposé, placés le long des cours d'eau, ont été ajoutés aux mesures initiales et pris en compte dans l'interpolation, pour contraindre les isopièzes (courbes d'égale altitude de la nappe) à respecter cette configuration hydraulique, sans modifier le variogramme précédemment calé. Ainsi, le niveau piézométrique correspondant aux altitudes des rivières a été imposé au niveau de 92 points en basses eaux et de 124 points en hautes eaux (en tenant compte de l'écoulement des rivières constaté lors des campagnes piézométriques hautes et basses eaux).

Comme l'intégration de ces points sur les rivières n'a pas permis d'obtenir une interpolation satisfaisante (trop de données non robustes lors de la validation croisée), cette méthode a été écartée pour le calage du modèle de variogramme.

b) Intégration de la grille des cours d'eau comme dérive externe

Une méthode a été développée en contexte de socle, afin de transcrire le contrôle de la piézométrie par le niveau des rivières. Il s'agit d'intégrer une dérive externe représentée par la grille interpolée de l'altitude des cours d'eau (Pinson et al, 2019b).

Pour améliorer les résultats, une grille a été interpolée à partir de l'altitude des points sur les cours d'eau (surface-enveloppe de la base des thalwegs) puis intégrée comme dérive externe lors du krigeage.

La corrélation linéaire entre la grille interpolée à partir des cours d'eau et les mesures piézométriques de 2020 et 2021 au droit des mêmes points est moyenne, avec un coefficient de corrélation de 0,77 en basses eaux et 0,75 en hautes eaux. La relation quasi linéaire qui existe entre ces deux variables justifie l'utilisation de la méthode dite du « krigeage avec dérive

externe ». Quelques variabilités locales existent toutefois entre les mesures piézométriques et les cours d'eau, sur une dizaine de points.

Les résidus ont ensuite été calculés : ils correspondent à la différence entre l'altitude des points d'après la grille des cours d'eau interpolée et l'altitude de la nappe mesurée au droit de chaque point lors des campagnes basses eaux et hautes eaux.

Le variogramme des résidus est stationnaire et structuré, représenté par un modèle cubique et un modèle sphérique emboîtés, en basses eaux (Illustration 40 et Illustration 41) et en hautes eaux (Illustration 42 et Illustration 43).

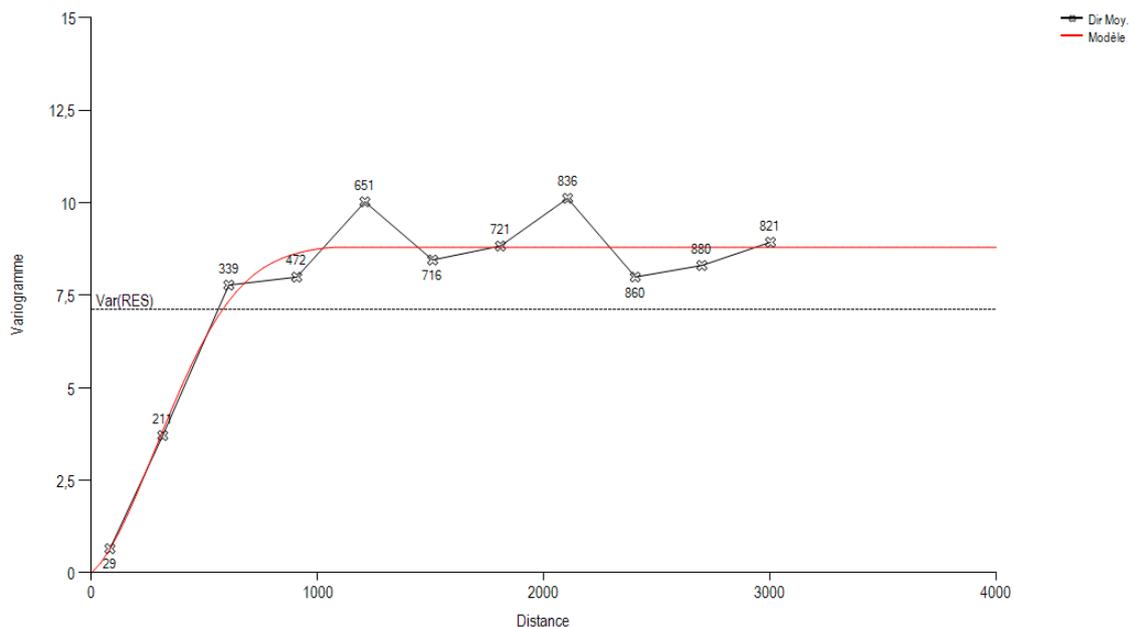


Illustration 40 : Variogramme (en noir) et modèle de variogramme (en rouge) des résidus pour la campagne de basses eaux

Effet de pépite :

Composantes du modèle				
N°	Type du modèle	Palier (ou exposant du modèle puissance)	Portée / Facteur d'échelle (direction PSI)	Type d'anisotropie
1	Cubique	5	970	Isotropique
2	Sphérique	3,8	1100	Isotropique

Illustration 41 : Paramètres du modèle de variogramme des résidus pour la campagne de basses eaux

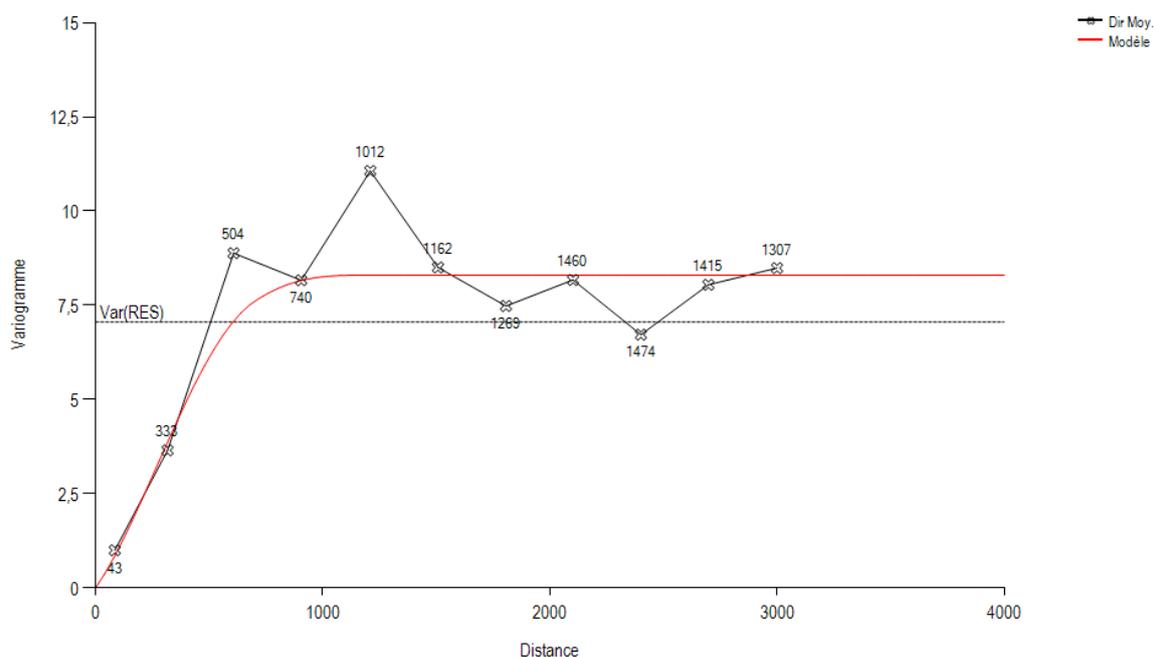


Illustration 42 : Variogramme (en noir) et modèle de variogramme (en rouge) des résidus pour la campagne de hautes eaux

Effet de pépité :

Composantes du modèle				
N°	Type du modèle	Palier (ou exposant du modèle puissance)	Portée / Facteur d'échelle (direction PSI)	Type d'anisotropie
1	Sphérique	4	700	Isotropique
2	Cubique	4,3	1250	Isotropique

Illustration 43 : Paramètres du modèle de variogramme des résidus pour la campagne de hautes eaux

Le krigeage avec dérive externe doit respecter certaines conditions. Dans le cas des variogrammes expérimentaux obtenus, l'effet de pépité est négligeable et la première portée (970 m en basses eaux et 700 m en hautes eaux) est au moins aussi grande que l'espacement entre les points de mesure. La variance est très diminuée (7,12 en basses eaux et 7,05 en hautes eaux) par rapport à celle du variogramme ordinaire sans dérive (117,5 en basses eaux et 119,35 en hautes eaux).

Suite à ces divers tests effectués, la surface piézométrique a ensuite été calculée par « krigeage avec dérive externe » : l'interpolation est réalisée à partir du modèle du variogramme des résidus, en prenant en compte la grille des cours d'eau en dérive externe.

c) *Contrôle des interpolations et points de contrainte imposés*

Plusieurs tests de cohérences ont été effectués sur les données interpolées :

- vérification du variogramme et identification des éventuels points erronés (validation croisée) ;
- test sur les différences entre l'altitude de la topographie (Zsol) et l'interpolation de la surface de la nappe afin de vérifier que les niveaux piézométriques ne se situent pas au-dessus de la topographie ;

- test sur les différences entre l'altitude de la surface de la nappe en hautes eaux et en basses eaux et correction par l'intégration de points de contrainte ;
- contrôle de cohérence au niveau des points secs (pas de points secs identifiés lors des campagnes de mesure) et des points en pompage ;
- contrôle visuel des isopièzes – courbes d'égale altitude de la nappe (limites d'alimentation, drainage, artefacts, influence éventuelle des failles...) et correction par l'intégration de points de contrainte ;
- contrôle de la carte piézométrique au droit des points de contrainte imposés.

Les données d'entrée ont été contrôlées et éventuellement corrigées ou non prises en compte. La base de données finale comprend 206 points de passage (Zeau) sur et autour de la zone d'étude, dont 164 ont servi à l'interpolation des surfaces piézométriques en basses eaux (Illustration 44) et 200 en hautes eaux (Illustration 45). Le contrôle des données et la phase d'élaboration des cartes piézométriques ont permis d'identifier et d'écarter les données incohérentes (niveaux dynamiques, valeurs aberrantes - voir chapitre 2.3.2). Ces données, considérées comme non valides ou incohérentes, ne sont pas prises en compte dans l'interpolation et ne sont, par conséquent, pas codées. Elles sont désactivées par un paramètre présent dans la base de données (paramètre KEEP=0 ; cf. Annexe 1).

Afin d'améliorer les résultats de l'interpolation et de tenir compte du contexte hydrogéologique local, des points de contrainte ont été intégrés lors de l'interpolation finale (Illustration 44 et Illustration 45) :

- 92 points de représentation des cours d'eau en basses eaux et 124 points en hautes eaux (en tenant compte de la présence ou non d'un écoulement dans les cours d'eau pendant les campagnes piézométriques) ;
- 23 points de contraintes en basses eaux et 11 points de contraintes en hautes eaux, correspondant à une extrapolation des mesures piézométriques réalisées uniquement en hautes eaux ou en basses eaux ou ajout de points sur les plateaux pour contraindre la piézométrie à passer en-dessous de la topographie.

ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de restauration des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche (Moulins)

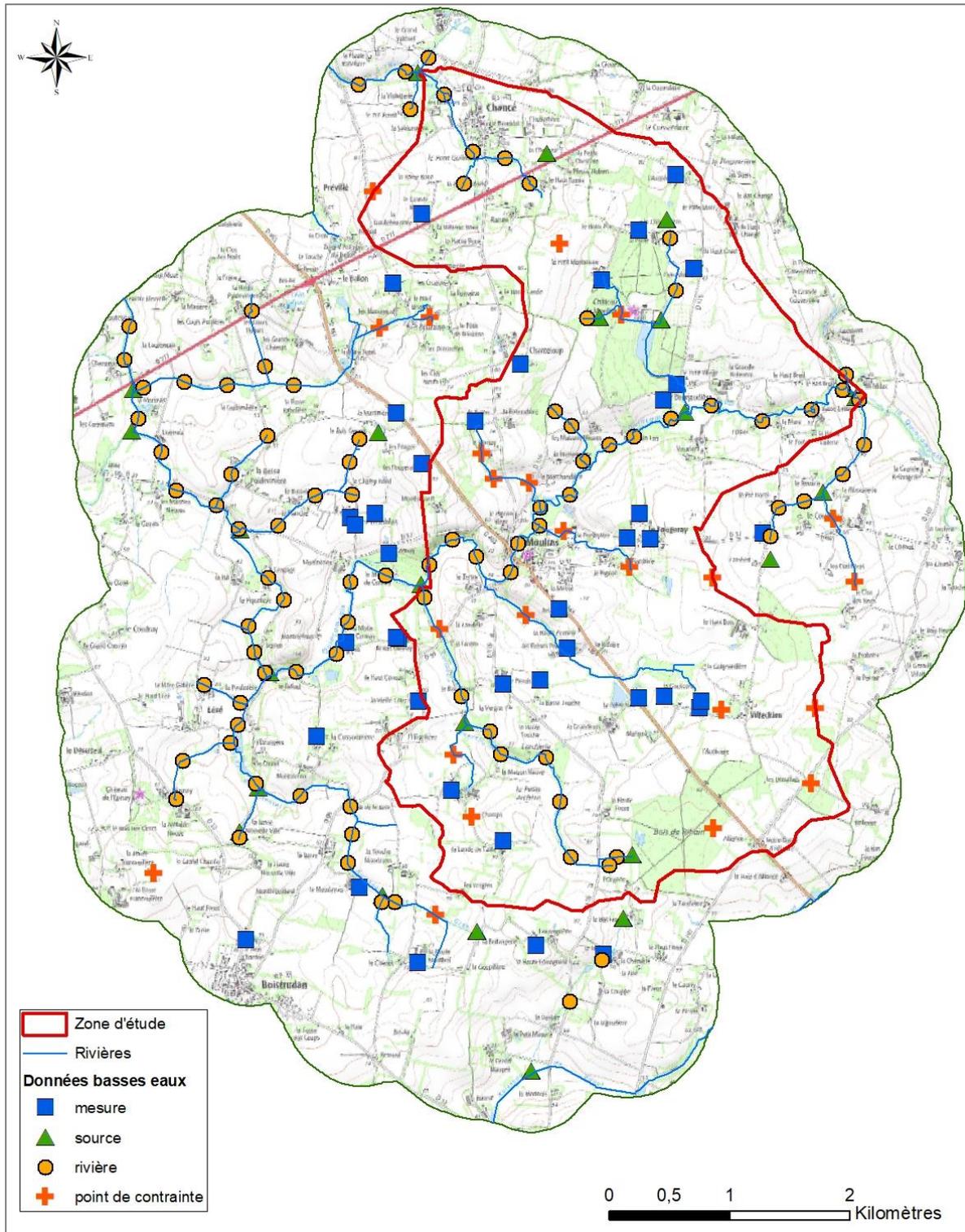


Illustration 44 : Localisation des données utilisées pour l'interpolation de la carte piézométrique de basses eaux

ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de restauration des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche (Moulines)

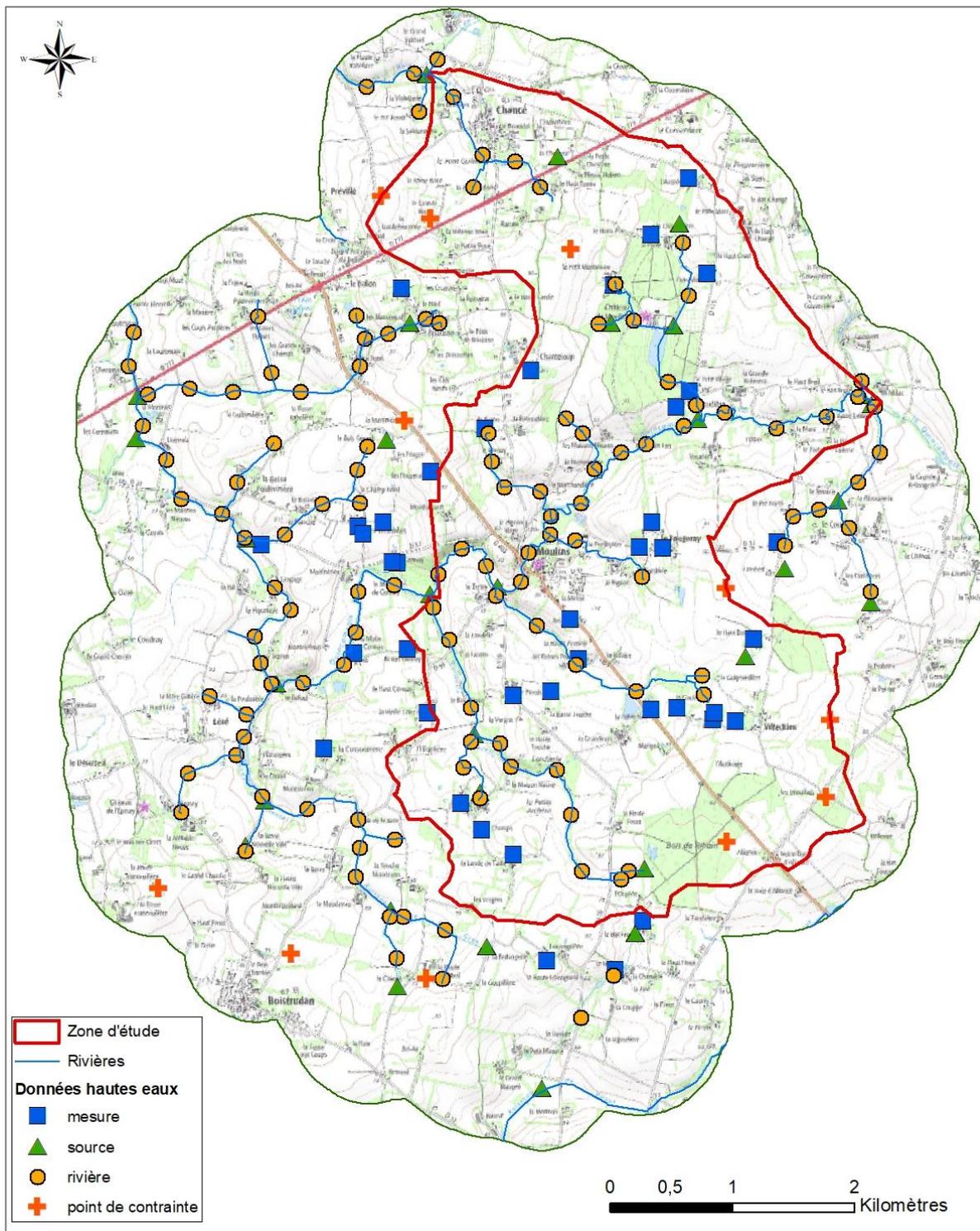


Illustration 45 : Localisation des données utilisées pour l'interpolation de la carte piézométrique de hautes eaux

d) Interpolation finale de la surface piézométrique

L'ensemble des points de passage (Zeau) et des points de contrainte a été interpolé par krigeage avec dérive externe, avec le modèle de variogramme des résidus.

Le résultat final se présente sous forme d'une grille des altitudes de la nappe au pas de 5 m (voir chapitres 2.3.5 et 2.3.6).

2.3.4. Clés de lecture des cartes piézométriques

Les cartes piézométriques sont une représentation cartographique, à un instant donné, de la surface des nappes libres ou de la pression hydrostatique des nappes captives. Elles peuvent être lues comme des cartes topographiques. Les courbes de niveau (ou isopièzes) correspondent aux altitudes du toit de la nappe au moment de la mesure piézométrique. Elles donnent donc des indications sur l'état hydraulique de la nappe, le sens des écoulements en son sein et leur vitesse (avec le gradient hydraulique entre deux points et la perméabilité de l'aquifère concerné). L'altitude de chaque courbe de niveau (ou isopièze) est indiquée en mètres et possède le même plan de référence qui est celui du réseau de Nivellement Général de la France (NGF).

e) Caractéristiques et limites d'utilisation des cartes piézométriques

Les isopièzes (courbes d'égale valeur de l'altitude du niveau piézométrique) ont été tracées à partir des données recueillies lors des campagnes de mesures de novembre 2020 et de mars 2021. Elles représentent respectivement les niveaux d'eau souterraine en basses eaux et en hautes eaux de la nappe de l'aquifère du socle au droit du secteur d'étude.

Les cartes piézométriques produites sont des documents de synthèse, établis dans le cadre de cette étude à une échelle de 1 / 25 000. Leur utilisation est essentiellement scientifique pour la connaissance des eaux souterraines : ces cartes permettent de visualiser les sens d'écoulement, les gradients hydrauliques, les niveaux de basses eaux en 2020 et hautes eaux en 2021 de la nappe contenue dans les formations de socle.

Les courbes piézométriques ont été établies lorsque les points d'observations étaient suffisamment nombreux pour permettre l'interpolation puis la représentation d'isopièzes. Certains secteurs ont cependant bénéficié d'un nombre réduit de mesures. Ainsi l'insuffisance de mesures sur les plateaux produit un lissage de la piézométrie lors de l'interpolation, qui peut générer une sous-estimation de l'altitude des crêtes piézométriques (hauts niveaux de la nappe).

f) Etat hydraulique de la nappe

Dans le socle, les nappes d'eau souterraine sont généralement libres, aucun écran imperméable ne recouvrant les formations. Par croisement entre la topographie et les surfaces piézométriques, les zones où la piézométrie est sub-affleurante ou peu profonde peuvent alors être identifiées. Au droit de ces secteurs, les eaux souterraines peuvent potentiellement alimenter les rivières et les zones humides et l'infiltration d'eau de pluie est minimale.

g) Sens d'écoulement des eaux souterraines

Les isopièzes sont des équipotentielles : la charge hydraulique (altitude) est la même le long d'une isopièze. L'axe de l'écoulement des eaux souterraines est toujours perpendiculaire aux isopièzes et le sens d'écoulement va dans le sens des potentiels décroissants, de la charge hydraulique la plus élevée vers la plus faible (Illustration 46). Ainsi, le trajet d'une goutte d'eau peut être déterminé en l'imaginant se déplacer le long d'un axe perpendiculaire à deux isopièzes immédiates, de l'isopièze la plus élevée en altitude vers la plus basse. Les limites des bassins

versants hydrogéologiques se définissent le long des crêtes piézométriques, tandis que les points les plus bas correspondent aux axes de drainage (Illustration 46).

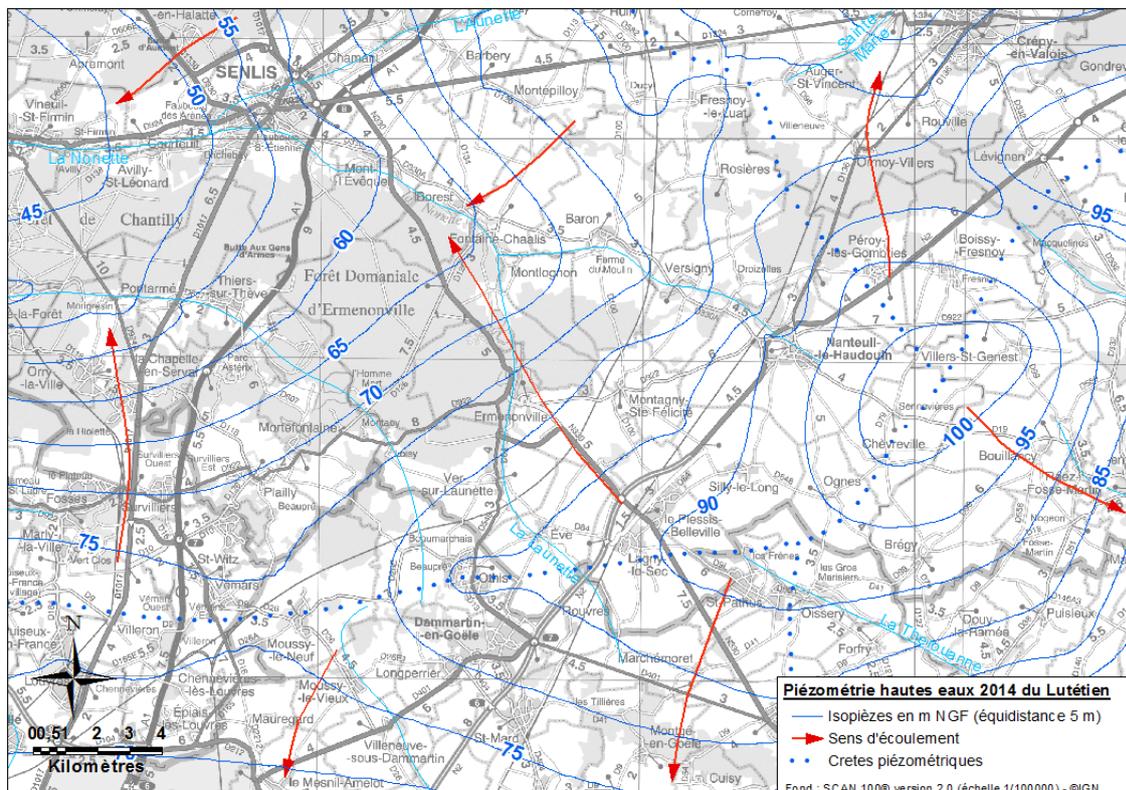


Illustration 46 : Exemple d'une carte piézométrique de la nappe du Lutétien en période de hautes eaux 2014 avec indication du sens d'écoulement général et des crêtes piézométriques (Bault et al., 2015)

h) Gradient hydraulique

Le gradient hydraulique entre deux points de la surface piézométrique est l'équivalent de la pente en topographie. Il est déterminé par calcul du rapport de la différence de potentiel entre deux points (différence de charge hydraulique) sur la distance séparant les deux points. Les vitesses d'écoulement des nappes sont liées à la perméabilité des aquifères et au gradient hydraulique.

Les nappes de socle sont fortement influencées par la topographie. Les gradients hydrauliques sont alors plus faibles au droit des plateaux et des vallées drainantes que sous les coteaux.

2.3.5. Carte piézométrique de basses eaux

La carte piézométrique de basses eaux se présente sous forme de grille représentant les altitudes de la nappe issues de l'interpolation. Les isopièzes ont été tracées à partir de cette grille (avec un intervalle de 5 m NGF entre chaque courbe). Elles représentent les niveaux d'eau de la nappe sur le secteur d'étude lors des basses eaux 2020 (Illustration 47).

2.3.6. Carte piézométrique de hautes eaux

La carte piézométrique de hautes eaux et les isopièzes associées (Illustration 48) représentent les niveaux d'eau sur le secteur d'étude lors des hautes eaux 2021. L'allure globale de la carte hautes eaux est la même que la carte basses eaux (sens d'écoulement) mais l'altitude de la nappe est plus élevée en hautes eaux qu'en basses eaux.

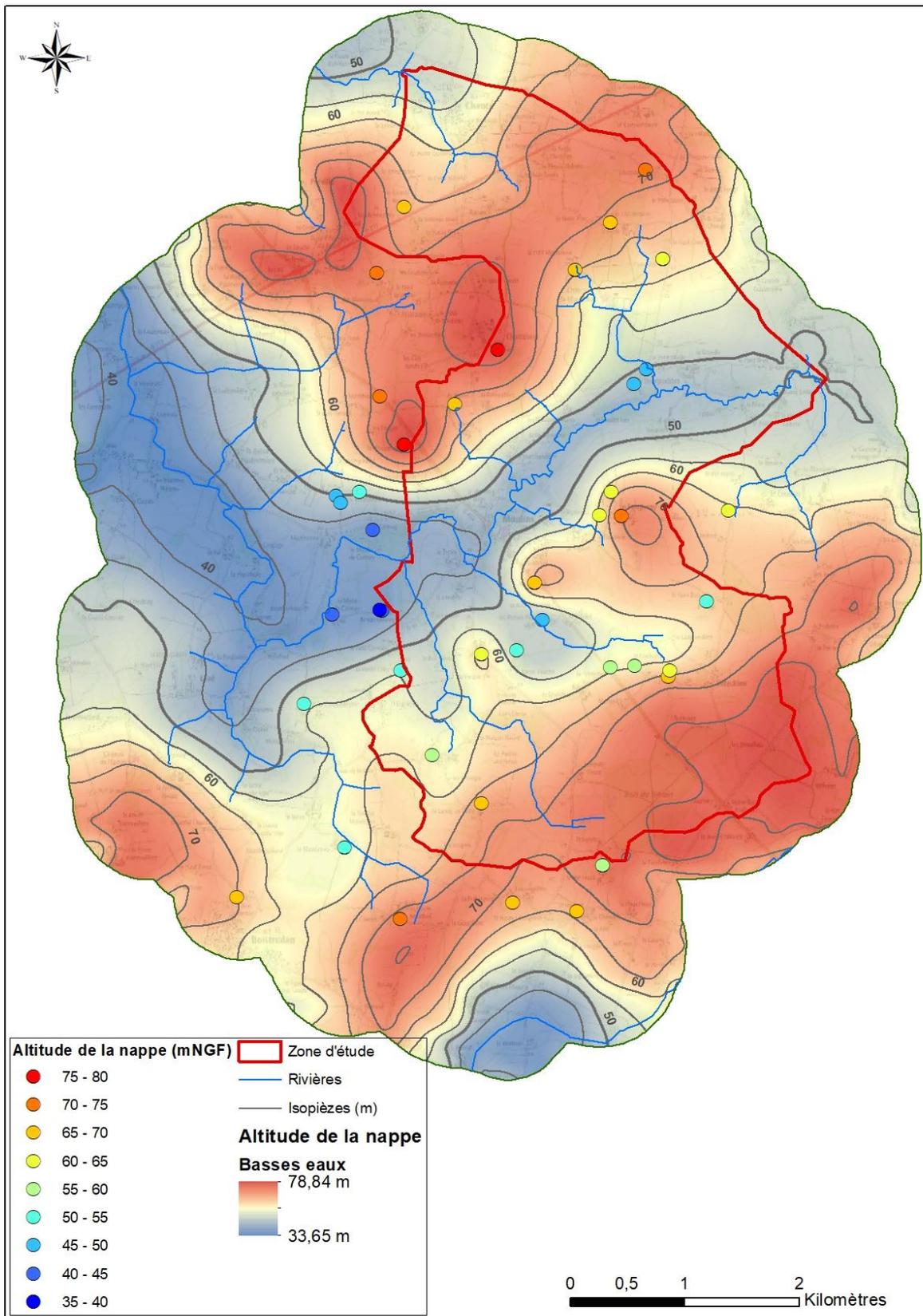


Illustration 47 : Carte piézométrique de basses eaux 2020

ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de restauration des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche (Moulins)

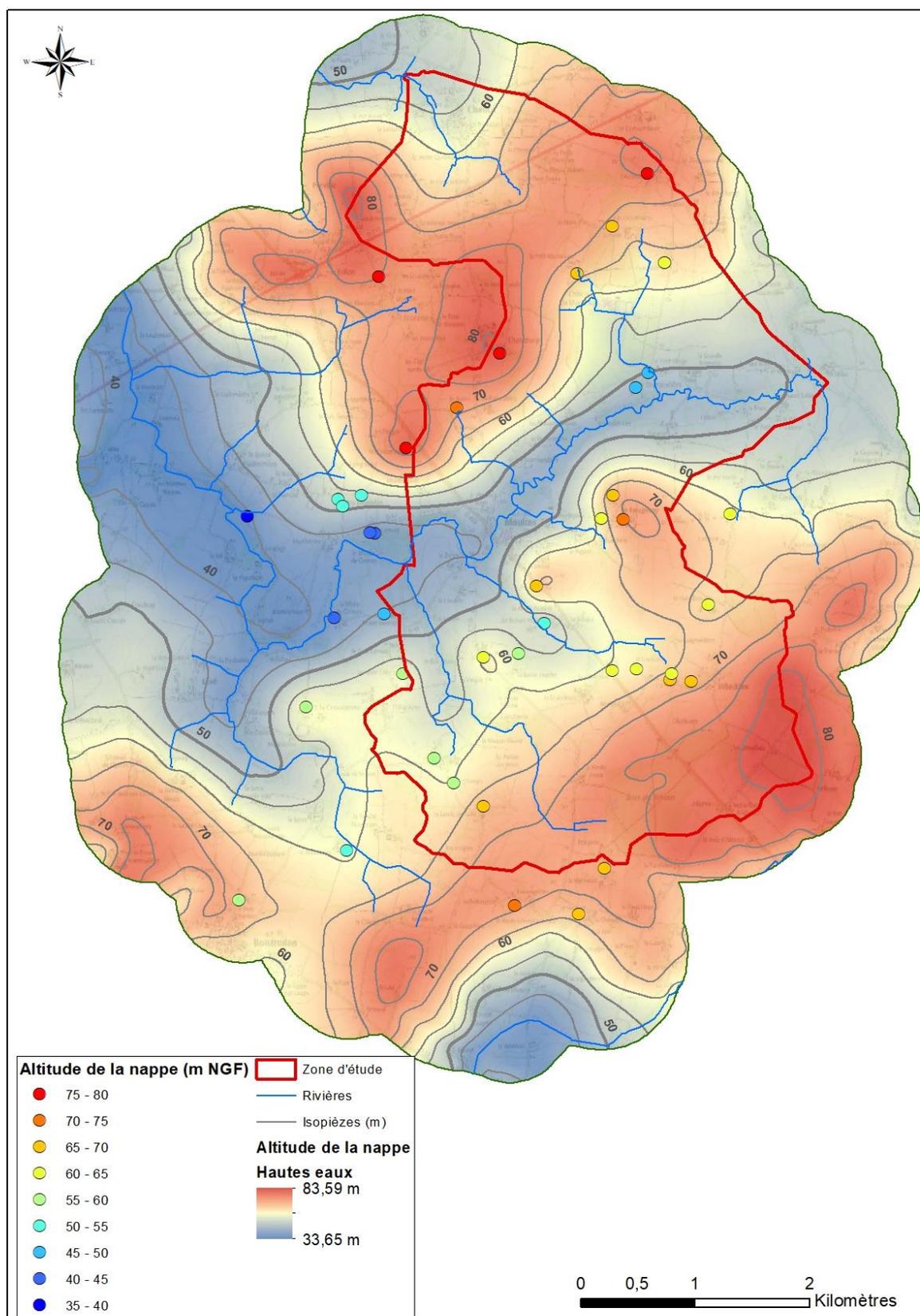


Illustration 48 : Carte piézométrique de hautes eaux 2021

2.3.7. Indice de confiance

L'écart-type de krigeage est calculé lors de l'interpolation sur chaque maille, pour les mesures piézométriques de chaque campagne (Illustration 49 et Illustration 50). Cet écart-type caractérise la précision du résultat, si du moins le comportement de la variable est spatialement homogène, ce qui est le cas ici. Il tient compte des points de contrainte : les zones bleues représentent les secteurs où l'interpolation est jugée fiable du fait de la bonne densité de points pris en compte. Plus la couleur tend vers le rouge, moins l'interpolation est fiable.

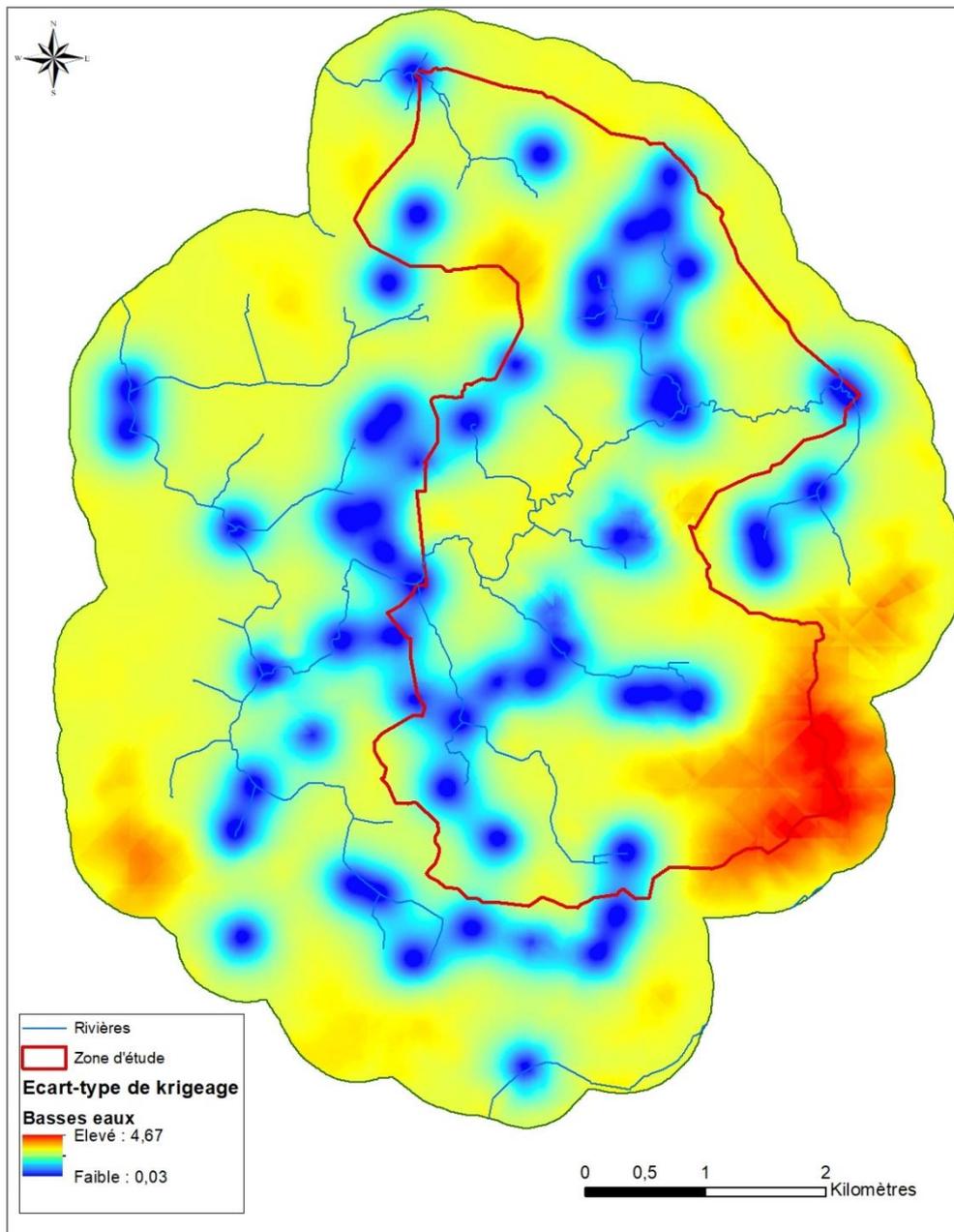


Illustration 49 : Carte des écarts-types de krigeage pour la carte piézométrique de basses eaux

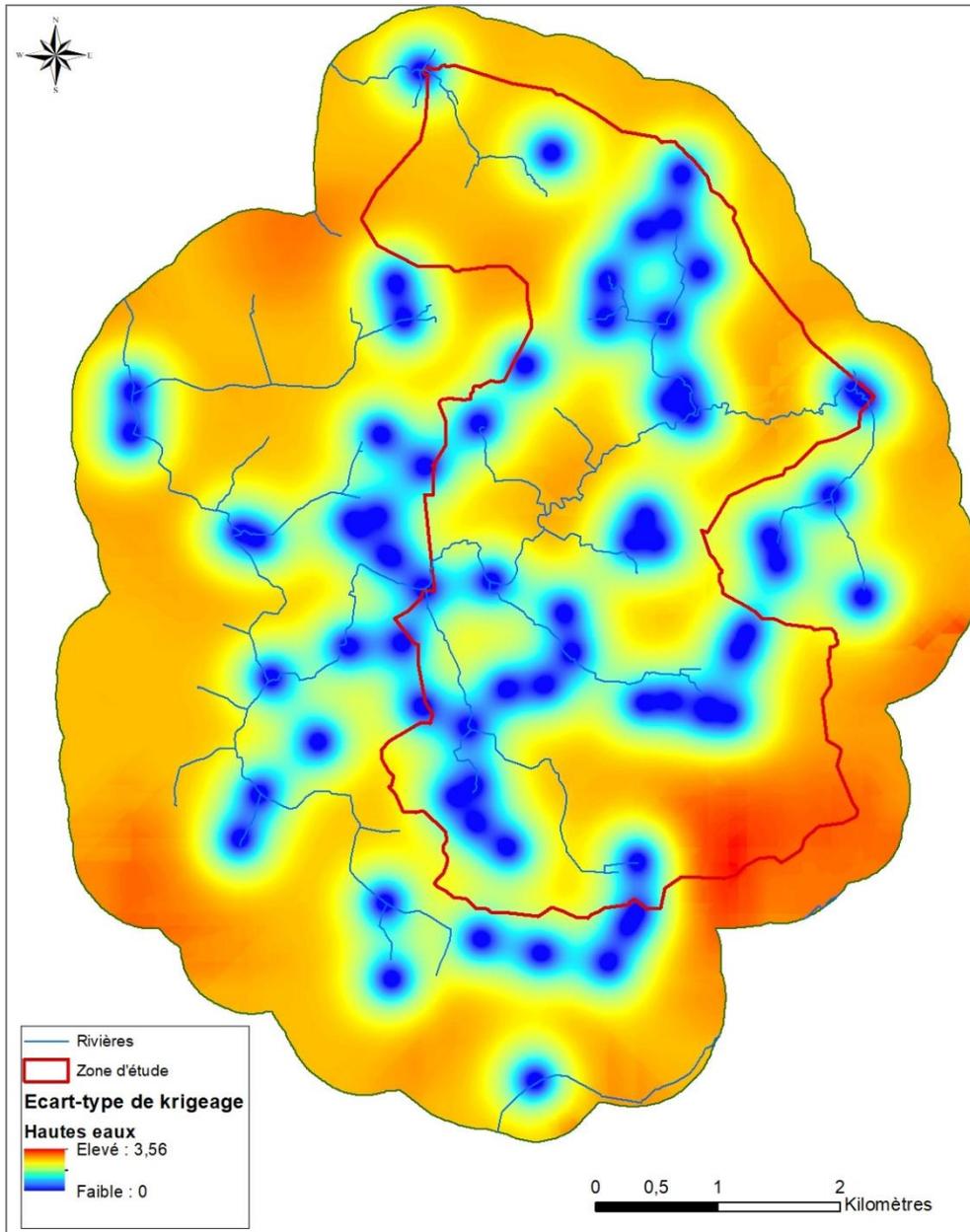


Illustration 50 : Carte des écarts-types de krigeage pour la carte piézométrique de hautes eaux

La carte d'indice de confiance représente les cartes de l'écart-type de krigeage normé par le palier du modèle géostatistique. Pour chaque maille de la grille, l'écart-type de krigeage est divisé par l'écart-type du palier du variogramme. Le calcul de cette erreur relative permet de normaliser la notion d'indice de confiance et de faciliter ainsi les comparaisons entre 2 années.

Les zones bleues indiquent les secteurs où l'interpolation est jugée fiable du fait de la bonne densité de points pris en compte (Illustration 51 et Illustration 52). Ensuite, plus la couleur tend vers le rouge, moins l'interpolation est fiable. Les indices de confiance sont décrits de la façon suivante :

- 0 à 0,25 : très bon (bonne à très bonne confiance)
- 0,25 à 0,5 : bon (confiance assez bonne)
- 0,5 à 0,75 : moyen (confiance moyenne)
- 0,75 à 1 : mauvais (confiance faible)

- 1 à 1,25 ou plus : très mauvais (confiance très faible)

Il apparaît ainsi que le plateau situé au sud-est du secteur d'étude, le nord de Moulins et la partie nord du secteur d'étude correspondent à des zones où l'interpolation est jugée peu fiable (couleurs orange et rouge – Illustration 51 et Illustration 52), en raison du manque de points de mesure. Elle est moyennement fiable sur une partie du secteur d'étude (couleur jaune). A proximité des points de mesures, on observe une prédominance des couleurs bleue et verte indiquant une bonne fiabilité.

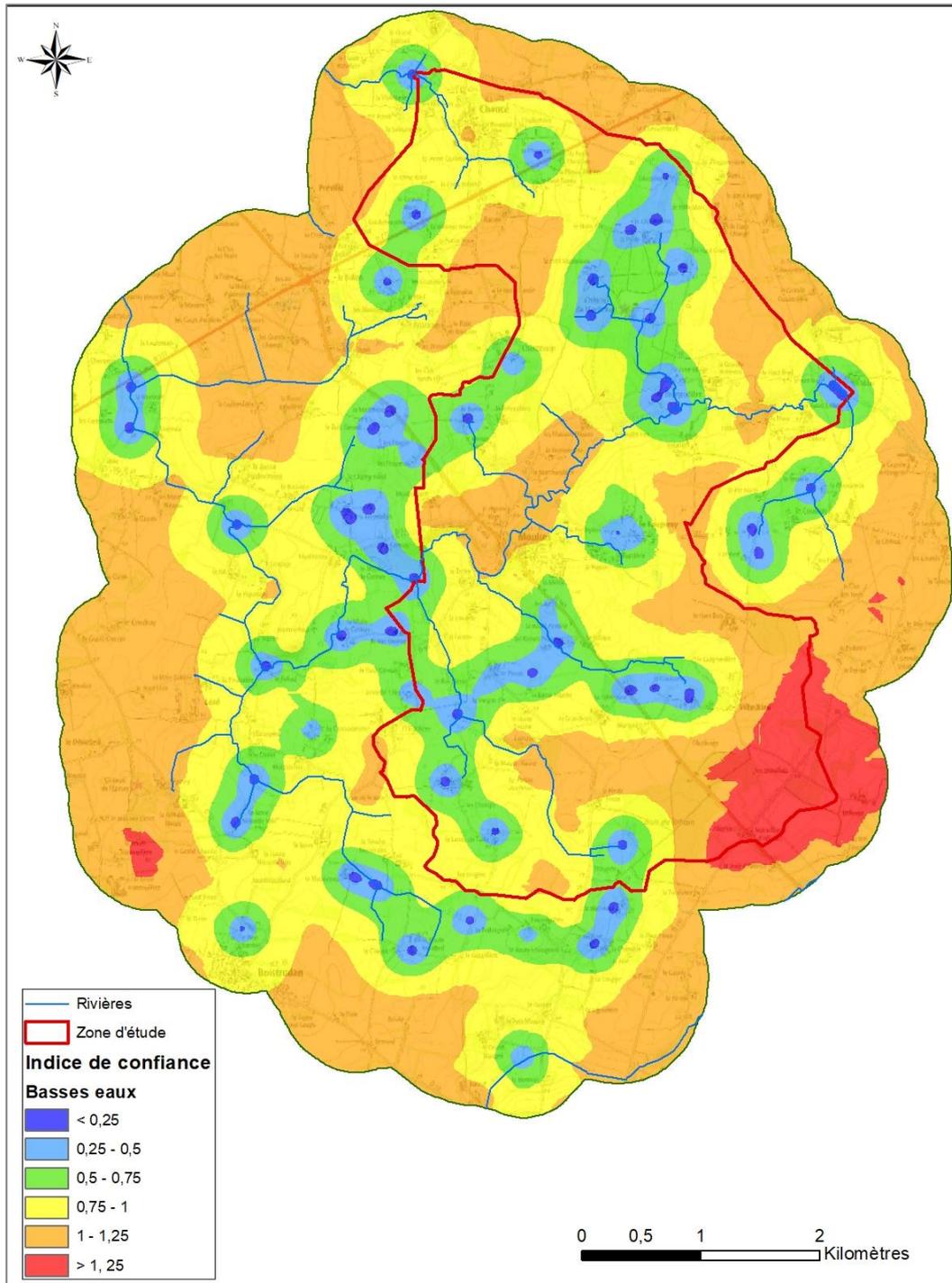


Illustration 51 : Carte des indices de confiance pour la carte piézométrique de basses eaux

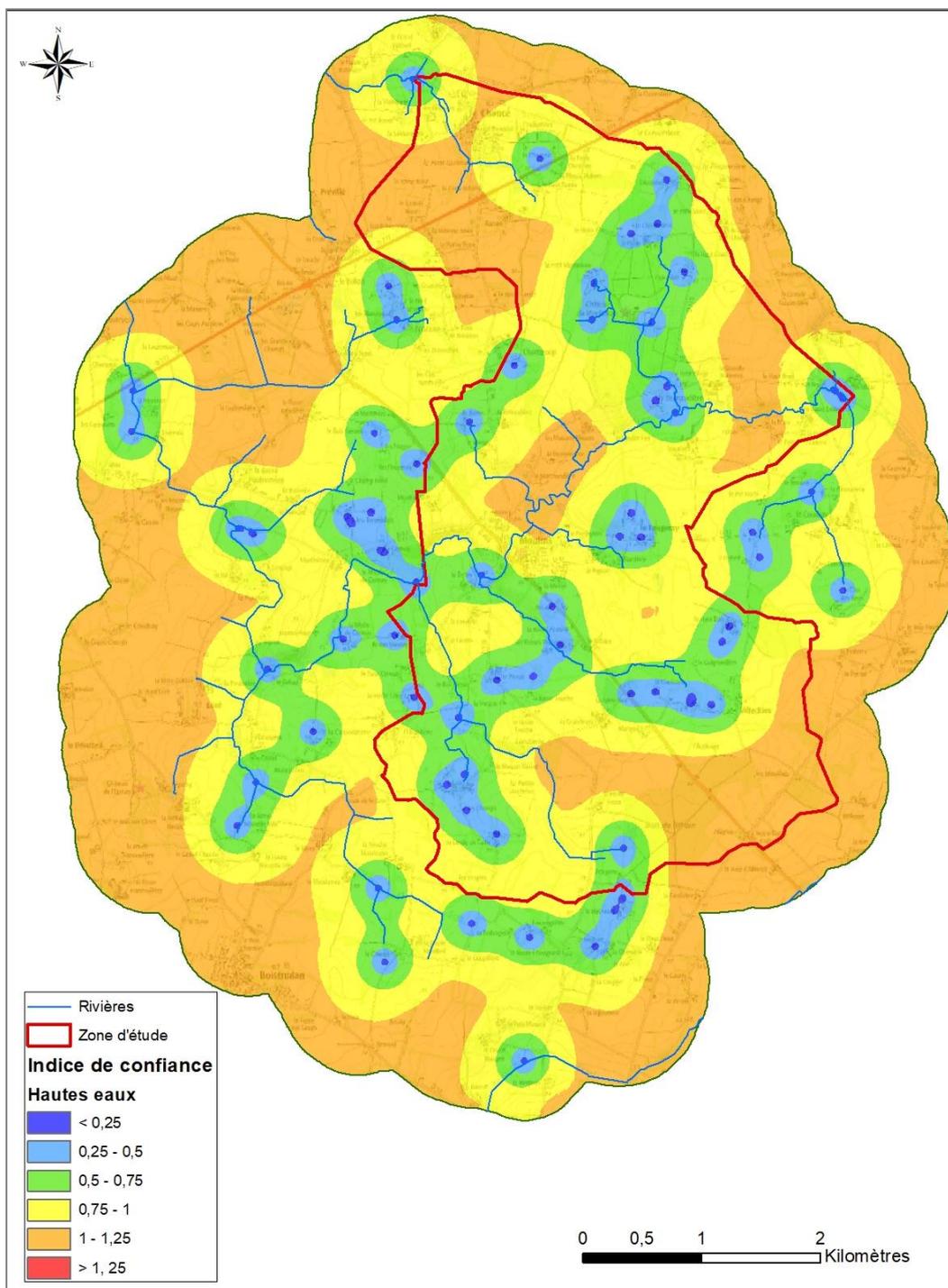


Illustration 52 : Carte des indices de confiance pour la carte piézométrique de hautes eaux

2.3.8. Sens d'écoulement et axes de drainage

L'analyse de la piézométrie du secteur d'étude montre que les lignes de courant partent généralement des plateaux et convergent vers les vallées. Ce constat prouve le rôle prédominant joué par la topographie et les vallées structurantes, notamment celle de la Quincampoix. Les bassins versants hydrogéologiques se superposent alors globalement aux bassins versants topographiques.

Les failles principales décrites dans la carte géologique à 1/50 000 (cf. Illustration 4), non prises en compte dans l'interpolation, pourraient avoir une influence (drainance, barrière hydraulique) sur l'écoulement des eaux souterraines. Pour les prendre en compte, une densité de mesure piézométrique plus élevée aurait été nécessaire de part et d'autre de ces failles.

2.3.9. Zone non saturée

La zone non saturée représente la zone du sous-sol non complètement saturée en eau (coexistence de l'eau et de l'air dans les interstices de la roche) au-dessus de la surface d'une nappe libre et où les écoulements se font de manière verticale.

L'épaisseur de la zone non saturée peut être calculée en soustrayant aux altitudes du sol, déduites du MNT au pas de 5 m, les valeurs des altitudes de la nappe, fournies par l'interpolation, en basses eaux et en hautes eaux. Le résultat est une grille au pas de 50 m, qui représente pour chaque pixel l'épaisseur de la zone non saturée exprimée en mètres (Illustration 53 et Illustration 54).

Les résultats du calcul de la zone non saturée montrent logiquement une proximité de la surface des sols des eaux souterraines dans les fonds de vallées (épaisseurs inférieures à 1 m) et une épaisseur de la zone non saturée plus importante au droit des plateaux. Par ailleurs, cette zone non saturée est logiquement plus épaisse en basses eaux (altitude plus basse de la nappe).

La zone non saturée a une épaisseur moyenne de 4,6 m en hautes eaux et 5,5 m en basses eaux et une épaisseur maximale de 26 m en hautes eaux et en basses eaux.

ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de restauration des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche (Moulins)

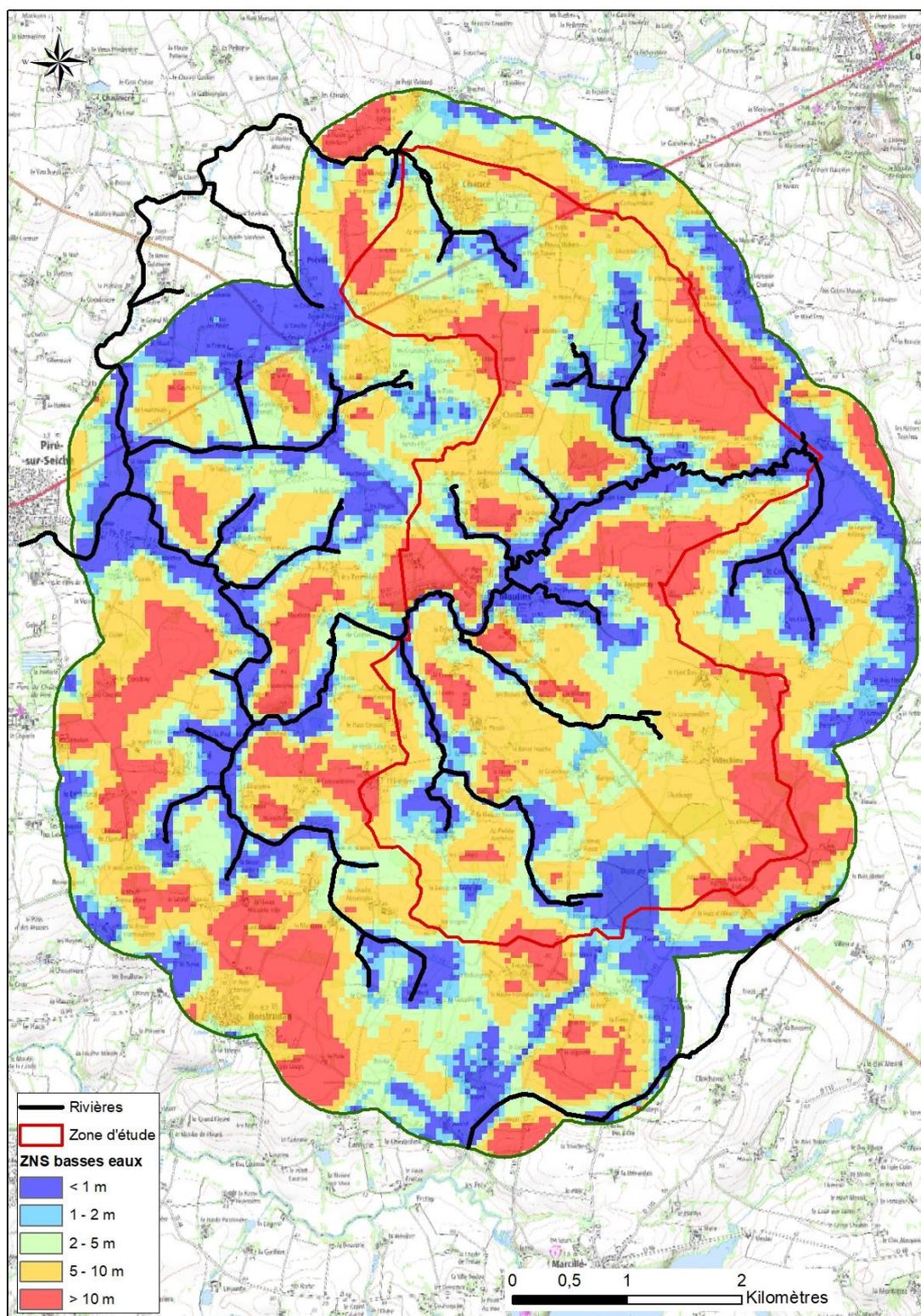


Illustration 53 : Epaisseur de la zone non saturée en basses eaux

ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de restauration des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche (Moulins)

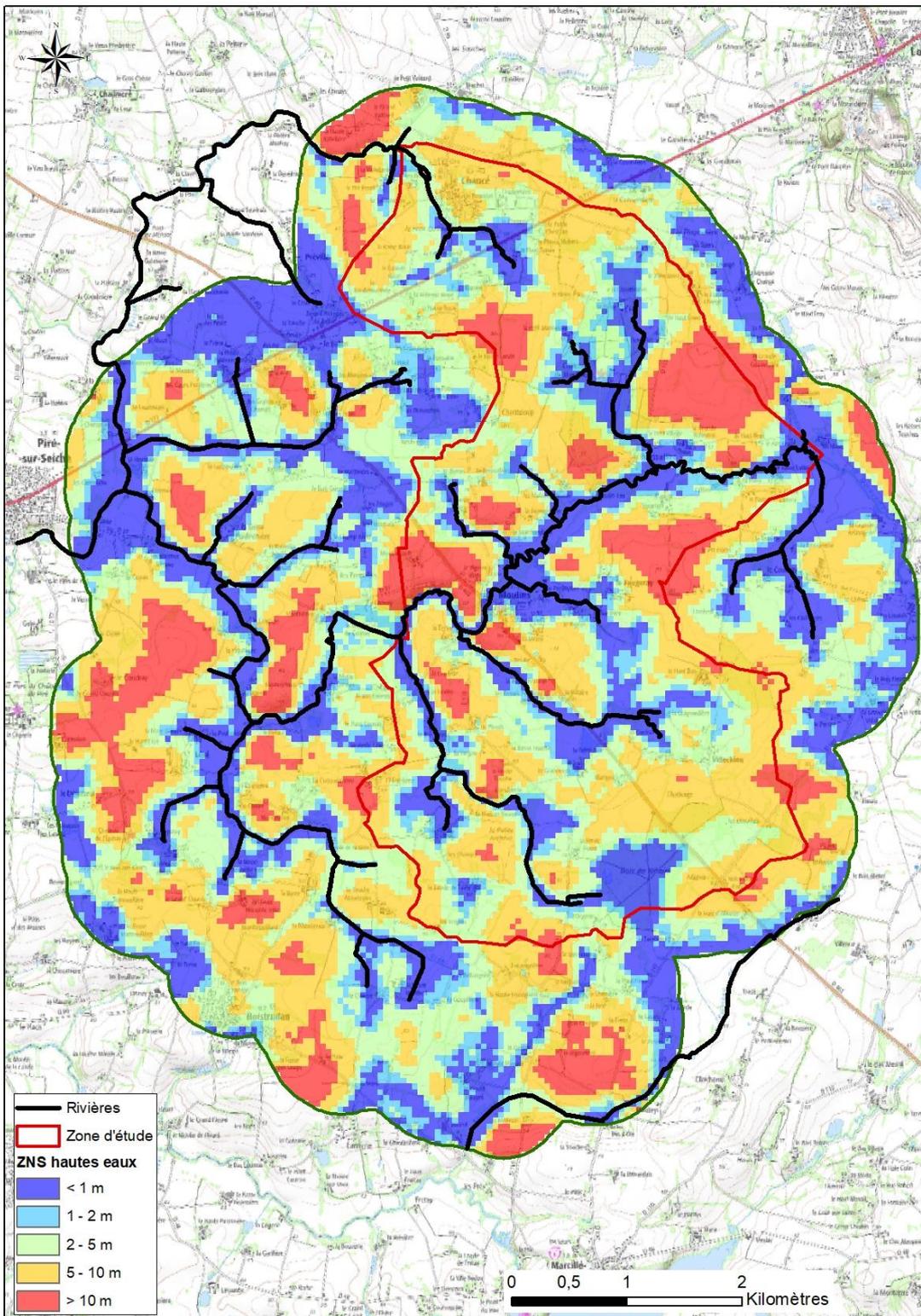


Illustration 54 : Epaisseur de la zone non saturée en hautes eaux

2.4. QUALITE DE L'EAU

Des analyses physico-chimiques ont été réalisées sur le terrain par l'EPTB Vilaine (mesures *in situ* et spectrophotométrie sur site) lors des différentes campagnes de terrain (moyennes eaux en juillet 2020, basses eaux en novembre 2020, hautes eaux en mars-avril 2021). Les paramètres suivants ont été analysés :

Paramètres	Campagne		
	juil-20	nov-20	mars-21
T° (°C)	x	x	x
pH	x	x	x
Conductivité (µS/cm)	x	x	x
Nitrates (mg/L)	x	x	x
Sulfates (mg/L)	x	x	x
Fer (mg/L)	x	x	x
Phosphates (mg/L)	x		
Chlorures (mg/L)	x		

Illustration 55 : Paramètres analysés sur site à chaque campagne de terrain

Les prélèvements pour analyses sur site ont été réalisés sur des cours d'eau et des points d'eau souterraine (puits ou forages - Illustration 56 et Illustration 57). Quelques prélèvements ont été réalisés lors de la campagne de terrain préparatoire de juillet 2020. Certains cours d'eau étant à sec en novembre 2020, peu d'analyses ont pu être réalisées sur les eaux de surface. Davantage de points ont été prélevés lors de la campagne hautes eaux de mars 2021.

Nombre de points analysés	Campagne		
	juil-20	nov-20	mars-21
Eau de surface	4	11	24
Eau souterraine	8	17	19

Illustration 56 : Nombre de points de prélèvements

Pour les ouvrages équipés d'une pompe, le prélèvement a été réalisé après une phase de purge et la stabilisation des paramètres hydrodynamiques. Pour les puits non équipés, le prélèvement a été réalisé avec une canne de prélèvement, sans renouvellement possible de la colonne d'eau.

Les résultats détaillés pour les eaux de surface et les eaux souterraines sont présentés en Annexe 3.

ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de restauration des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche (Moulines)

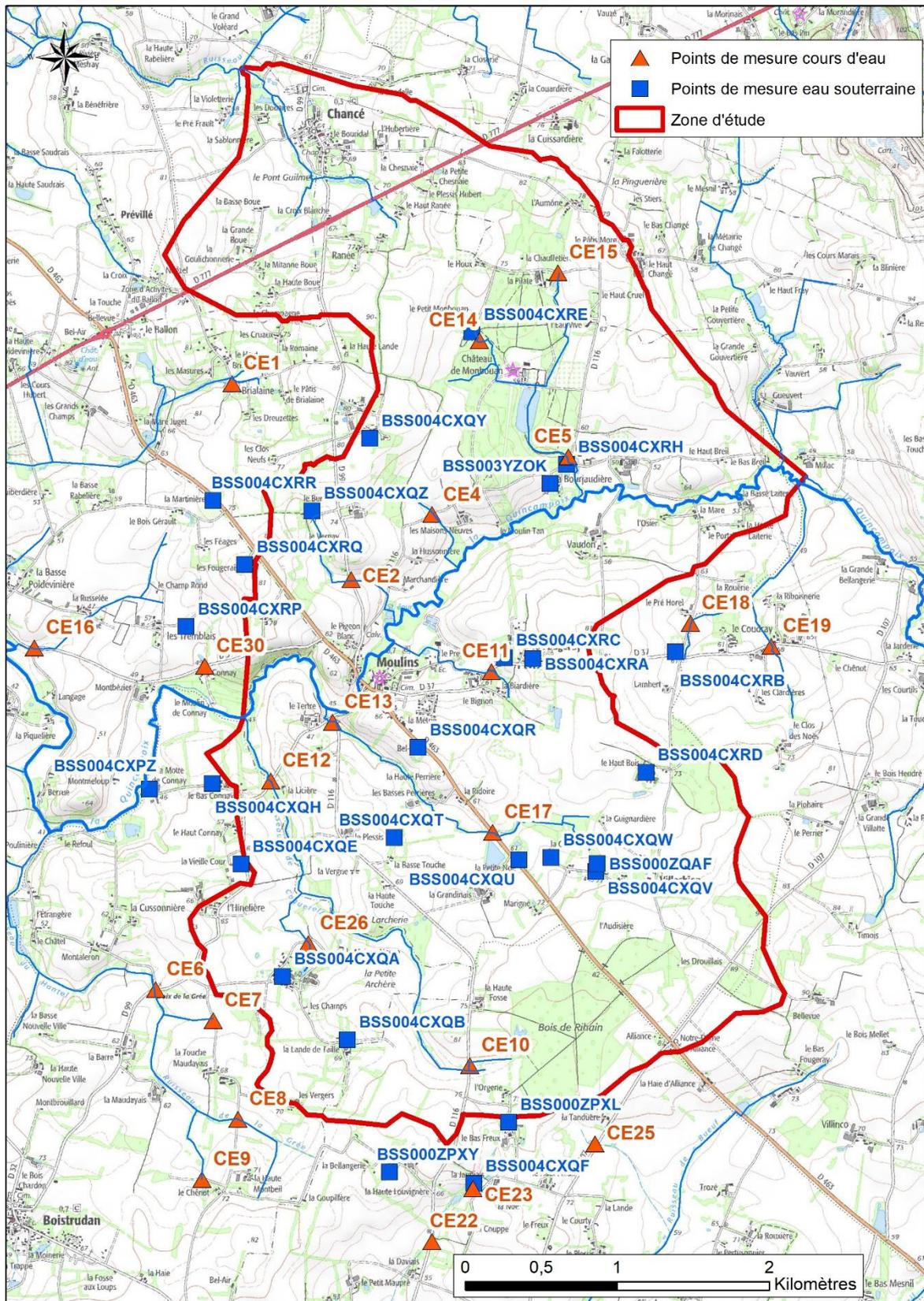


Illustration 57 : Points eau de surface et eau souterraine sur lesquels des analyses d'eau ont été réalisées lors des différentes campagnes

2.4.1. Température

Les points de mesure en eau souterraine présentent des températures comprises entre 13,9 et 19,9°C pour la campagne du mois de juillet 2020, entre 12,5 et 17,6°C en novembre 2020 et entre 11 et 18°C en mars 2021 (Illustration 58 et Illustration 59). Les températures moyennes mesurées étaient maximales en juillet 2020 (16,3°C). Les températures mesurées sur l'ensemble des points sont caractéristiques des eaux souterraines peu profondes. Plus les eaux souterraines circulent en profondeur, moins l'influence de l'atmosphère se fait sentir. De manière générale, la température des eaux souterraines profondes est donc relativement stable dans le temps par rapport aux eaux de surface.

Pour les eaux de surface, la variabilité des températures est à peine plus grande que pour les eaux souterraines. Les valeurs s'échelonnent entre 13,7 et 22,1°C pour la campagne du mois de juillet 2020, entre 9,1 et 12,4 °C en novembre 2020 et entre 9,4 et 17°C en mars 2021.

ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de restauration des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche (Moulins)

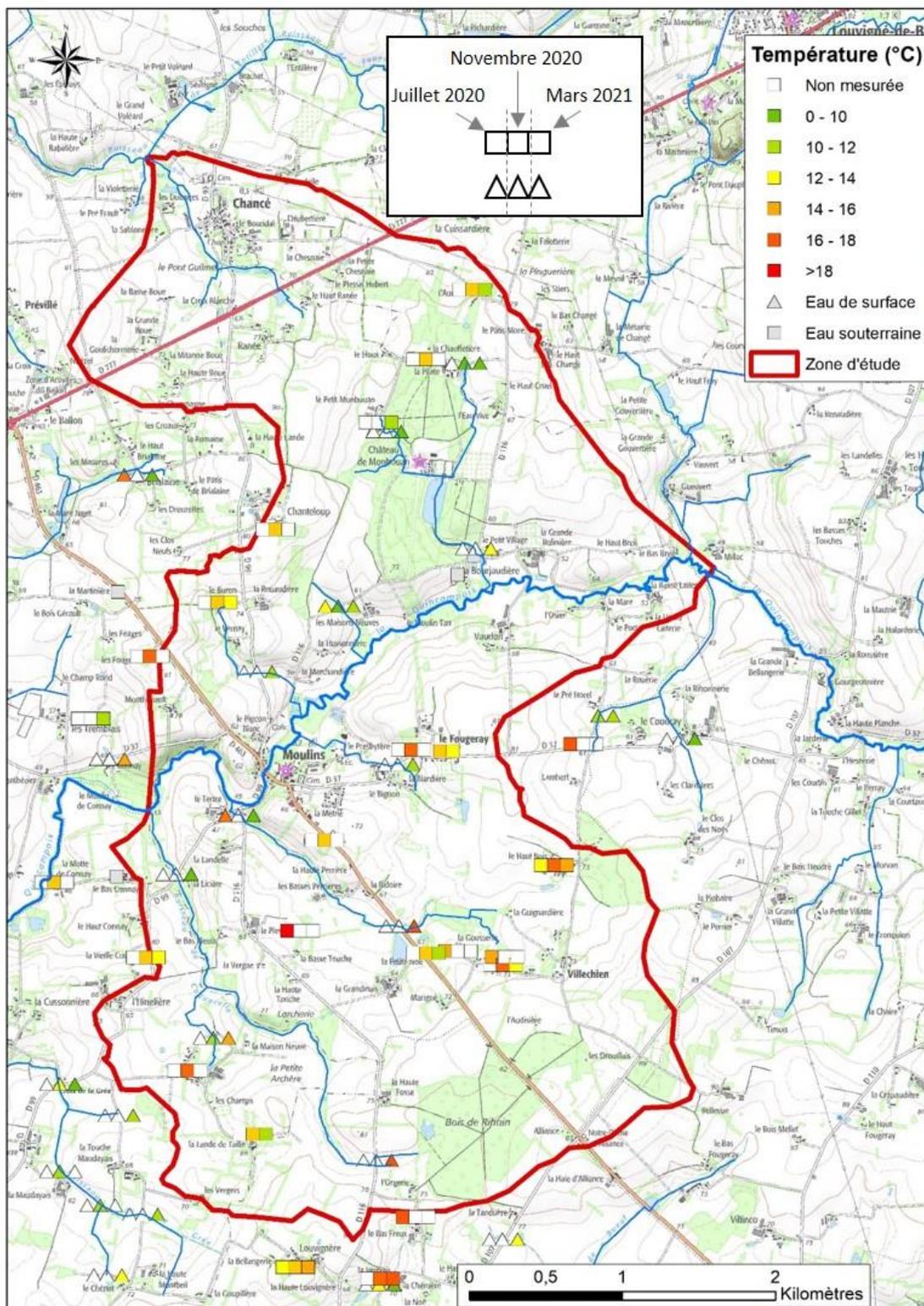


Illustration 59 : Evolution des températures mesurées dans les eaux de surface (triangles) et les eaux souterraines (carrés) lors des 3 campagnes de mesures

2.4.2. pH

Le pH des eaux souterraines s'échelonne entre 5,7 et 8,1 (moyenne 6,7). D'une manière générale, le pH est assez stable sur chaque point et présente de faibles variations entre les différentes campagnes. Les valeurs de pH observées sont classiques d'eaux souterraines issues d'aquifères de socle, plaçant celles-ci dans le domaine des eaux légèrement acides pour les plus faibles pH à neutres.

Le pH des eaux de surface est légèrement plus élevé que dans les eaux souterraines : il varie entre 6,4 et 10,0 (moyenne 7,3) et montre peu de variation sur chaque point entre les campagnes.

2.4.3. Conductivité

La conductivité électrique de l'eau représente sa capacité à conduire le courant électrique. Elle est directement proportionnelle à la quantité d'ions dissous dans l'eau et traduit donc la minéralisation de l'eau. Plus la conductivité est élevée et plus la minéralisation des eaux est importante. Ce paramètre est dépendant du temps de transit de l'eau dans le sous-sol et des roches en contact avec l'eau. Pour les eaux ayant circulé au contact de formations de socle, les conductivités dépassent rarement 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Les valeurs de conductivité des eaux souterraines étudiées révèlent des faciès d'eaux peu minéralisées (valeurs globalement comprises entre 189 et 791 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une moyenne de 430 $\mu\text{S}/\text{cm}$), avec des valeurs relativement stables dans le temps, sauf sur un puits (1029 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en novembre 2020 et 614 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en mars 2021 : il est possible qu'il s'agisse d'une erreur de mesure en novembre 2020 - Illustration 61).

Les valeurs de conductivité des eaux de surface sont globalement plus faibles que dans les eaux souterraines et s'échelonnent entre 201 et 545 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (moyenne à 313 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Elles sont aussi relativement stables au cours du temps.

ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de restauration des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche (Moulins)

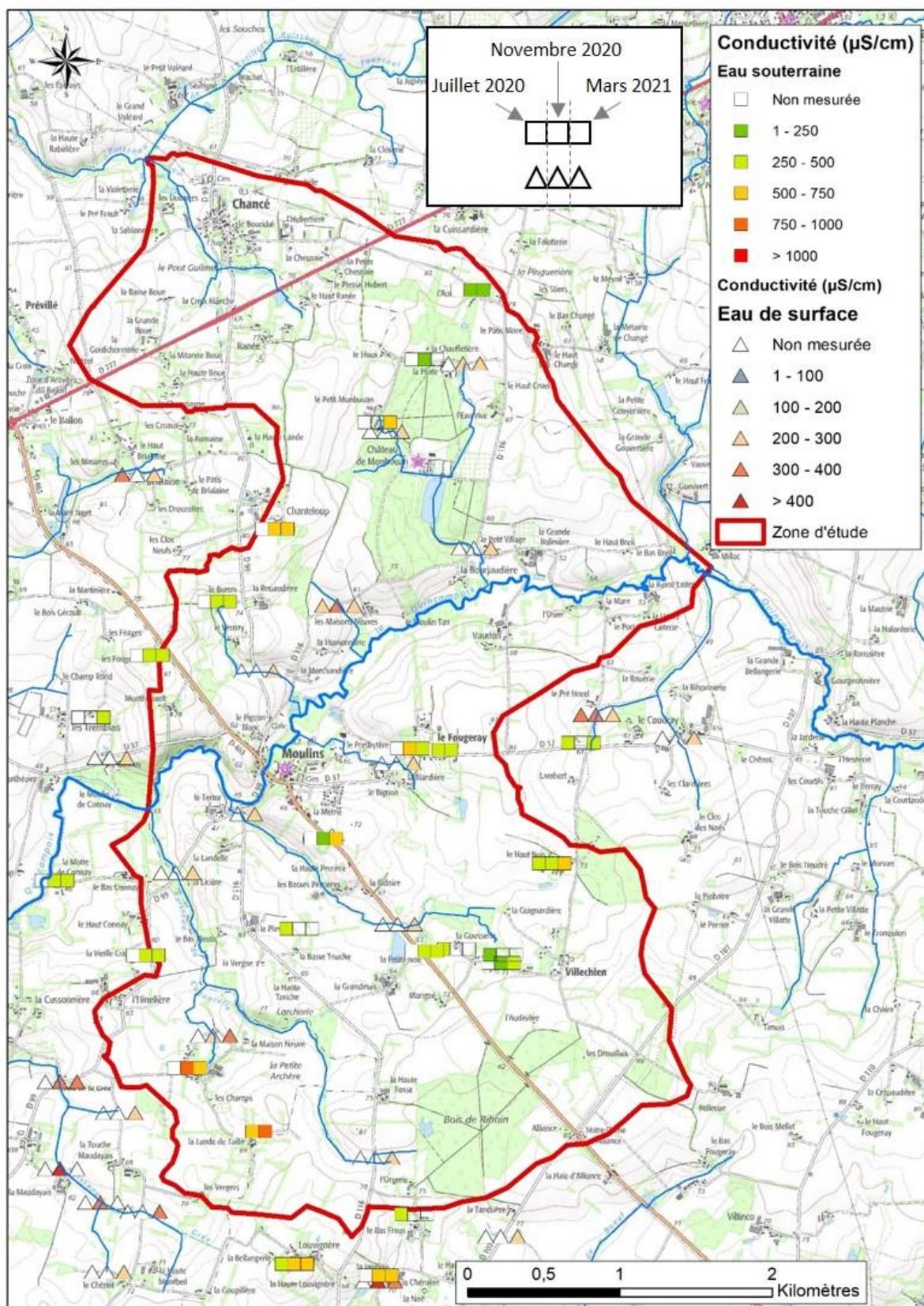


Illustration 61 : Evolution de la conductivité mesurée dans les eaux de surface (triangles) et les eaux souterraines (carrés) lors des 3 campagnes de mesures

2.4.4. Nitrates

L'ion nitrate (NO_3^-) est la forme la plus oxydée de l'azote. Les sources naturelles de nitrates proviennent principalement des pluies en interaction avec le sol, les cultures et la végétation. Les teneurs en nitrates dans les eaux naturelles dépendent de nombreux processus biogéochimiques qui constituent le cycle de l'azote. A l'état naturel, les concentrations en nitrates sont faibles (quelques mg/L au maximum). On admet généralement qu'une teneur supérieure à 10 mg/L traduit un apport anthropique.

La directive cadre eaux souterraines 2006/118/CE et l'arrêté du 17 décembre 2008 fixent une norme de qualité à l'échelle européenne pour les nitrates de 50 mg/L. Cette teneur de 50 mg/L constitue également la référence de qualité pour les eaux destinées à la consommation humaine dans l'arrêté du 30 décembre 2022 modifiant l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine.

Les concentrations en nitrates mesurées sur les eaux de surface et les eaux souterraines par spectrophotométrie varient entre 4 et 60 mg/L. Des concentrations supérieures à 50 mg/L sont observées sur 10 des 24 points de mesure dans les eaux souterraines.

Les concentrations en nitrates sont très variables dans l'espace mais aussi dans le temps (Illustration 63, Illustration 64 et Illustration 65). En effet, dans les eaux souterraines, on note des concentrations plus faibles en novembre 2020 (moyenne 26 mg/L) qu'en juillet 2020 (moyenne 30 mg/L) et surtout mars 2021 (moyenne 44 mg/L). Il en est de même pour les eaux de surface, qui affichent des concentrations en nitrates plus faibles en novembre 2020 (moyenne 28 mg/L) qu'en mars 2021 (37 mg/L).

Les variations rapides des concentrations en nitrates dans les eaux souterraines indiquent des phénomènes d'apport d'eau de qualités différentes (mélanges) ou bien des temps de transferts très courts (il s'agit en effet d'ouvrages peu profonds) : les eaux souterraines sont vulnérables aux activités de surface au droit des points montrant une forte variabilité.

Il est également intéressant de regarder l'évolution des concentrations en nitrates dans les eaux souterraines en fonction de la profondeur de l'ouvrage prélevé (Illustration 62). En effet, les aquifères de sub-surface (altérites) sont supposés être plus chargés en nitrates que les aquifères profonds (horizon fissuré), car ils sont en contact direct avec les apports anthropiques. D'autre part, un phénomène de dénitrification peut avoir lieu en profondeur (voir paragraphe sur le fer ci-après), ce qui entraîne une diminution des concentrations en nitrates avec la profondeur. En l'absence de phénomène de dénitrification, on peut trouver des concentrations en nitrates élevées à toute profondeur. On constate logiquement que les ouvrages les moins profonds (puits inférieurs à 20 m de profondeur) présentent les concentrations en nitrates les plus élevées (supérieures à 25 mg/L). On observe cependant 2 forages de 50 m de profondeur présentant des concentrations en nitrates supérieures à 40 mg/L.

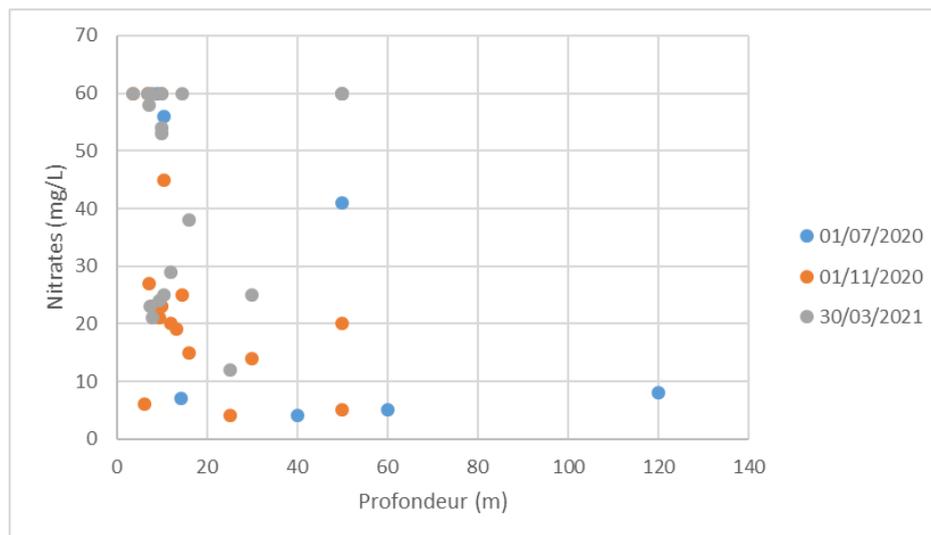


Illustration 62 : Evolution des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines en fonction de la profondeur des ouvrages

On constate que les ouvrages peu profonds (puits de moins de 15 m de profondeur) présentent systématiquement des teneurs en nitrates supérieures à 20 mg/L et souvent des teneurs supérieures à 50 mg/L, ce qui semble indiquer une vulnérabilité importante des eaux souterraines de sub-surface. Le seul forage profond analysé (120 m de profondeur) présente des teneurs en nitrates faibles (4 à 12 mg/L). Cependant, deux forages profonds (50 m) présentent des teneurs en nitrates élevées (60 mg/L) en mars 2021, plus faibles en novembre (5 et 20 mg/L) : on retrouve donc également des teneurs en nitrates élevées en profondeur.

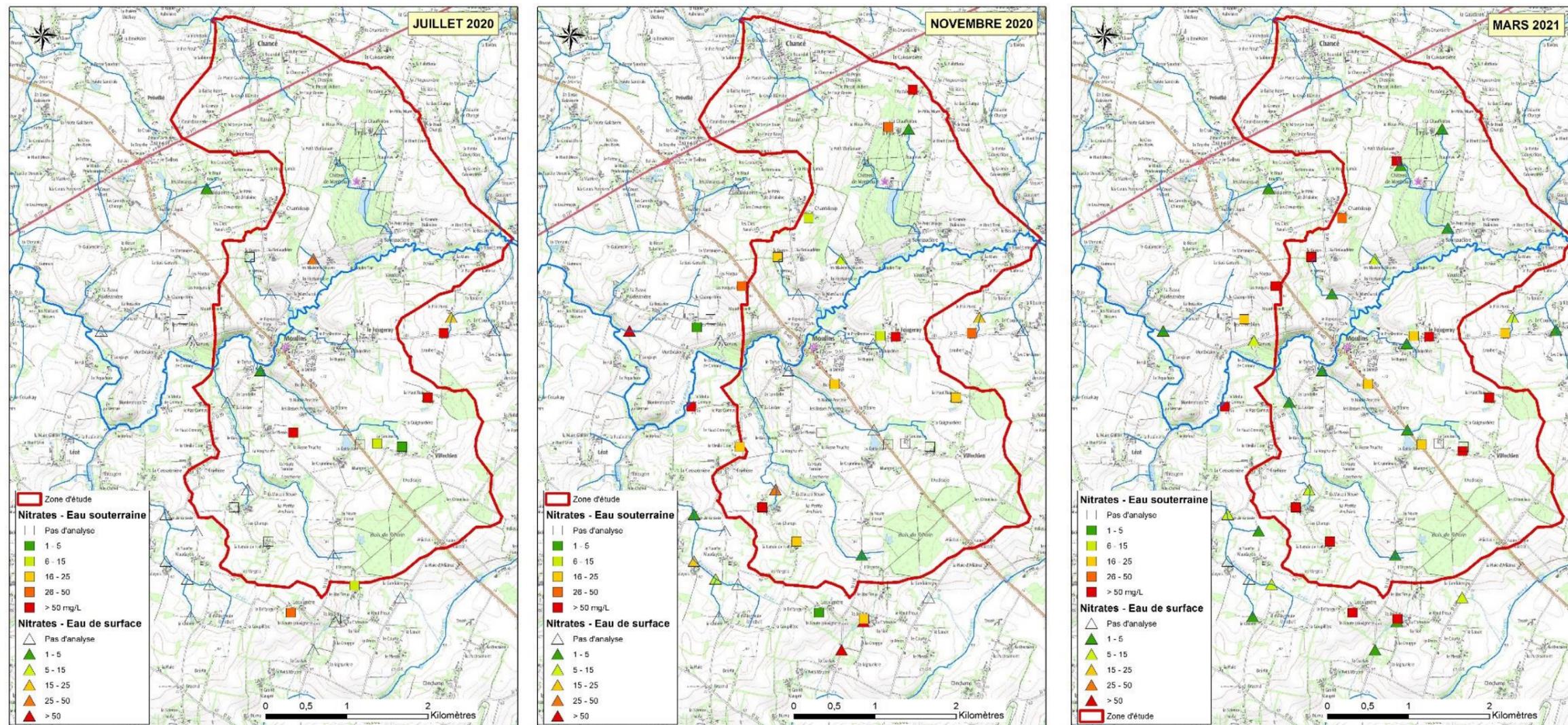


Illustration 63 : Evolution des teneurs en nitrates mesurées dans les eaux de surface (triangles) et les eaux souterraines (carrés) lors des 3 campagnes de mesures

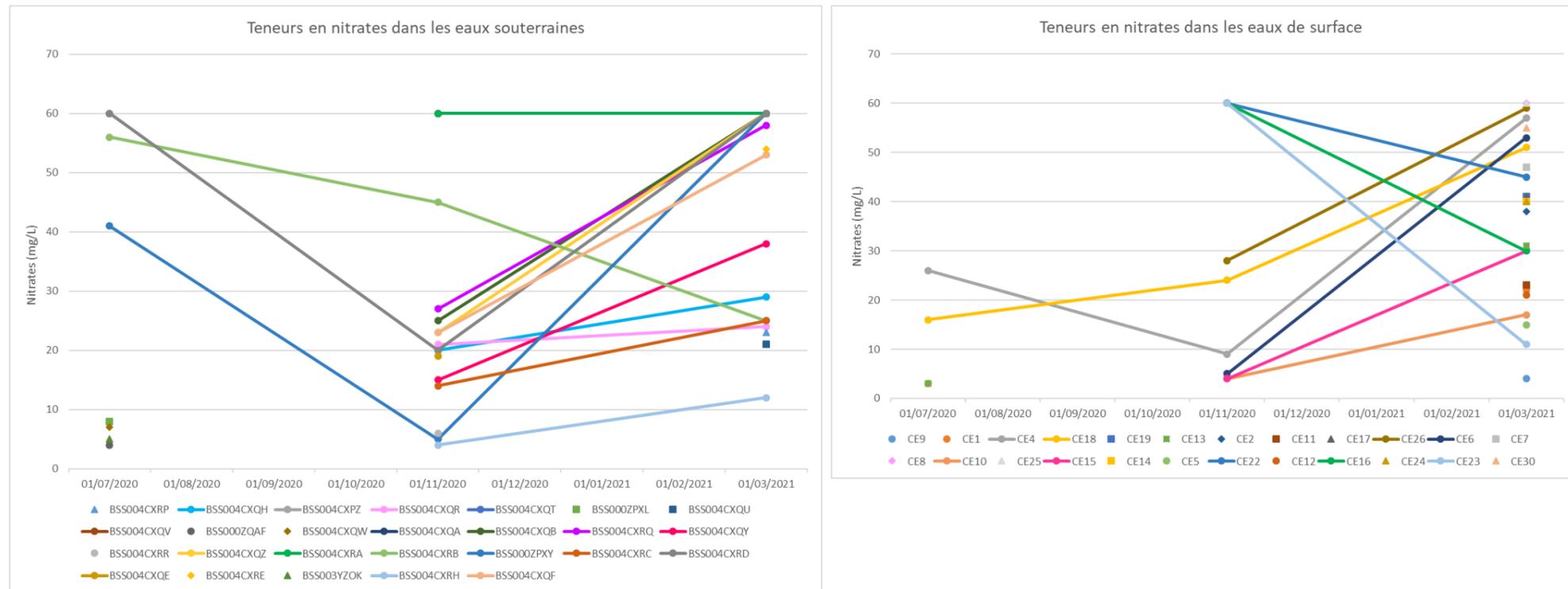


Illustration 64 : Evolution des teneurs en nitrates mesurées dans les eaux de surface (en haut) et les eaux souterraines (en bas) lors des 3 campagnes de mesures

ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de restauration des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche (Moulins)

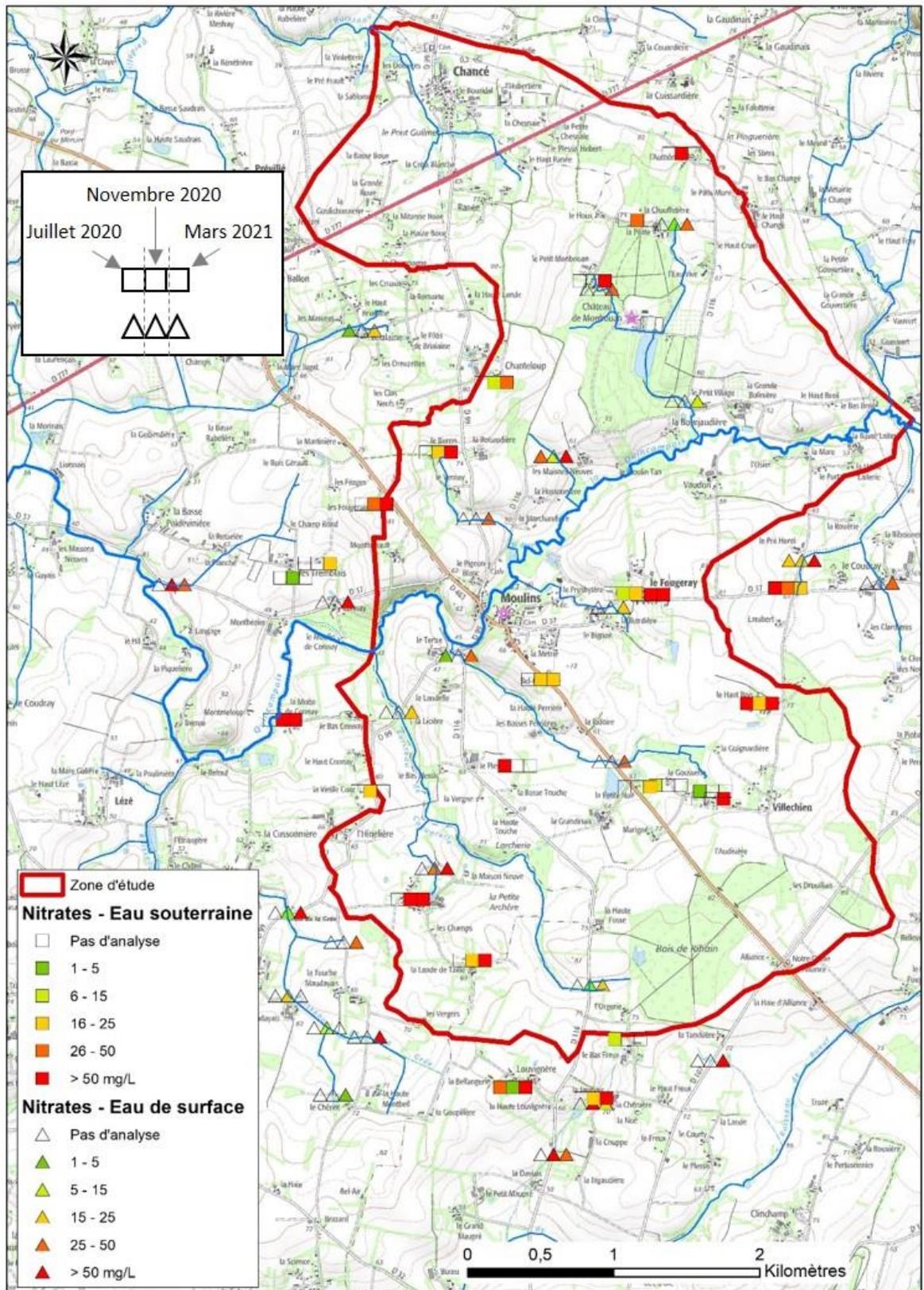


Illustration 65 : Carte globale de l'évolution des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines et les eaux de surface entre juillet 2020, novembre 2020 et mars 2021

2.4.5. Fer

La présence de fer en grande quantité, si elle s'accompagne d'une faible teneur en nitrates, est souvent l'indice d'un phénomène de dénitrification autotrophe naturelle au sein de la nappe : ce phénomène est lié à des réactions biochimiques, engendrées par la présence de pyrite en profondeur (sulfure de fer - FeS_2) ; minéral présent naturellement dans certaines roches (seules certaines formations géologiques sont concernées). L'équation chimique de cette dénitrification autotrophe est la suivante :



Les concentrations en fer des eaux souterraines de l'étude sont comprises entre 0,04 et 1,4 mg/L, avec une moyenne de 0,1 mg/L (Illustration 66). Les concentrations en fer mesurées par spectrophotométrie lors des 3 campagnes d'analyses montrent une très faible variabilité entre les points et entre les campagnes.

Un seul point présente une concentration élevée en fer (1,4 mg/L en juillet 2020 - BSS000ZQAF). La concentration en nitrates sur ce point était de 4 mg/L lors de la campagne de juillet 2020 et sa concentration en sulfates de 24 mg/L. Cette analyse unique ne permet pas de conclure quant à la présence d'un phénomène de dénitrification autotrophe sur ce point. Compte-tenu des faibles concentrations en fer mesurées dans les eaux souterraines, ce phénomène de dénitrification n'a pas été mis en évidence par ces analyses ailleurs sur le secteur d'étude.

Dans les eaux de surface, les concentrations mesurées sont comprises entre 0,04 et 4 mg/L, avec une variabilité élevée. Les concentrations mesurées en mars 2021 dans les eaux de surface ne semblent pas fiables (beaucoup de valeurs nulles contrairement aux autres campagnes, indiquant une concentration inférieure au seuil de mesure).

ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de restauration des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche (Moulins)

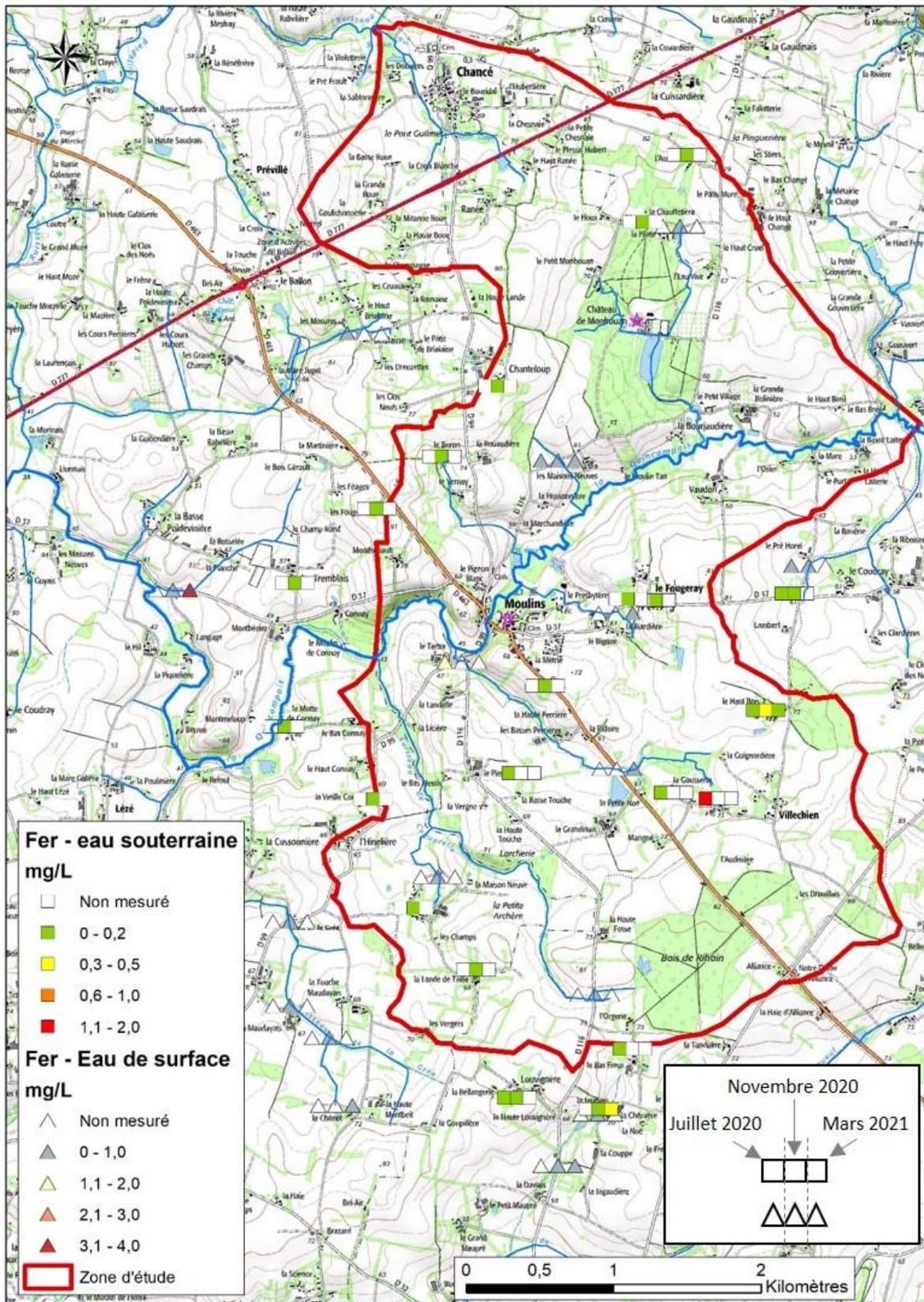


Illustration 66 : Evolution des concentrations en fer mesurées dans les eaux de surface (triangles) et les eaux souterraines (carrés) lors des 3 campagnes de mesures

2.4.6. Sulfates

Les concentrations en sulfates mesurées dans les eaux souterraines varient entre 24 et 200 mg/L (Illustration 67). Elles montrent peu de variabilité dans le temps (moyenne 41 mg/L) sauf sur deux points (BSS004CXQF et BSS004CXQB) où les concentrations atteignent respectivement 81 et 200 mg/L en mars 2021, alors que les concentrations étaient de 27 et 52 mg/L en novembre 2020. Ces points montraient également de fortes variations des concentrations en nitrates au cours du temps. Aucun dépassement de la limite de qualité de 250 mg/L pour les eaux destinées à la consommation humaine définie dans l'arrêté du 30 décembre 2022 modifiant l'arrêté du 11 janvier 2007 n'est enregistré.

Les valeurs sont beaucoup plus resserrées dans les eaux de surface, comprises entre 23 et 50 mg/L. Un seul point a été analysé sur 2 campagnes, ce qui ne permet pas de déterminer l'évolution des concentrations au cours du temps. Les concentrations mesurées en mars 2021 ne semblent pas fiables (beaucoup de valeurs nulles contrairement aux autres campagnes).

ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de restauration des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche (Moulins)

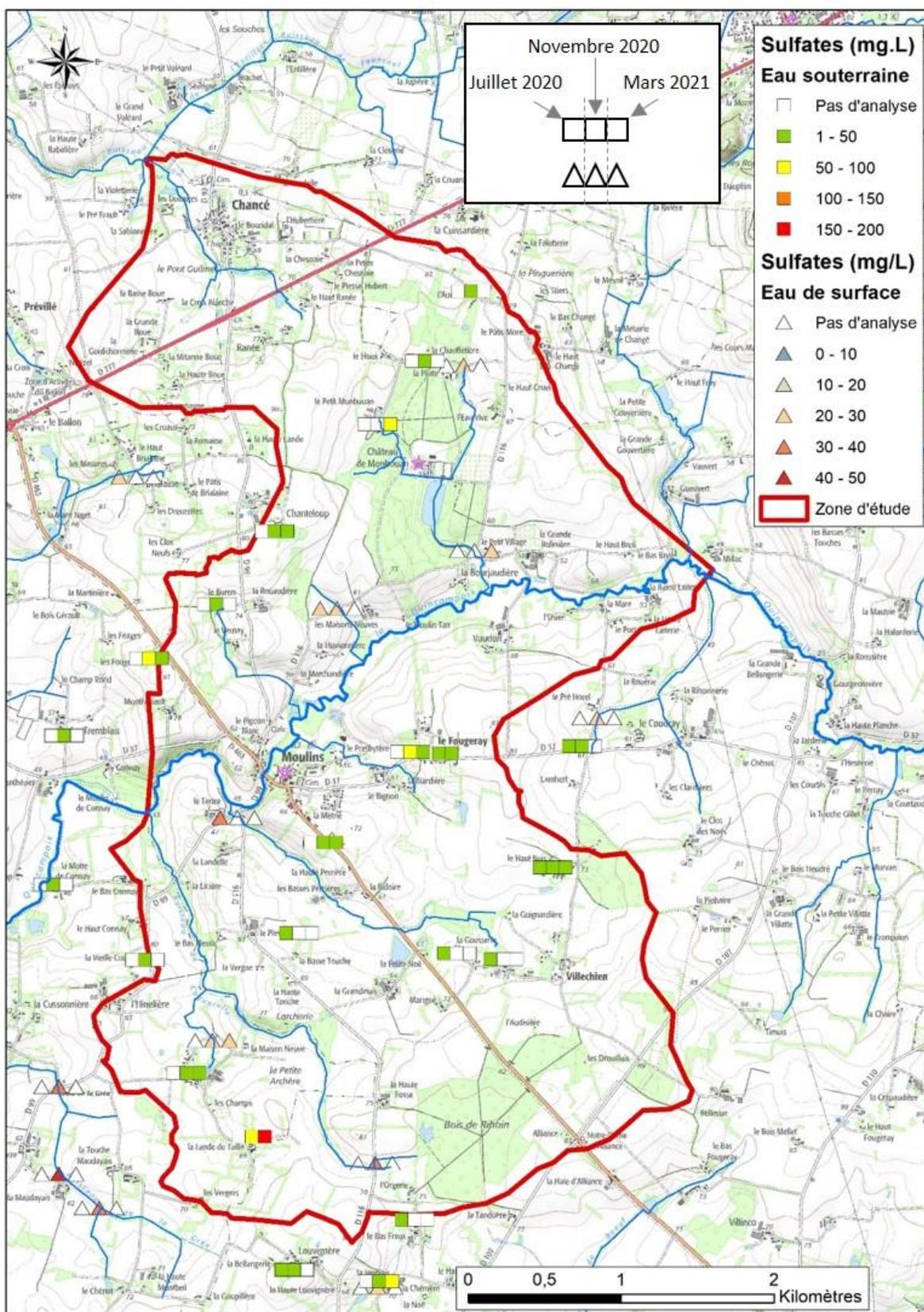


Illustration 67 : Evolution des concentrations en sulfates mesurées dans les eaux de surface (triangles) et les eaux souterraines (carrés) lors des 3 campagnes de mesures

2.4.7. Phosphore

Le phosphore n'est naturellement présent dans l'eau qu'en très faible quantité. Le phosphore que l'on retrouve dans l'eau provient essentiellement des rejets d'eaux résiduelles (déjections, lessives, ...) mais aussi des activités agricoles (engrais, effluents).

La forme orthophosphates (PO_4^{3-}) est la plus répandue. Les orthophosphates n'ont été mesurés par spectrophotométrie dans les eaux souterraines que sur les 8 points mesurés lors de la campagne de juillet 2020. Les valeurs sont comprises entre 0,6 et 5,2 mg/L (moyenne 1,95 mg/L). Elles sont supérieures au seuil de 0,5 mg/L qui constitue un indice de pollution anthropique. Néanmoins, on ne note pas de corrélation entre les concentrations en nitrates et en phosphates, qui augmentent généralement de pair lorsqu'il y a une pollution anthropique (Illustration 68).

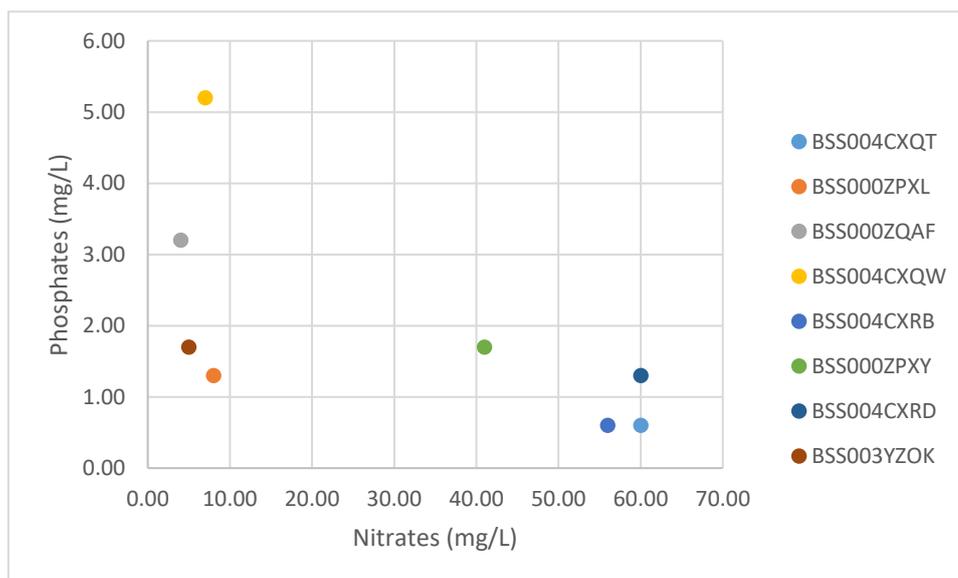


Illustration 68 : Diagramme binaire nitrates-phosphates dans les eaux souterraines (campagne de juillet 2020)

2.5. EVALUATION DES PRELEVEMENTS EN EAU SOUTERRAINE

2.5.1. Source de données

Les prélèvements en eau souterraine du secteur d'étude ont été évalués à partir de 3 sources de données différentes:

- la Banque Nationale des Prélèvements quantitatifs en Eau (BNPE - <https://bnpe.eaufrance.fr/presentation>) qui est l'outil national de recensement des prélèvements d'eau (souterraine et de surface) annuels, pour la France métropolitaine et les départements d'outre-mer. Les volumes bruts prélevés annuellement (volumes disponibles de 2008 à 2020) sont déclinés par type de ressource, commune et catégorie d'usage (énergie, AEP, industrie, irrigation et canaux). La BNPE recense les prélèvements soumis à la redevance de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne (volume prélevé supérieur à 7 000 m³/an), pour les usages eau potable, irrigation et industrie.

Avantages de cette source de données : base la plus exhaustive, fournissant des volumes réellement prélevés (compteur), avec une mise à jour annuelle.

Limites de cette source de données : les données ne sont disponibles que jusqu'à l'année N-2. Les prélèvements à usage élevage, représentant un volume non négligeable en Bretagne, ne sont pas comptabilisés dans cette base. D'autre part, le recensement des prélèvements pour l'irrigation n'y est pas exhaustif, notamment pour les cultures sous serres. Enfin, les prélèvements non soumis à redevance (inférieurs à 7000 m³/an) ne sont pas comptabilisés dans la BNPE.

Seuls 2 prélèvements à usage irrigation sont recensés dans cette base de données sur le secteur d'étude (données disponibles jusqu'à 2020) : un prélèvement d'eau souterraine à Moulins (lieu-dit La Rouale, non déclaré en BSS - Illustration 69) et un prélèvement d'eau de surface à Moulins également (lieu-dit La Grandinai), avec des volumes nuls en 2018, 2019 et 2020 et variables les années précédentes (de 1 940 à 25 372 m³ entre 2014 et 2016). Le prélèvement au lieu-dit La Rouale se situe à proximité immédiate du cours d'eau : il s'agit peut-être d'un prélèvement de surface mal référencé dans la BNPE.

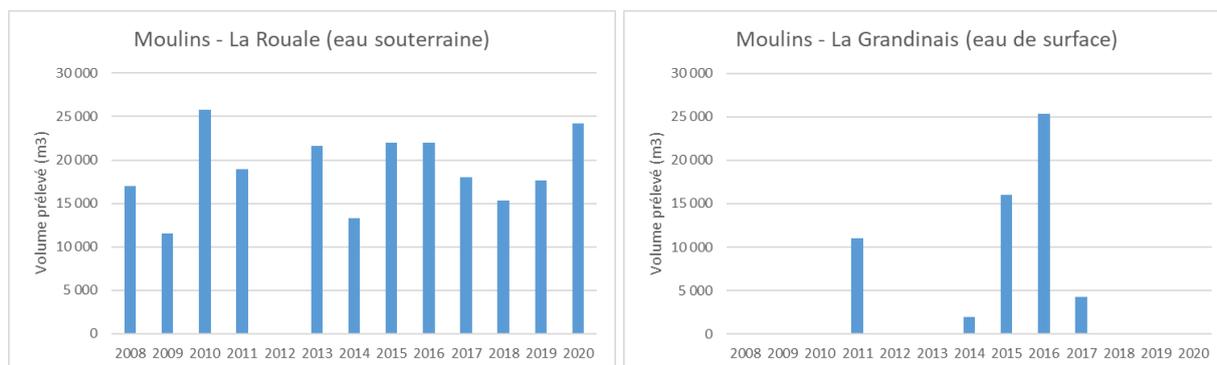


Illustration 69 : Evolution des volumes prélevés sur le secteur d'étude entre 2008 et 2020 (source : BNPE)

- la Banque de données du Sous-Sol (BSS), qui recense les ouvrages souterrains de plus de 10 m de profondeur, dont les forages d'eau, quel que soit leur usage (y compris élevage, en complément de la BNPE).

Les campagnes piézométriques locales réalisées en 2020 et 2021 ont permis d'ajouter 43 points dans la BSS (dont 24 situés dans le secteur d'étude), en complément des 11 points d'eau déjà bancarisés sur le secteur d'étude (Illustration 70). Il est donc probable qu'il existe d'autres forages ou puits prélevant de l'eau souterraine dans le secteur, non bancarisés dans les bases de données.

Limites de cette source de données : tous les ouvrages souterrains de prélèvements d'eau ne sont pas recensés dans la BSS. D'autre part, le volume annuel prélevé n'est pas toujours renseigné dans cette base et s'il est renseigné, il s'agit d'un volume déclaré à la réalisation de l'ouvrage, non mis à jour par la suite.

Usage	Nombre d'ouvrages	Volume (m3/an)
élevage	12	20 075
irrigation	1	800
agricole	2	3 000
artisanat/industrie	1	-
domestique/jardin	10	200
pas d'usage	9	-
	35	24 075

Illustration 70 : Détail par volume et usage des 35 points d'eau recensés dans la BSS sur le secteur d'étude

- la base de données Forages domestiques, qui recense les ouvrages de prélèvement d'eau souterraine à usage domestique (puits et forage prélevant moins de 1 000 m³/an) déclarés en mairie.

Limites de cette source de données : peu d'ouvrages domestiques sont renseignés dans cette base déclarative, en vigueur depuis 2008.

Aucun forage n'était bancarisé dans la base forages domestiques sur le secteur d'étude au 09/02/2022.

2.5.2. Bilan des prélèvements d'eau

En 2020, d'après les données consultées, aucun prélèvement d'eau de surface n'était recensé sur le secteur d'étude et les prélèvements en eau souterraine s'élevaient à 48 270 m³ (Illustration 71).

Si on rapporte ce volume prélevé à la surface du secteur d'étude (19 km²), on obtient une pression de prélèvement de 2,5 mm/an, ce qui est relativement faible, notamment en comparaison de la pluviométrie annuelle (environ 700 mm par an en moyenne à Arbrissel – données Météo-France sur la période 2005-2021).

Il faut cependant noter que des prélèvements non déclarés peuvent ne pas avoir été pris en compte dans ce bilan. Pour autant, il est peu probable que les étiages sévères rencontrés sur le secteur d'étude s'expliquent par une forte pression de prélèvements en eau de surface et en eau souterraine.

ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de resTauratIon des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche (Moulins)

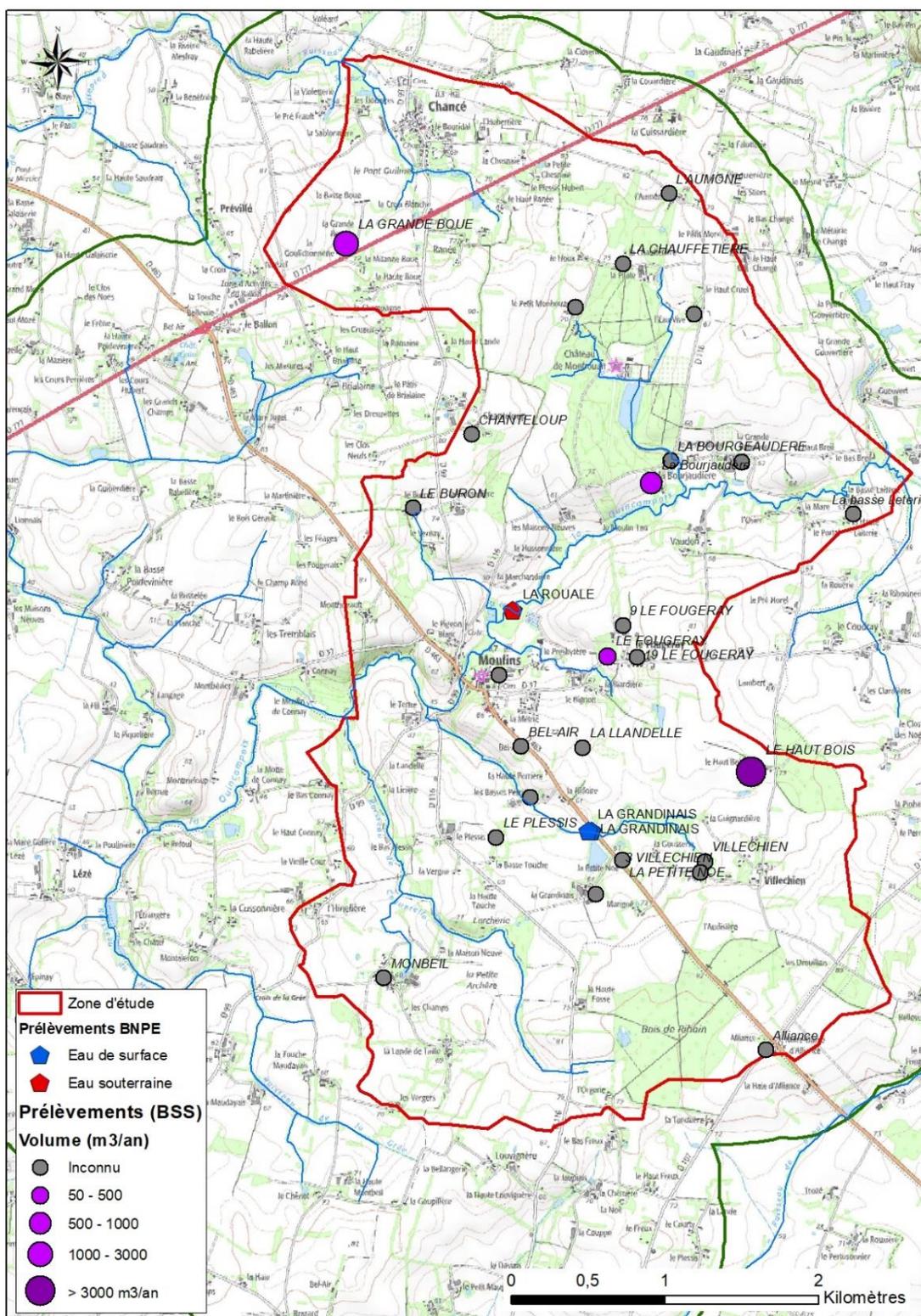


Illustration 71 : Localisation des prélèvements d'eau recensés sur le secteur d'étude (source de données : BNPE et BSS)

2.6. EQUIPEMENT DE 3 POINTS D'EAU AVEC SUIVI PIEZOMETRIQUE

Comme convenu dans le cahier des charges du projet et afin de mettre en place un premier suivi des eaux souterraines sur le secteur, suite aux campagnes piézométriques, 3 puits existants ont été équipés d'une sonde automatique de mesures des niveaux (sonde pression Dipper PT SEBA). Des ouvrages sans pompage régulier et avec un battement non négligeable entre les campagnes hautes et basses eaux, ont été privilégiés, ce qui limitait les possibilités de choix (Illustration 72 et Illustration 73). Une mesure par heure a été enregistrée sur ces ouvrages entre juillet 2021 et novembre 2022.

ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de restauration des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche (Moulins)

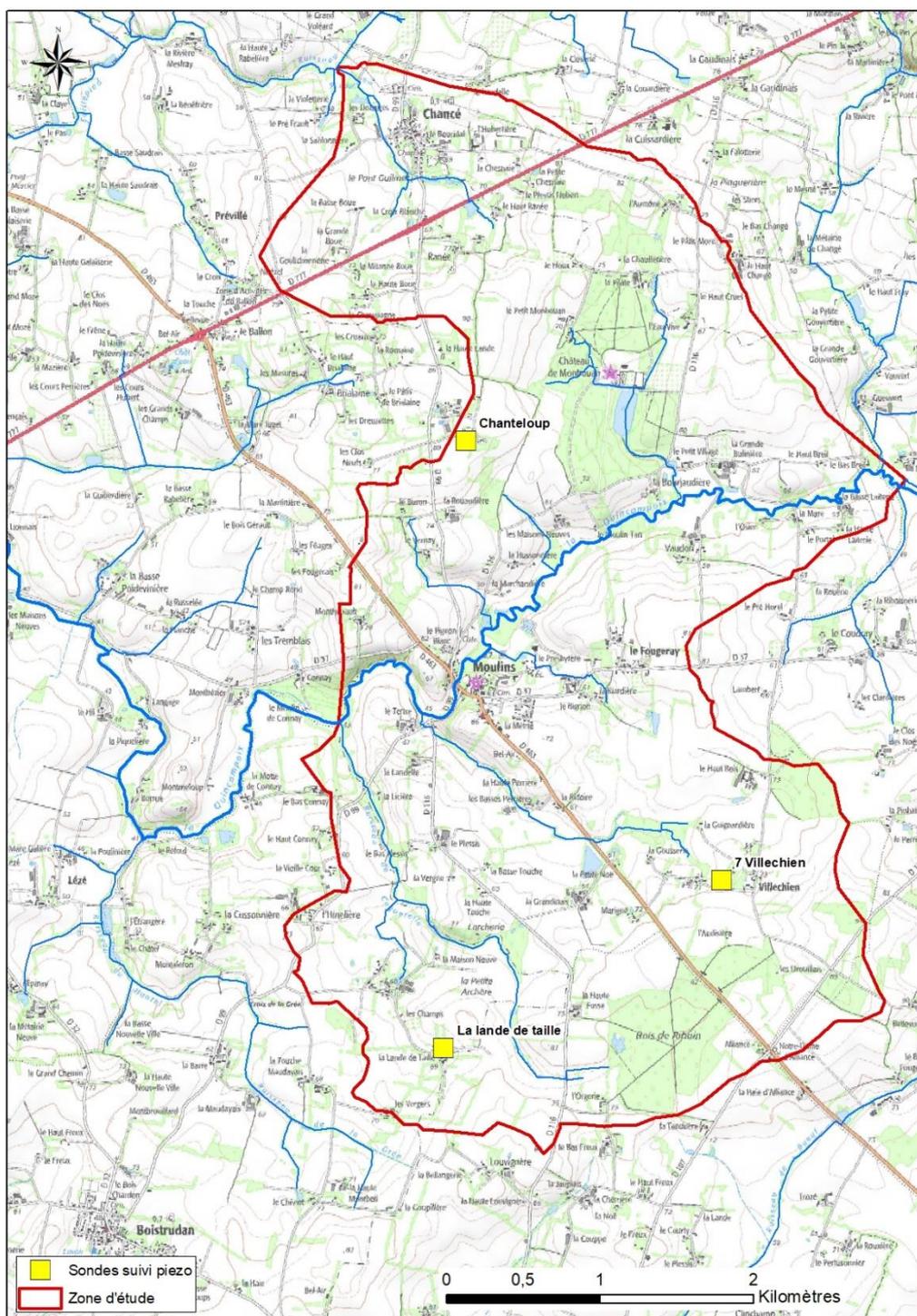


Illustration 72 : Localisation des 3 puits équipés pour un suivi piézométrique en continu

Lieu-dit	Commune	Code BSS	Altitude (m NGF)	Profondeur (m)	Lithologie	Altération	Usage	Niveau (m NGF)		Battement (m)
								Minimum	Maximum	
Chanteloup	MOULINS	BSS004CXQY	83.64	16.5	Schistes briovériens	Isaltérites	Jardin	73.56	81	7.44
Villechien	MOULINS	BSS004CXQX	73.59	7	Schistes briovériens	Fissuré	Aucun	64.08	67.96	3.88
La Lande de taille	BOISTRUDAN	BSS004CXQB	68.28	14.3	Schistes briovériens	Allotérites	Aucun	66.97	69.84	2.87

Illustration 73 : Caractéristiques des 3 puits équipés pour un suivi piézométrique en continu

Les chroniques de niveau de ces 3 ouvrages ont été superposées à celles du piézomètre d'Arbrissel suivi en continu par le BRGM ainsi qu'aux chroniques de précipitations enregistrées à Arbrissel (station 35005001) par Météo-France (Illustration 74).

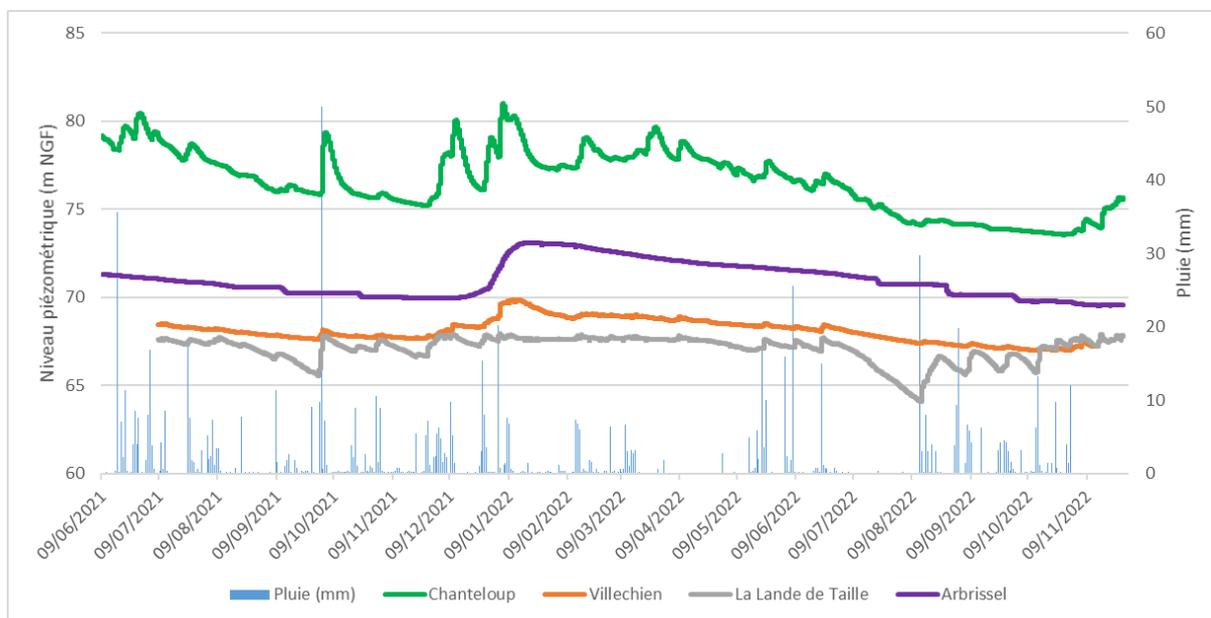


Illustration 74 : Chroniques piézométriques des 3 ouvrages équipés sur le secteur d'étude, du piézomètre d'Arbrissel et chronique de précipitations à Arbrissel sur la période juillet 2021-novembre 2022 (octobre 2022 pour la pluviométrie)

Sur la période de suivi, on peut noter des épisodes pluvieux non négligeables en juin et juillet 2021, ayant entraîné des recharges ponctuelles, visibles notamment sur le puits de Chanteloup. Les pluies efficaces de la recharge hivernale sont intervenues en grande quantité à partir d'octobre 2021 mais la pluviométrie de l'année hydrologique 2021-2022 a été inférieure aux normales et la baisse du niveau des nappes a commencé de manière précoce en février 2022. Les niveaux piézométriques à Arbrissel sont restés globalement conformes aux moyennes pendant l'année 2022 (Illustration 75).

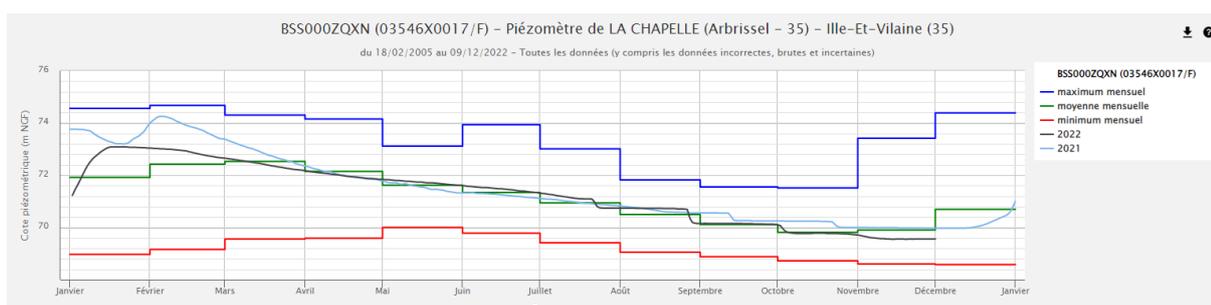


Illustration 75 : Chronique piézométrique 2021-2022 à Arbrissel (source : ADES)

Les 3 puits montrent un cycle annuel plus ou moins marqué, avec des basses eaux à l'automne et des hautes eaux en hiver :

- les niveaux minimums ont été enregistrés en octobre 2022 pour les puits de Chanteloup et Villechien et en août 2022 pour le puits de la Lande de Taille,
- les niveaux maximums ont été enregistrés en janvier 2022 sur les 3 puits.

Le battement est de 7,44 m entre hautes et basses eaux sur le puits de Chanteloup. Il est plus faible sur les deux autres puits (3,88 m à Villechien et 2,87 m à La Lande de taille). Le niveau piézométrique à La Lande de Taille semble assez constant, autour de 67,7 m NGF entre janvier et juin 2022, sans hautes eaux vraiment marquées. Il s'agit du piézomètre situé le plus bas en altitude.

Les puits de Chanteloup (en vert sur l'illustration 74) et de La Lande de taille (en gris) sont plus réactifs aux pluies que le puits de Villechien (en orange) et le piézomètre d'Arbrissel (en violet), qui ont des réactions beaucoup plus tamponnées. Sur les puits de Chanteloup et de La Lande de taille, le niveau piézométrique augmente quelques heures après les précipitations et les pics piézométriques sont décalés de 3 à 4 jours par rapport aux épisodes pluvieux intenses.

Il serait intéressant de poursuivre le suivi piézométrique sur ces points, notamment dans l'optique d'évaluer l'effet bénéfique de la suppression de drains agricoles sur les eaux souterraines avec une amélioration souhaitée de la recharge des nappes.

3. Identification des secteurs propices à la suppression de drains

3.1. METHODOLOGIE : ANALYSE MULTICRITERE

La réalisation d'une carte simplifiée de l'aptitude des sols à infiltrer l'eau s'est basée sur une approche de cartographie à index, couplée à un système de classes pondérées.

Les méthodes de cartographies à index sont basées sur la combinaison de cartes de divers paramètres d'une région, en donnant un index numérique ou une valeur à chaque paramètre. La combinaison des paramètres se fait au moyen de logiciels de traitement multicritère (SIG, par exemple).

Le système de classes pondérées est basé sur l'affectation de notes aux paramètres qui sont retenus pour l'évaluation de la capacité des sols à l'infiltration, en définissant des intervalles (classes) en fonction de la variabilité de chaque paramètre. Avant l'analyse combinatoire de ces paramètres (somme ou multiplication), une pondération peut être attribuée à chaque paramètre, selon son importance pour l'évaluation de l'aptitude des sols à l'infiltration des eaux pluviales.

3.2. PARAMETRES RETENUS ET NOTES ATTRIBUEES

La réalisation d'une carte du potentiel d'infiltration est un exercice complexe, notamment si elle doit être exploitée à l'échelle parcellaire. Cela nécessite des jeux de données très denses notamment en matière de pédologie et de mesure de perméabilité à saturation en eau des sols. Or, ces informations sont rarement disponibles à l'échelle attendue. Dans le cadre du projet PHOEBUS (Pinson et al., 2019a), une liste de 7 paramètres a été établie afin de définir le potentiel d'infiltration des eaux pluviales sur le territoire de Rennes Métropole.

Dans le cadre du projet ANTISEICHE, dont les objectifs diffèrent de ceux du projet PHOEBUS, il a été décidé de restreindre les critères utilisés afin de mettre en place une méthode simplifiée d'évaluation du potentiel d'infiltration, facilement reproductible sur d'autres secteurs géographiques. Les 3 paramètres retenus sont les suivants :

- L'épaisseur de la zone non saturée en hautes eaux (grille au pas de 50 m) ;
- La présence d'argiles (polygones) à travers la cartographie des formations superficielles au 1/10 000 ;
- Les pentes des terrains du secteur d'étude (grille au pas de 50 m).

Pour chaque paramètre, une note variant de -99 à 4 a été attribuée. Elle reflète la capacité d'infiltration. Ainsi, une note égale à -99 correspond à « pas d'infiltration possible » et une note de 4 à une « infiltration favorable ». Entre ces deux extrêmes et en fonction des classes de chaque paramètre, une ou deux notes intermédiaires ont été créées permettant ainsi d'apporter de la nuance.

3.2.1. L'épaisseur de la zone non saturée en hautes eaux

Pour rappel, la carte de l'épaisseur de la zone non saturée, déduite de la carte piézométrique hautes eaux, est associée à une cartographie de l'indice de confiance (Illustration 52) lié à la précision de l'interpolation des données piézométriques.

On considère que des conditions défavorables pour infiltrer des eaux pluviales (et donc retirer des drains agricoles) sont réunies lorsqu'un sol est saturé en eau et que la nappe est proche de la surface, d'où l'intérêt de connaître l'épaisseur de la zone non saturée (ZNS). La campagne piézométrique hautes eaux de mars 2021 a permis de répondre à ce besoin en calculant l'épaisseur de la ZNS en périodes de hautes eaux (paragraphe 2.3) sous forme d'une grille au pas de 50 mètres sur l'ensemble du secteur d'étude.

Dans le document de 2015 intitulé « Les ouvrages d'infiltration et la fonction filtration - recommandations à l'usage des gestionnaires – Programme GESSOL » une recherche bibliographique a été réalisée sur les ouvrages et les conditions d'infiltration des eaux pluviales. Ces recommandations issues des règles de l'art notamment en géotechnique ont permis de définir des classes d'épaisseur de la zone non saturée (Illustration 76).

ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions
de resTauratiOn des milieux aquatiqUes du bassin versant de la Seiche (Moulins)

Épaisseur minimale de zone non-saturée	Références
« La distance minimale entre la base du puits et les plus hautes eaux de la nappe doit être d'environ 1 m pour assurer une épuration correcte. »	<i>Techniques alternatives en assainissement pluvial</i> (Azzout et al., 1994).
« [...] plus haut niveau de la nappe à plus de 1,20 m du fond du bassin. »	<i>Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement</i> (Chocat, 1996).
« Pour infiltrer de l'eau, il est donc indispensable d'avoir [...] une épaisseur non-saturée suffisante pour que les phénomènes de filtration et de biodégradation puissent épurer efficacement l'eau avant qu'elle ne rejoigne la nappe. En première approche, une épaisseur de 1 m au-dessus du niveau le plus haut de la nappe paraît un minimum. On évitera systématiquement les zones karstiques et fissurées. »	<i>La ville et son assainissement. Principes, méthodes et outils pour une meilleure intégration dans le cycle de l'eau</i> (Certu, 2003).
« Il est conseillé de conserver une épaisseur de 1 m à 1,50 m de matériaux non saturés au-dessus de la nappe. »	<i>Guide méthodologique pour la prise en compte des eaux pluviales dans les projets d'aménagement</i> (MISEs de la région des Pays de la Loire, juin 2004).
« Une zone de sol non-saturée de 2 m doit être conservée entre le niveau des plus hautes eaux de la nappe et le fond de l'ouvrage. »	Fiche technique n°05 du Grand Lyon – Bassins de rétention/infiltration.
« Une épaisseur minimale de 2 m est fixée entre le toit de la nappe et la fond de la structure permettant l'infiltration. Cette épaisseur peut être ramenée à 1 m en centre urbain dense pour l'infiltration des eaux de toiture. »	Fiche technique n°00 du Grand Lyon – Méthode pour le dimensionnement des ouvrages de stockage.
« Le niveau des plus hautes eaux de la nappe est un paramètre important pour plusieurs raisons. Une nappe peu profonde peut réduire la profondeur utile de l'ouvrage et corrélativement les volumes de stockage. Elle risque par ailleurs d'être très facilement contaminée par une pollution chronique ou accidentelle avec limitation des mécanismes de rétention capillaire, de filtration et de dégradation dans la zone non saturée du sol rendue peu épaisse. [...] Une nappe est considérée comme peu profonde par rapport à l'ouvrage si le niveau piézométrique des plus hautes eaux est situé à moins de 1 m du fond de la future structure. »	<i>L'infiltration en question – Recommandations pour la faisabilité, la conception et la gestion des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales en milieu urbain</i> (GRAIE, 2009).

Illustration 76 : Extrait « Les ouvrages d'infiltration et la fonction filtration - recommandations à l'usage des gestionnaires – GESSOL, 2015 »

Une classification de l'épaisseur minimum de la ZNS avec les notes associées a ensuite été proposée (Illustration 77) :

- Entre 0 et 2 m : défavorable (note = -99). Il s'agit d'un critère rédhibitoire pour le retrait des drains ;
- Entre 2 et 3 m : assez favorable (note = 3) ;
- Supérieur à 3 m : très favorable (note = 4).

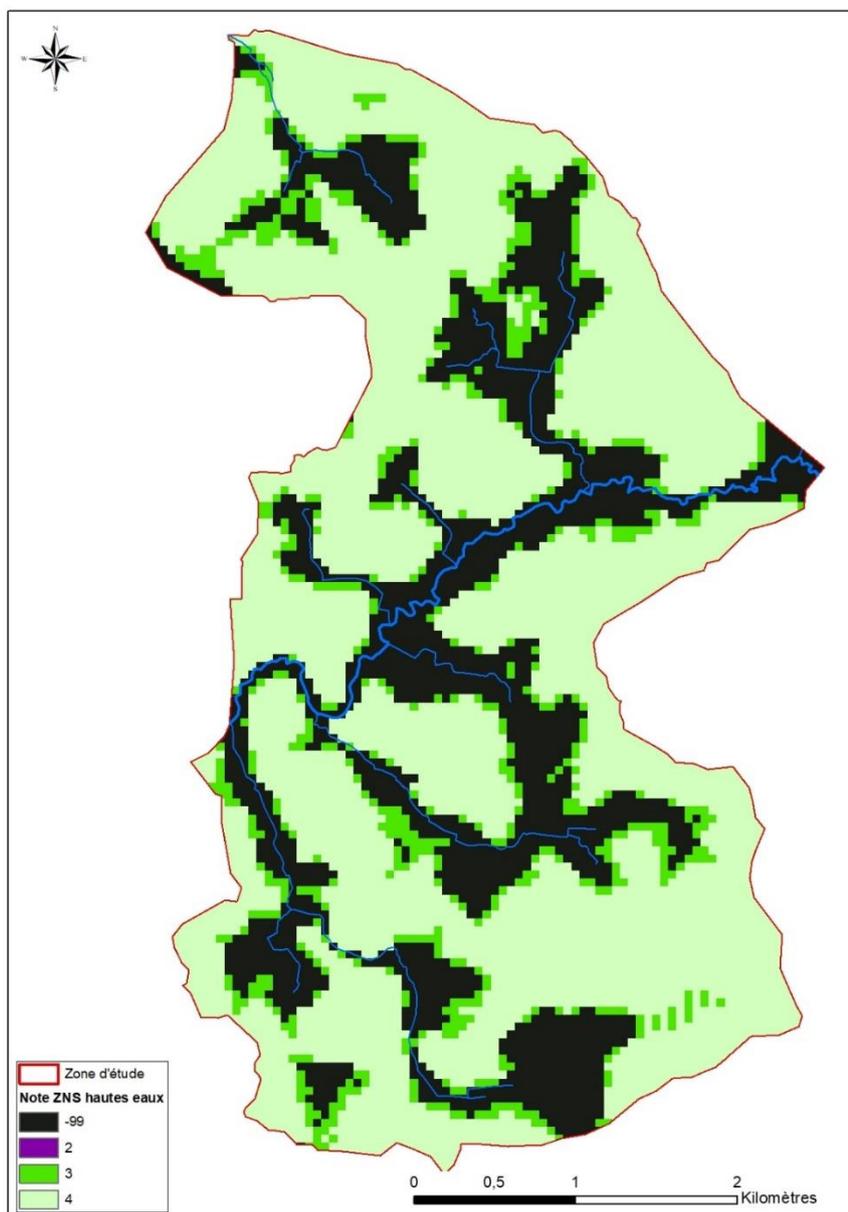


Illustration 77 : Cartographie des notes attribuées pour l'épaisseur de la zone non saturée

3.2.2. Les pentes des terrains du secteur d'étude

La pente du sol joue un rôle important dans les écoulements de surface mais aussi sur les capacités d'infiltration. En effet, une pente trop importante empêche les stockages d'eau et réduit ainsi la possibilité à l'eau de pénétrer dans le sol (le ruissellement devient le phénomène prépondérant).

Dans le cas de pente élevée, l'infiltration des eaux pluviales n'est pas toujours une option adéquate car certains ouvrages dédiés ne peuvent pas être installés et il y a aussi un risque de « résurgence » des eaux infiltrées sur les secteurs situés en aval. L'apport de ces eaux infiltrées peut entraîner des phénomènes de déstabilisation du sol sur les zones périphériques.

Sur le secteur d'étude, les pentes ont été calculées en pourcentage à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) 25 m de l'IGN (Illustration 78).

Pour ce calcul de pentes, le MNT au pas de 5 m n'a pas été utilisé car la taille du pixel entraîne sur la grille « résultat » la présence de nombreuses aspérités, détails (talus, routes, ...) qui n'ont pas d'intérêt à l'échelle de travail du projet ANTISEICHE.

En combinant différentes sources d'informations comme les études déjà réalisées sur l'infiltration des eaux pluviales (Nantes : Conil et al., 2015 ; Rennes : Pinson et al., 2019a) et les recommandations géotechniques liées à la mise en place des techniques alternatives (noues, tranchées, ...) pour l'infiltration des eaux pluviales (Graie 2014, ...), la classification suivante de la pente a été arrêtée :

- Pente moyenne > 7 % : défavorable (note = -99). Il s'agit d'un critère rédhibitoire pour le retrait de drains ;
- Pente moyenne > 5 et ≤ 7 % : peu favorable (note = 2) ;
- Pente moyenne > 2 et ≤ 5 % : assez favorable (note = 3) ;
- Pente moyenne ≤ 2 % : très favorable (note = 4).

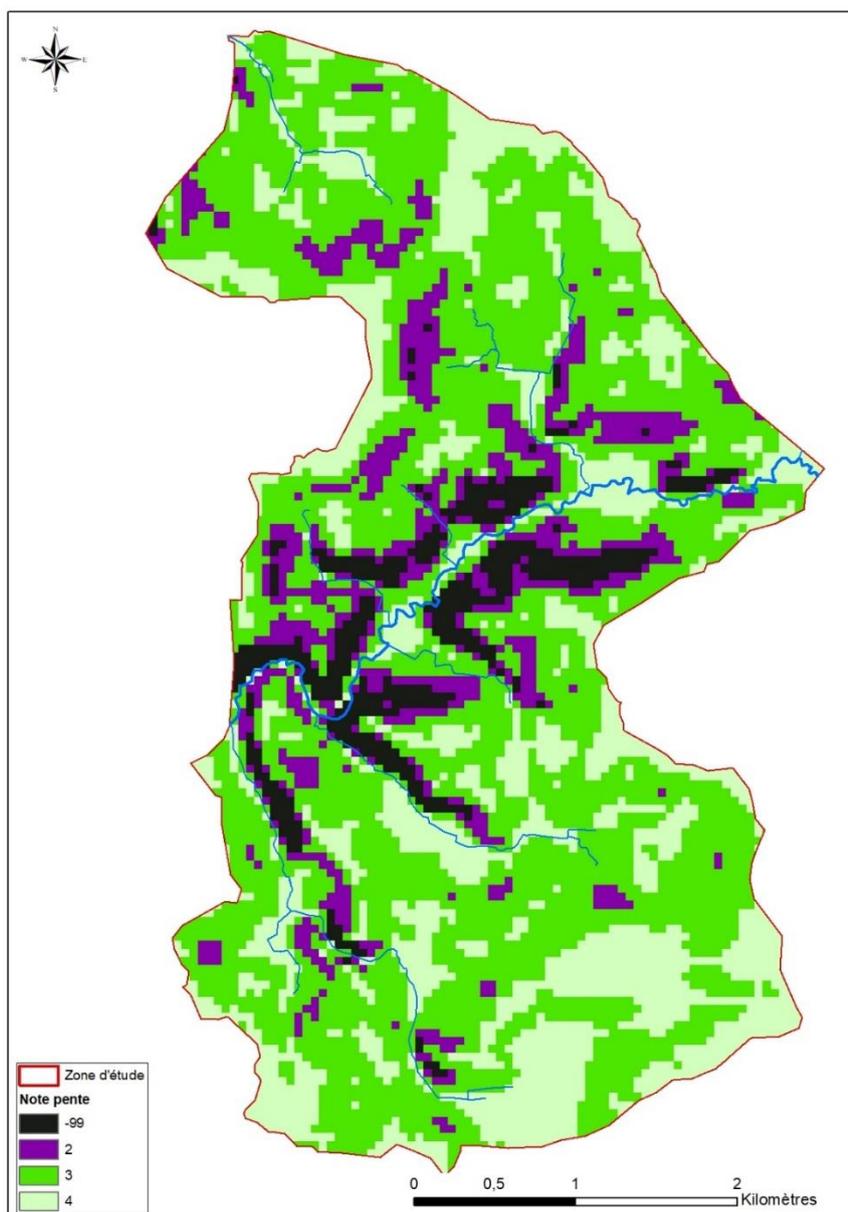


Illustration 78 : Cartographie des notes attribuées pour le paramètre « pente »

3.2.3. Les formations géologiques

Il est très complexe de définir une perméabilité des sols à l'échelle d'un vaste territoire d'étude (19 km²). Il a donc été décidé de s'intéresser à la présence d'argile, qui conditionne les possibilités éventuelles d'infiltration de l'eau dans le sol.

L'argilosité des formations superficielles a été déterminée à partir des levés de terrain et de différentes données décrites au chapitre 2.1. La classification utilisée des formations géologiques en fonction de leur capacité d'infiltration a été définie de la façon suivante (Illustration 79) :

- Allotérites : défavorable (note = -99). Il s'agit d'un critère rédhibitoire pour le retrait de drains.
- Colluvions / Alluvions : peu favorable (note = 2)

- Isaltérites : assez favorable (note = 3)
- Zone fissurée : très favorable (note = 4)

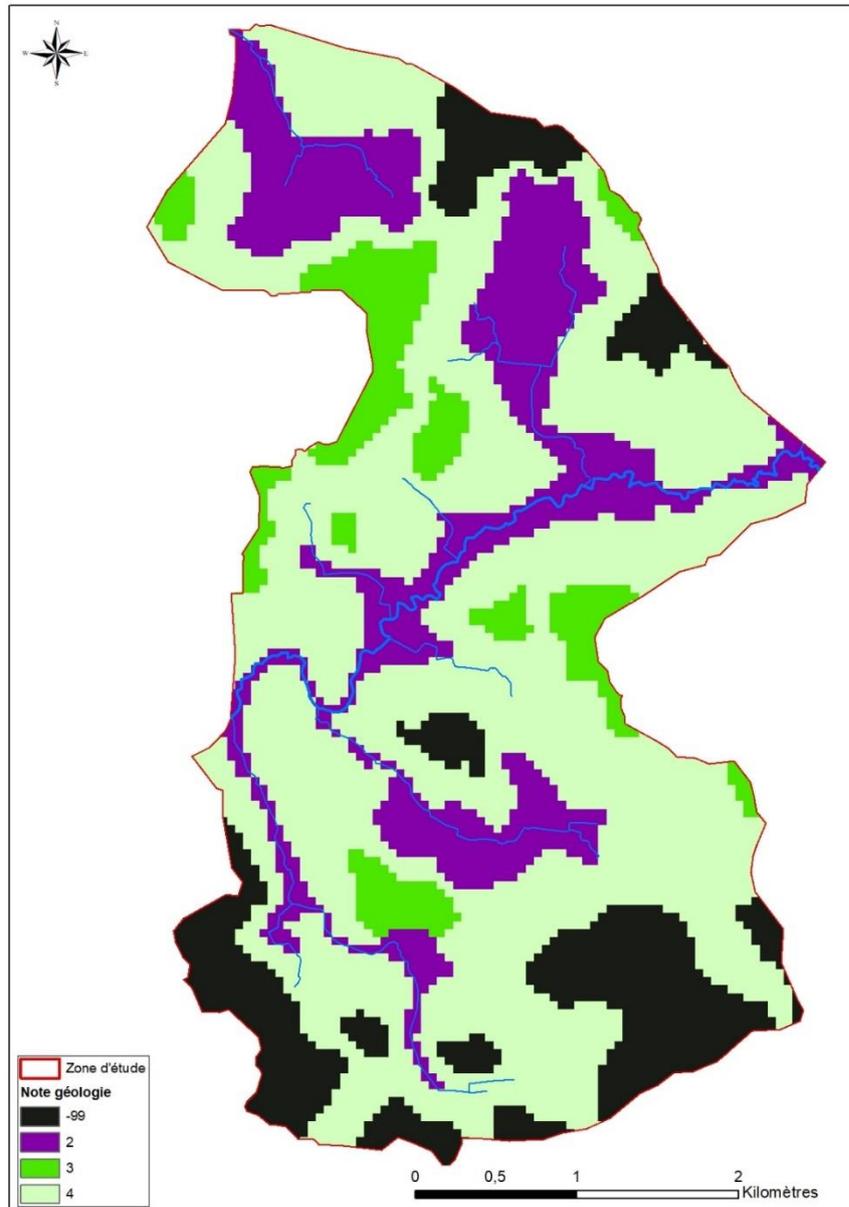


Illustration 79 : Cartographie des formations superficielles sur le secteur d'étude et note associée en fonction de la présence d'argile

3.3. CROISEMENT DES DONNEES

Dans le paragraphe précédent, l'ensemble des paramètres utilisés pour mener l'analyse multicritère a été décrit avec le choix des notes associées pour qualifier la fonction d'aptitude du sol et du sous-sol à l'infiltration des eaux pluviales.

Ces paramètres intrinsèques traduisent la capacité des sols à laisser pénétrer les eaux à partir de la surface pour ensuite continuer à percoler à travers la ZNS.

Dans le cadre de cette étude, les 3 paramètres n'ont pas été pondérés, étant considérés comme d'égale importance : chacun a un poids identique dans le calcul final (Illustration 80 et Illustration 81).

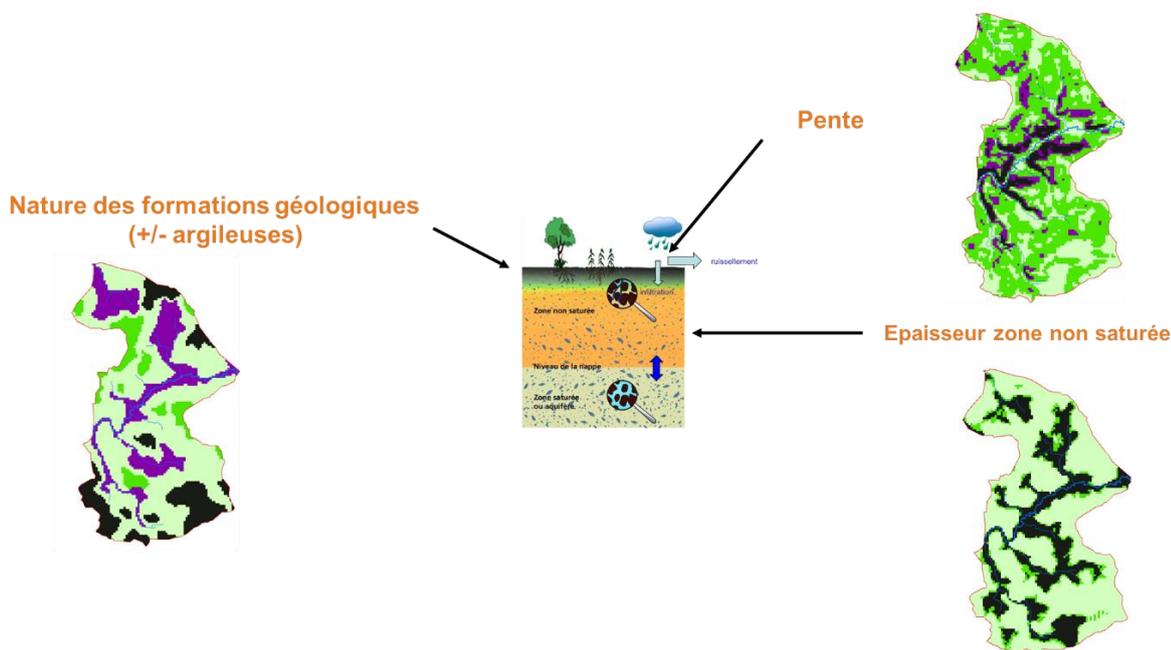


Illustration 80 : Influence des paramètres sur les différents compartiments

Les notes attribuées à chaque paramètre sont récapitulées dans le tableau suivant :

		Note			
		-99	2	3	4
Critères	Epaisseur ZNS (m)	0 - 2	/	2 - 3	> 3
	Pente (%)	> 7	> 5 et ≤ 7	> 2 et ≤ 5	≤ 2
	Géologie	Allotérites	Colluvions, alluvions	Isaltérites	Zone fissurée

Illustration 81 : Tableau récapitulatif des notes attribuées à chaque paramètre

Pour chaque maille de 50 m, un « Indice ANTISEICHE » ($I_{ANTISEICHE}$) basé sur les 3 critères a été défini de la manière suivante :

$$I_{ANTISEICHE} = [ZNS] + [pente] + [géologie]$$

Les valeurs de cet indice sont comprises entre -297 (3 critères rédhibitoires notés -99) et 12, et sont réparties selon la classification suivante :

- $I_{ANTISEICHE} < 0$: zones non favorables à l'infiltration (au moins un des critères est rédhibitoire)
- $7 \leq I_{ANTISEICHE} \leq 9$: zones peu favorables
- $10 \leq I_{ANTISEICHE} \leq 11$: zones assez favorables
- $I_{ANTISEICHE} = 12$: zones favorables

Compte tenu des informations utilisées et de leurs échelles de validité, une telle cartographie doit être considérée comme indicative. Elle ne doit pas être utilisée à une échelle inférieure au 1/10 000.

ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de restauration des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche (Moulins)

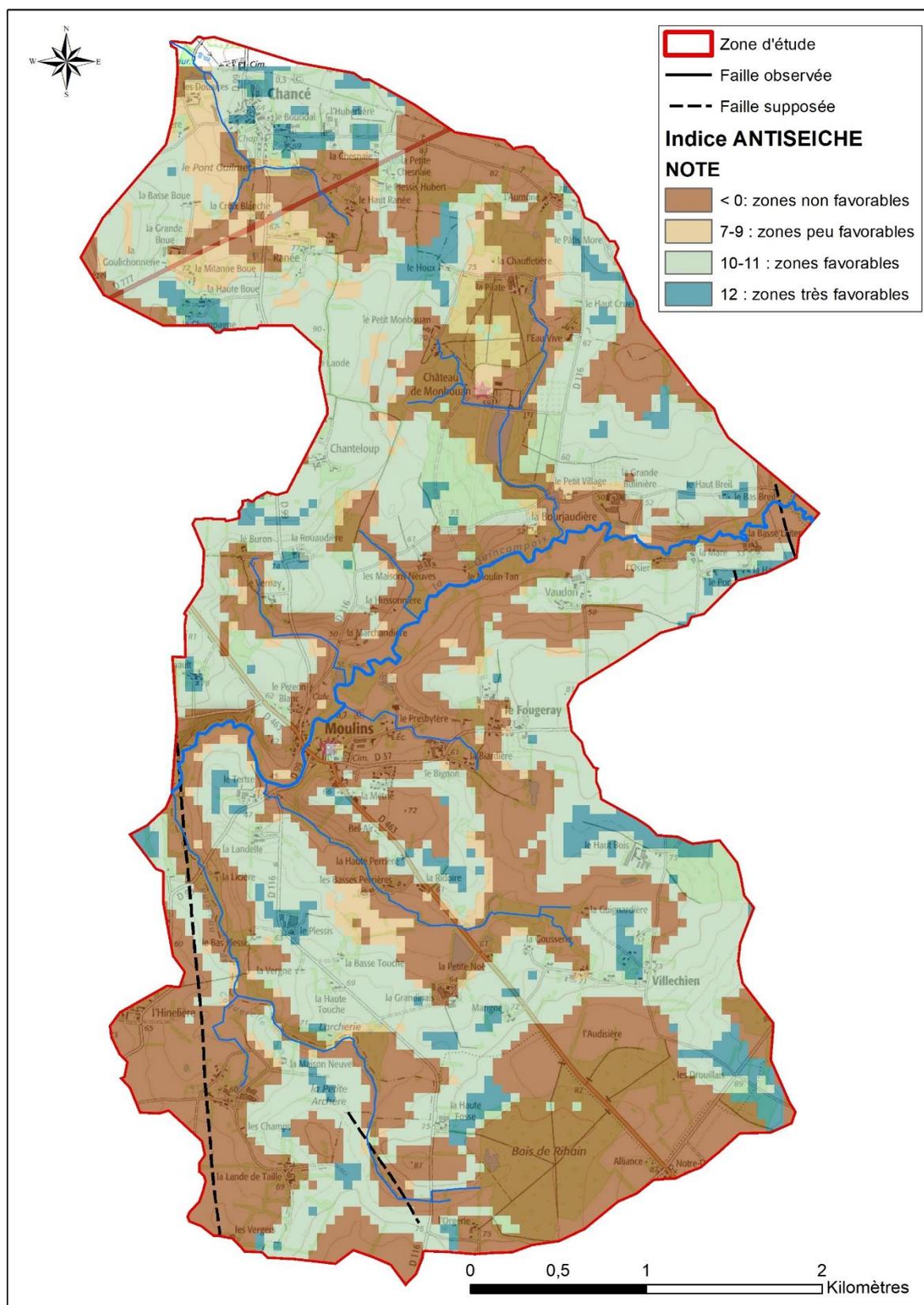


Illustration 82 : Cartographie de l'indice ANTISEICHE sur le secteur d'étude sur fond IGN scan 25

3.4. COMPARAISON AVEC LES PARCELLES DRAINÉES

L'EPTB Vilaine a réalisé un travail de compilation de différentes sources de données afin de recenser de manière la plus exhaustive possible les parcelles drainées sur le secteur d'étude :

- Comparaison des photographies aériennes de 1950 avec les photographies récentes,
- Inventaire des zones humides (SAGE Vilaine),
- Diagnostic Contrat Territorial Milieux Aquatiques (CTMA - points) et analyses de reliquats azotés post-absorption (RPA) 2021 (points), croisés avec le Registre Parcellaire Graphique (RPG) 2020 pour obtenir une information parcellaire,
- Diagnostics DPR2 (diagnostic des parcelles à risques phytosanitaires - parcelles) réalisés par la Chambre d'agriculture en 2019.

L'EPTB a extrait de chacune de ces sources de données, les informations sur les parcelles drainées du secteur d'étude (Illustration 83).

Cette analyse a montré que 80 % des points sur lesquels des analyses RPA ont été réalisées sont situés sur des parcelles drainées. Il faut noter que les parcelles ne sont pas choisies au hasard pour ces diagnostics et que l'information sur la présence d'un drainage au droit du point où est réalisée l'analyse RPA n'implique pas forcément que l'ensemble de la parcelle soit drainé.

Il est également intéressant de comparer la carte des parcelles drainées et la carte des secs constatés sur les cours d'eau (Illustration 84), pour déterminer des secteurs prioritaires pour le retrait des drains.

Sur l'illustration 85, on constate qu'un tiers des parcelles drainées sont situées au niveau d'un indice ANTISEICHE supérieur ou égal à 10, indiquant une zone plutôt favorable à l'infiltration d'eau, dans laquelle la nappe n'est pas sub-affleurante, la pente faible et les formations géologiques peu argileuses.

Ces parcelles drainées se trouvant intégralement au niveau d'un indice ANTISEICHE supérieur ou égal à 10 pourraient faire partie des secteurs sur lesquels le retrait des drains pourrait être étudié en priorité. Pour les parcelles se trouvant en partie sur des zones favorables à l'infiltration et en partie sur des zones défavorables, une analyse plus précise devra être menée pour déterminer s'il est possible de ne retirer qu'une partie des drains.

Le retrait des drains permettrait d'améliorer l'infiltration de l'eau de pluie dans le sol et le sous-sol et donc d'augmenter la quantité d'eau souterraine (volume non quantifié) mais le retrait des drains n'aura pas d'impact sur le mécanisme de vidange de la nappe. La restitution au cours d'eau de cette eau infiltrée reste soumise aux capacités d'écoulement dans l'aquifère, liées notamment à ses propriétés hydrodynamiques.

ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de resTauratIon des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche (Moullins)

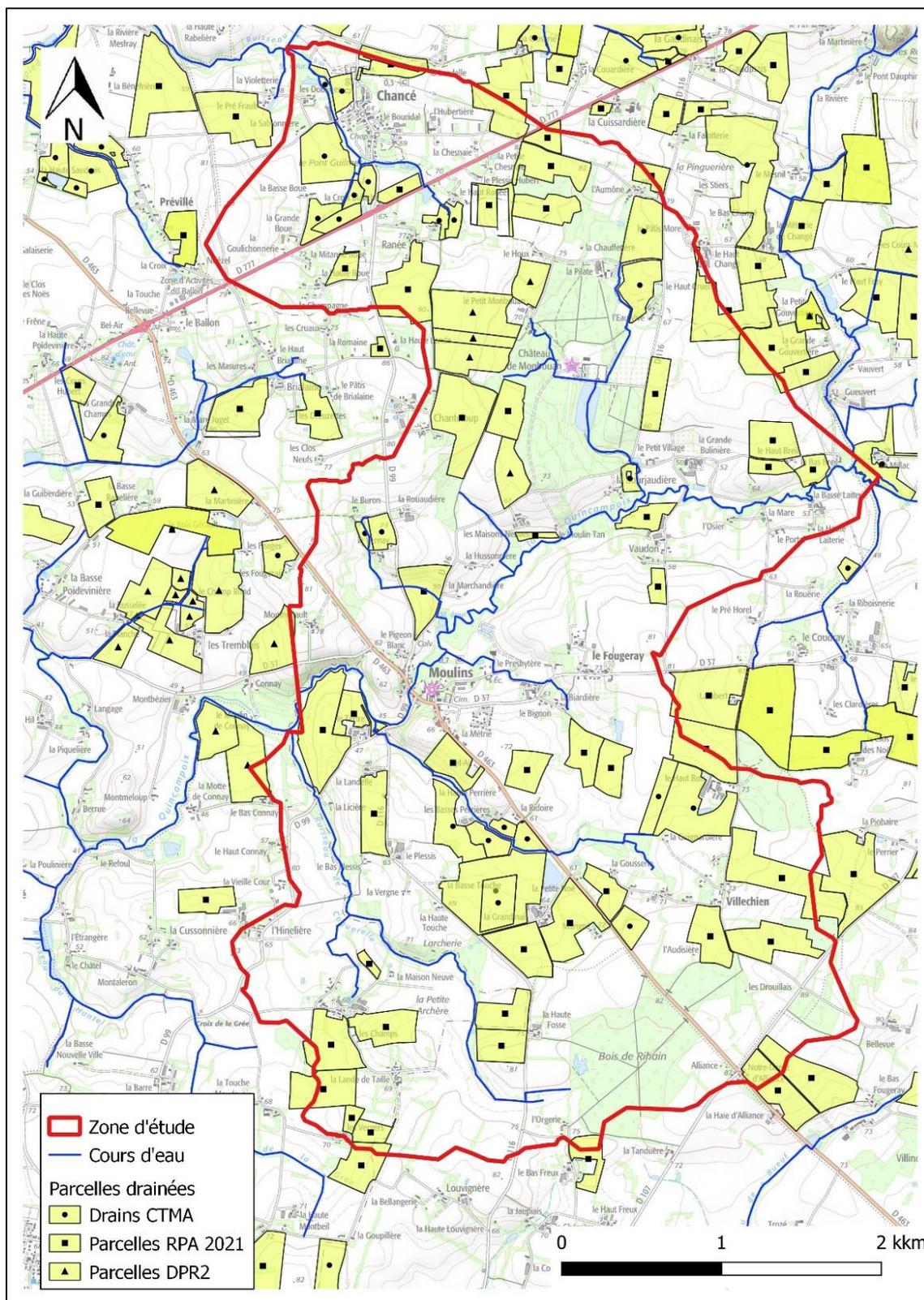


Illustration 83 : Localisation des parcelles drainées sur le territoire d'étude (source : EPTB Vilaine, d'après photographies aériennes, données CTMA, RPA 2021 et DPR2)

ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de restauration des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche (Moulins)

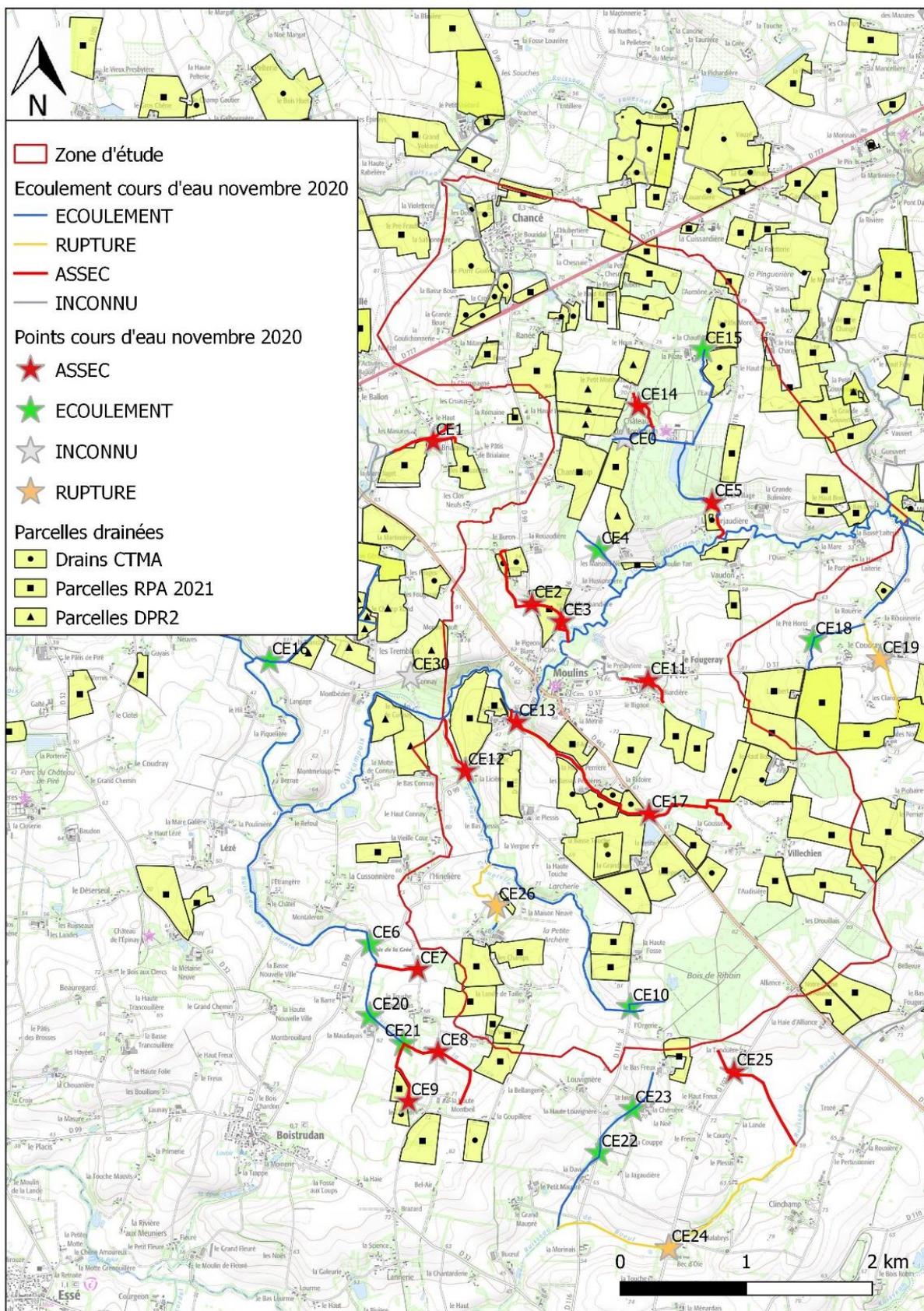


Illustration 84 : Parcelles drainées et écoulements constatés dans les cours d'eau en novembre 2020

ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de restauration des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche (Moulins)

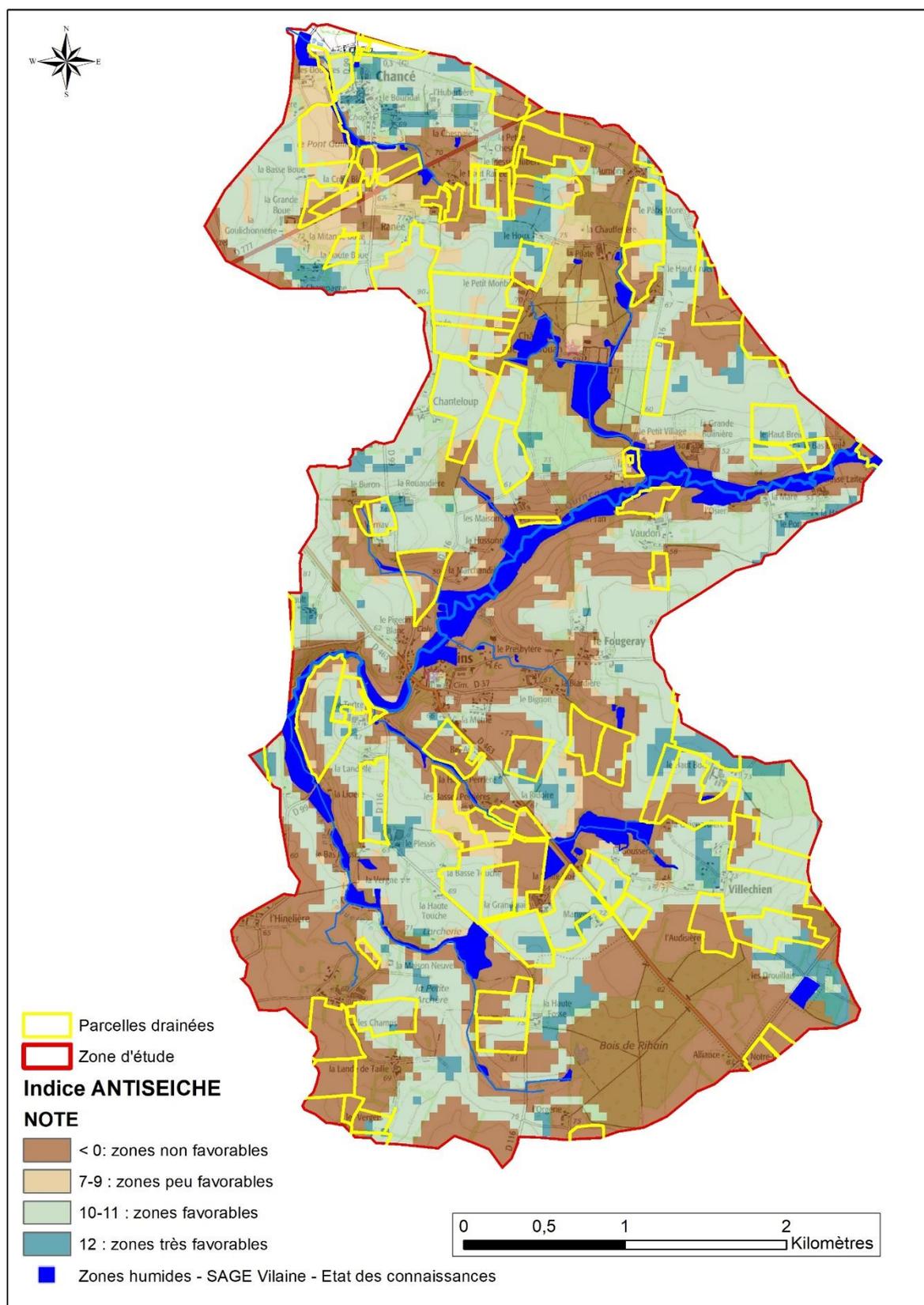


Illustration 85 : Superposition de la cartographie de l'indice ANTISEICHE, des zones humides et des parcelles drainées

3.5. SUIVIS A METTRE EN PLACE

Afin de vérifier l'efficacité des actions qui seront entreprises (retrait des drains agricoles notamment) sur le niveau des eaux souterraines dans un premier temps (amélioration de l'infiltration de l'eau de pluie dans le sol et le sous-sol, et donc vers la nappe) et des cours d'eau dans un second temps, des suivis spécifiques, inexistant à l'heure actuelle, devront être mis en place.

Des suivis de débits des cours d'eau en tête de bassin versant, au plus proche des actions qui seront mises en place, devront être réalisés afin de constater l'effet de ces actions sur le débit des cours d'eau. Ces suivis devront être mis en place avant réalisation des actions agricoles (retrait des drains), afin de disposer d'un état zéro et poursuivis pendant plusieurs années. L'implantation d'une station hydrométrique sur la Quincampoix pourrait également être envisagée.

Afin de vérifier l'effet bénéfique de ces actions sur les nappes, le suivi piézométrique devra être pérennisé sur les 3 points équipés lors de cette étude, notamment dans l'optique de suivre l'effet sur les eaux souterraines lié à la suppression de drains et l'amélioration de la recharge. Une acquisition de sondes automatiques de suivi du niveau piézométrique devra être envisagée par l'EPTB Vilaine. Si d'autres puits ou forages sans pompage régulier sont recensés à proximité des actions mises en place, ils pourront également faire l'objet d'un suivi piézométrique. Un suivi sur plusieurs années sera nécessaire.

Il peut enfin être envisagé de réaliser et d'équiper un piézomètre de suivi spécifique sur le secteur, à définir en fonction de la localisation des actions qui seront menées, afin de suivre en continu le niveau de la nappe.

3.6. METHODOLOGIE SIMPLIFIEE REPRODUCTIBLE SUR D'AUTRES TERRITOIRES

Afin de pouvoir décliner cette étude dans d'autres territoires sur l'EPTB Vilaine (et éventuellement sur d'autres bassins versants situés dans le socle), une méthodologie opérationnelle a pu être proposée dans le cadre de la présente étude. L'objectif est de déterminer les secteurs propices à l'augmentation de la quantité d'eau infiltrée, par le retrait des drains.

Les données à acquérir sur les bassins versants sont les suivantes (avec précision du caractère indispensable ou facultatif de chacune) :

ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de restauration des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche (Moulins)

		DONNEES	INTERET
Acquisition de terrain	Hydrogéologie	Mesures piézométriques hautes eaux	Indispensable
		Mesures piézométriques basses eaux	Fortement recommandées pour vérifier cohérence piézométrie hautes eaux et ajouter points de contrôle
		Analyses qualité eau souterraine	Utile pour connaissance du territoire et lien eau de surface/eau souterraine
	Hydrologie	Evaluation écoulement cours d'eau hautes eaux	Utile si présence d'assec même en hautes eaux
		Evaluation écoulement cours d'eau basses eaux	Indispensable
		Campagnes jaugeages micromoulinet	Utile pour vérifier cohérence des débits d'amont en aval, présence de pertes, plus forte contribution de certains secteurs, ...
		Analyses qualité eau de surface	Utile pour connaissance du territoire et lien eau de surface/eau souterraine
	Géologie	Cartographie des altérites	Indispensable
		Relevé des directions de fracturation	Utile
Analyses de sol avec argilosité		Fortement recommandées pour préciser la cartographie des formations superficielles	
Autres données	Argilosité	RPA (présence de cailloux), radiométrie spectrale gamma, coupes de forage, ...	Fortement recommandées
	Prélèvements	Inventaire prélèvements eau (eau de surface et eau souterraine)	Utile pour évaluer la pression de prélèvements
Analyse multicritère	Piézométrie	Carte piézométrique hautes eaux	Indispensable
		Carte piézométrique basses eaux	Utile
		Épaisseur de la zone non saturée hautes eaux	Indispensable
		Épaisseur de la zone non saturée basses eaux	Utile
	Géologie	Altérites / argilosité	Indispensable
Topographie	Pente	Indispensable	

Illustration 86 : Données à acquérir pour reproduire le même type d'étude sur d'autres bassins versants

Les données acquises permettront de réaliser les cartographies nécessaires pour effectuer l'analyse multicritère sur SIG selon les 3 paramètres retenus : nature des formations géologiques (et présence d'argile), pente des terrains, épaisseur de la zone non saturée (Illustration 80), avec utilisation des notes attribuées dans le cadre de cette étude (Illustration 81).

Comme précisé précédemment, compte tenu des informations utilisées et de leurs échelles de validité, une telle cartographie ne pourra pas être utilisée à une échelle inférieure au 1/10 000.

L'échelle de travail la plus pertinente est celle du bassin versant. Il serait intéressant d'appliquer cette méthodologie sur un bassin versant instrumenté (suivi du débit de la rivière et suivi piézométrique existants) afin d'évaluer l'efficacité des actions mises en œuvre.

4. Conclusion

Le projet « ANTISEICHE » a été menée en partenariat entre l'EPTB Vilaine (ex-Syndicat du bassin versant de la Seiche au lancement de l'étude en 2020) et le BRGM, afin de disposer d'une cartographie pouvant servir de base pour définir des secteurs où, dans le cadre de la restauration actuelle des milieux aquatiques, des actions spécifiques pourraient être entreprises, notamment le retrait de drains agricoles.

Le secteur situé autour de la commune de Moulins (dans le département de l'Ille-et-Vilaine) est apparu comme une zone prioritaire pour l'EPTB Vilaine et de dimension raisonnable (19 km²) pour engager ces réflexions. Ce secteur est traversé d'est en ouest par la Quincampoix, affluent de la Seiche.

L'objectif est d'améliorer les infiltrations d'eau de pluie vers l'eau souterraine dans certains secteurs sans toutefois limiter les possibilités d'exploitation agricole, afin d'améliorer la contribution des eaux souterraines à l'étiage des cours d'eau du secteur (la Quincampoix et ses affluents).

Plusieurs investigations de terrain ont été réalisées sur le secteur de 19 km² retenu : caractérisation des formations géologiques superficielles (altérites, argilosité), évaluation des écoulements superficiels, campagnes piézométriques hautes et basses eaux et analyses d'eau de surface et d'eau souterraine (paramètres *in situ* et spectrophotométrie).

Grâce aux données acquises, une analyse multicritère a ensuite été réalisée à partir de 3 paramètres (épaisseur de la zone non saturée, pente des terrains et formations géologiques) et a ainsi permis de définir des secteurs les plus favorables à l'infiltration d'eau de pluie et au retrait de drains.

Les données récoltées ont été croisées afin de réaliser quatre cartes sur le secteur d'étude :

- une carte géologique de détail (formations superficielles et caractérisation des zones argileuses) à l'échelle 1/10 000,
- deux cartes piézométriques (hautes et basses eaux) à l'échelle 1/25 000,
- une carte interprétative des secteurs favorables à l'infiltration (« indice ANTISEICHE »), réalisée grâce à une analyse multicritère simplifiée à partir de 3 paramètres (épaisseur de la zone non saturée, pente des terrains et formations géologiques).

Compte tenu des informations utilisées et de leurs échelles de validité, une telle cartographie doit être considérée comme indicative. En particulier, elle ne doit pas être utilisée à une échelle inférieure au 1/10 000.

Ces cartes pourront être confrontées aux données de l'EPTB Vilaine sur la dégradation des têtes de bassins versants pour envisager un programme de reconquête. La carte de l'indice ANTISEICHE, ayant permis de définir les secteurs les plus favorables à l'infiltration, pourra notamment servir d'aide à la décision pour le choix des secteurs prioritaires sur lesquels le retrait de drains pourrait être envisagé. Le gain sur le débit de la rivière n'a pas été quantifié dans le cadre de cette étude.

Le projet ANTISEICHE a permis de définir les données essentielles à acquérir pour pouvoir décliner cette étude dans d'autres secteurs bassins versants situés dans le socle. Un suivi des actions qui seront mises en place sera nécessaire afin d'évaluer le bénéfice de ces actions sur les eaux souterraines et le débit des cours d'eau.

Il serait intéressant d'appliquer cette méthodologie sur un bassin versant instrumenté (suivi du débit de la rivière et suivi piézométrique existants) afin d'évaluer l'efficacité des actions mises en œuvre.

5. Bibliographie

BAULT V., BOURGINE B., LOISELET C., ANQUETIL E. (2015) - Cartes piézométriques basses eaux 2013 et hautes eaux 2014 des nappes du Lutétien et de l'Yprésien supérieur dans le Bassin Parisien. Rapport BRGM/RP-64887-FR, 119 p., 1 ann., 1 CD, 8 cartes

CONIL P., PLAT E., (2015) – Aptitude des sols à l'infiltration sur le territoire de Nantes Métropole. Rapport BRGM/RP-65025-FR, 63 p., 32 ill., 2 ann.

LUCASSOU F. et BAULT V. (2021) avec la collaboration de KOCH F., LEJARS C., RIDEL L., BECQUET C., MATHIEU J., DE CATHELINEAU T., POULAIN M. – PIEZOBREST : Cartographie du niveau des nappes superficielles sur le territoire de Brest Métropole. Rapport final BRGM/RP-71268-FR, 53 p., 44 ill., 2 ann.

MOUGIN B. ; ALLIER D. ; BLANCHIN R. ; CARN A. ; COURTOIS N. ; GATEAU C. ; PUTOT E. ; JEGOU J. P. ; LACHASSAGNE P. ; STOLLSTEINER P. ; WYNS R. (2008a) - SILURES Bretagne (Système d'Information pour la Localisation et l'Utilisation des Ressources en Eaux Souterraines) - Rapport final - Année 5. BRGM/RP-56457-FR, 130 p., 2 pht., 1 CD

B. MOUGIN, J-M. BALTASSAT, R. BLANCHIN, E. PUTOT, J-M. SCHROETTER et R. WYNS (2008b) - SILURES Bassin versant Ille-et-Vilaine - Bassin du Nançon - Rapport final - Année 2 - BRGM/RP-56318-FR - 82 p., 29 ill., 3 ann. dont 14 planches (vol. séparé)

PERREY C. (1981a). Historique du drainage. In : Concaret J., dir. Le drainage agricole. Théorie et pratique. Chambre d'Agriculture de Bourgogne : 5-12.

PERREY C. (1981b). Techniques culturales en sol drainé. In : Concaret J., dir., Le drainage agricole. Théorie et pratique. Chambre d'Agriculture de Bourgogne : 372-386.

PINSON S., BAULT V. (2019a) – Profondeur des entités Hydrogéologiques et évaluation des contraintes à l'infiltration des Eaux pluviales urbaines sur le territoire de Rennes Métropole Projet PHOEBUS. Rapport final BRGM/RP-68599-FR, 74., 45 ill., 3 ann.

PINSON S., TILLIER L., BOURGINE B., SEDAN-MIEGEMOLLE O., LAURENCELLE M. (2019b) - Développement de méthodes permettant l'identification de la sensibilité des cours d'eau et la variation des emprises des zones humides liées aux prélèvements dans les eaux souterraines sur le bassin Loire-Bretagne. Rapport final BRGM/RP-69287-FR, 219 p., 7 ann.

SCHROËTTER, J.-M. ; BOISSON, A. ; LUCASSOU, F. ; BADER, A.-G. ; BECCALETTO, L. ; OUERGI, Y. ; TOURLIERE, B. (2020) - ANAFORE : ANalyse multicritère des données de FORages les plus productifs de bretagne - Rapport final. BRGM/RP-70280-FR, 156 p., 2 ann.

TRAUTMANN F., CLÉMENT J.P. (1997) – Carte géol. France (1/50 000), feuille La Guerche-de-Bretagne (354). Orléans : BRGM. Notice explicative par F. Trautmann, A. Carn (1997), 65 p.

VINCENT, B. (2020). Principes techniques et chiffres du drainage agricole. De la tuyautique à l'hydro-diplomatie. Sciences Eaux & Territoires, 32, 8-15. <https://doi.org/10.3917/set.032.0008>.

WYNS, R. (1998) - Ressources en eau de la Margeride ouest - PRD 324 - Modélisation de la géométrie (altitude, épaisseur) des arènes granitiques du bassin-versant lozérien de la Truyère (Lozère, Massif Central). Rapport BRGM R 40191, 18 p., 9 fig., 4 pl. hors-texte.

WYNS, R., BALTASSAT J.M., LACHASSAGNE P., LEGCHENKO A., VAIRON J., (2004) - Application of proton magnetic resonance soundings for groundwater reserve mapping in weathered basement rocks (Brittany, France), Bulletin de la Société Géologique de France, t. 175, n°1, pp. 21-34.

Guides et notices

GRAIE (2009, révisé en 2014) - Guide pour la prise en compte des eaux pluviales dans les documents de planification et d'urbanisme

ROUX G., GOUTALAND D., WINIARSKI T. (2015) - Les ouvrages d'infiltration et la fonction filtration - recommandations à l'usage des gestionnaires - GESSOL-FAFF

Annexe 1

Fiche de terrain et exemple de résultats

Fiche de terrain

Fiche Point d'eau			
Indice BSS			Date et heure
X WGS84			ProfondeurEau
Y WGS84			h (hauteur repère)
Z SOL			Pt (profondeur totale)
			Diametre ouvrage
Commune			
Adresse/Lieu dit			
Dpt			
Propriétaire			
Exploitant			

ANTISEICHE : Apport des eaux souterraines pour les actions de reTauration des milieux aquatiques du bassin versant de la Seiche (Moulins)

Exemple de fichier « Résultats »

Type	Code BSS	Commune	Lieu-dit	Propriétaire	Nature	Usage	Profondeur	Nature repere	Pompage	Campagne3	Mesure_BE	Niv Piez3 (cm)	Zeau3 (m NGF)	KEEP_BE	SEC_BE	Campagne4	Niv Piez4 (cm)	Hauteur repere_4 (cm)	Zeau4 (m NGF)	KEEP_HE	SEC_HE	X_LB93	Y_LB93	ALTZ
mesure	BSS004CXQM	Chancé	L'AUMONE	POULAIN	Puits	domestique	9	Dalle	oui	05/11/2020	1	510.0	-5.10	1		30/03/2021	139.000	0.000	-1.390	1		375319.849	6779193.803	77.031
mesure	BSS004CXQN	Chancé	LA CHAUFFETIERE	COUAPEL	Puits	domestique	6	Margelle	oui	04/11/2020	1	330.0	-2.57	1		31/03/2021	340.000	73.000	-2.670	1		375017.608	6778733.401	71.707
mesure	BSS004CXRL	Piré-sur-Seiche	CONNAY	DE LA LANDE	Puits		6	Margelle	non	03/11/2020	1	167.0	-1.14	1		31/03/2021	160.000	53.000	-1.070	1		372938.687	6776026.281	43.206
mesure	BSS004CXRN	Piré-sur-Seiche	LES TREMBLAIS	BELIN	Puits	jardin	14	Margelle	non	04/11/2020	1	728.0	-6.78	1		01/04/2021	277.000	50.000	-2.270	1		372621.644	6776328.961	56.304
mesure	BSS004CXRM	Piré-sur-Seiche	LES TREMBLAIS	BELIN	Forage		50	Margelle	oui	04/11/2020	1	692.0	-6.82	1		01/04/2021	466.000	10.000	-4.560	1		372660.088	6776268.114	55.462
mesure	BSS004CXRP	Piré-sur-Seiche	2 LES TREMBLAIS	MONNIER	Puits	domestique	7	Dalle	oui	04/11/2020	1	527.0	-5.27	1		01/04/2021	200.000	0.000	-2.000	1		372827.845	6776365.591	55.767
mesure	BSS004CXPY	Boistrudan	BAS CONAY	AUBREE	Puits		10	Dalle	non	03/11/2020	1	613.0	-6.13	1		31/03/2021	251.000	0.000	-2.510	1		373024.804	6775320.061	47.754
mesure	BSS004CXPZ	Boistrudan	LA MOTTE DE CONAIS	GUAIS	Puits	élevage	4	Margelle	oui	06/11/2020	1	140.0	-0.83	1		31/03/2021	102.000	57.000	-0.450	1		372588.772	6775288.704	42.014
mesure	BSS000ZPVN	Moulins	LES PERIERES	EARL LES PERIERES	Forage	agriculture	25	Margelle	oui	05/11/2020	1	810.0	-7.63	1		31/03/2021	570.000	47.000	-5.230	1		374420.232	6775237.184	55.678
mesure	BSS004CXQR	Moulins	BEL-AIR	PRISER	Puits	domestique	9	Margelle	en projet	06/11/2020	1	260.0	-2.32	1		31/03/2021	239.000	28.000	-2.110	1		374354.822	6775566.063	68.461
mesure	BSS004CXQS	Moulins	LE PLESSIS	MELOT	Puits		10	Margelle	non	05/11/2020	1	131.0	-0.90	1		31/03/2021	122.000	41.000	-0.810	1		373886.842	6774938.545	62.431
mesure	BSS004CXQT	Moulins	LE PLESSIS	MELOT	Puits	agriculture	9	Margelle	oui	05/11/2020	1	780.0	-7.27	1		31/03/2021	298.000	53.000	-2.450	1		374195.081	6774968.851	57.891
mesure	BSS000ZPXL	Marcellé-Robert	1 LE BAS FREUX	EARL BOUCAUD-DESILLE	Forage	élevage	120	Margelle	oui	06/11/2020	1	1990.0	-19.43	0		31/03/2021	798.000	47.000	-7.510	1		374949.189	6773084.226	75.196
mesure	BSS004CXQU	Moulins	LA PETITE NOE	SIMON	Puits	jardin	8	Margelle	oui	05/11/2020	1	310.0	-2.43	1		31/03/2021	175.000	67.000	-1.080	1		375016.857	6774821.818	61.554
mesure	BSS004CXQV	Moulins	3 VILLECHEN	EARL MORLIER	Puits	élevage	7	Dalle	non	05/11/2020	1	223.0	-2.23	1		31/03/2021	171.000	0.000	-1.710	1		375521.485	6774741.315	69.309
mesure	BSS000ZQAF	Moulins	3 VILLECHEN	EARL MORLIER	Forage	élevage	40	Margelle	oui	05/11/2020	1	717.0	-6.84	1		31/03/2021	414.000	33.000	-3.810	1		375530.429	6774796.407	68.368
mesure	BSS004CXQW	Moulins	LA GOUSSERIE	CHALOT	Puits		14	Margelle	non	05/11/2020	1	820.0	-7.94	1		31/03/2021	619.000	26.000	-5.930	1		375227.418	6774837.299	67.31
mesure	BSS004CXQX	Moulins	7 VILLE CHIEN	PELTIER	Puits		7	Margelle	non			0				31/03/2021	484.000	45.000	68.308	1		375702.335	6774728.095	73.598
mesure	BSS004CXQA	Boistrudan	MONBEIL	RENAULT	Puits	jardin	7	Margelle	oui	06/11/2020	1	130.0	-1.55	1		31/03/2021	90.000	-25.000	-1.150	1		373461.576	6774049.231	60.555
mesure	BSS004CXQB	Boistrudan	LA LANDE DE TAILLE	DUBOULAY	Puits		14	Margelle	non	06/11/2020	1	140.0	-0.88	1		31/03/2021	112.000	52.000	-0.600	1		373888.349	6773629.057	68.28
mesure	BSS004CXRQ	Piré-sur-Seiche	LE FOUGERAIS	TEXIER	Puits	jardin	7	Margelle	oui	03/11/2020	1	256.0	-2.19	1		31/03/2021	256.000	37.000	-2.190	1		373214.33	6776776.908	80.52
mesure	BSS004CXQY	Moulins	CHANTELOUP	SANGUERET	Puits	jardin	17	Dalle	oui	04/11/2020	1	655.0	-6.55	1		31/03/2021	405.000	0.000	-4.050	1		374035.304	6777613.259	83.64
mesure	BSS004CXQZ	Moulins	LE BURON	RENEAUME	Puits	jardin	8	Dalle	oui	04/11/2020	1	271.0	-2.71	1		01/04/2021	77.000	0.000	-0.770	1		373655.171	6777132.269	71.56
mesure	BSS004CXQC	Boistrudan	LA MAUDAYAIS	SCEA DE LA MAUDAYAIS	Forage	élevage	60	Dalle	oui	05/11/2020	1	1035.0	-10.13	1		31/03/2021	790.000	22.000	-7.680	0		372693.847	6773236.559	62.093
mesure	BSS004CXQD	Boistrudan	LA CUSSINNIERE	POINIER	Puits	jardin	10	Dalle	oui	03/11/2020	1	743.0	-7.36	1		30/03/2021	208.000	7.000	-2.010	1		372337.373	6774500.174	61.703
mesure	BSS004CXRE	Moulins	9 LE FOUGERAY	EARL DU FOUGERAY	Forage	élevage	100	Margelle	oui	05/11/2020	1	1000.0	-9.66	1		31/03/2021	402.000	34.000	-3.680	1		375022.109	6776361.756	72.868
mesure	BSS004CXRA	Moulins	19 LE FOUGERAY	HAIGRON	Puits	domestique	10	Margelle	oui	05/11/2020	1	265.0	-2.47	1		01/04/2021	297.000	18.000	-2.790	1		375109.574	6776151.439	72.959
mesure	BSS004CXRB	Moulins	LA MARE DES ROCHES	CORNE	Puits	domestique	10	Dalle	oui	03/11/2020	1	255.0	-2.55	1		01/04/2021	200.000	0.000	-2.000	1		376045.159	6776196.5	63.013
mesure	BSS004CXQP	Chancé	22 LE HAUT BRILAINE	BATON	Puits	domestique	10	Margelle	non	03/11/2020	1	639.0	-5.81	1		31/03/2021	290.000	58.000	-2.320	1		372973.853	6778289.82	77.578
mesure	BSS000ZPXY	Marcellé-Robert	LOUVIGNERE	MOREL	Forage	domestique	50	Haut tubage	oui	03/11/2020	1	940.0	-9.40	1		31/03/2021	682.000	32.000	-6.500	1		374165.007	6772752.099	77.769
mesure	BSS004CXRC	Moulins	LE FOUGERAY	MELOT	Forage		30	Dalle	oui	03/11/2020	1	490.0	-4.90	1		01/04/2021	320.000	0.000	-3.200	1		374920.172	6776159.32	65.246
mesure	BSS004CXRD	Moulins	LE HAUT BOIS	POULAIN	Forage	élevage	50	Dalle	oui	03/11/2020	1	1908.0	-19.08	0		01/04/2021	761.000	0.000	-7.610	1		375853.041	6775399.298	70.806
mesure	BSS004CXQE	Boistrudan	LA VIEILLE COUR	MALECOT	Puits	jardin	13	Margelle	oui	06/11/2020	1	620.0	-5.58	1		31/03/2021	251.000	62.000	-1.890	1		373189.126	6774793.424	60.527
mesure	BSS004CXRE	Moulins	CHATEAU DE MONBOUAN	MILLE	Puits		10	Margelle	non	04/11/2020	1	227.0	-1.54	1		31/03/2021	203.000	73.000	-1.300	1		374708.019	6778315.773	66.93
mesure	BSS000ZPVS	Moulins	CHATEAU DE MONBOUAN	MILLE	Puits		8	Dalle	non	04/11/2020	1	340.0	-3.40	1		31/03/2021	150.000	0.000	-1.500	1		375470.838	6778407.956	65.35
mesure	BSS004CXRF	Moulins	CHATEAU DE MONBOUAN	MILLE	Forage		10	Dalle	non	04/11/2020	1	340.0	-3.40	1		31/03/2021	150.000	0.000	-1.500	1		375469.615	6778409.844	65.316
mesure	BSS004CXQF	Boistrudan	JAUPIAIS	GEOFFRAY	Puits	domestique	10	Margelle	oui	06/11/2020	1	240.0	-1.88	1		31/03/2021	185.000	52.000	-1.330	1		374718.449	6772675.907	67.691
mesure	BSS004CXQG	Boistrudan	LES CHAMPS	GOBARD	Puits		7	Margelle	Non		0					31/03/2021	354.000	28.000	59.550	1		373630.35	6773830.753	63.37
mesure	BSS004CXRK	Piré-sur-Seiche	CONNAY	DE LA LANDE	Puits			Dalle	non		0					31/03/2021	89.000		43.551	1		372902.866	6776038.06	44.441
mesure	BSS004CXQH	Boistrudan	BAS CONAY	AUBREE	Puits		12	Dalle	oui	03/11/2020	1	815.0	-8.15	1						0		372999	6775325	47.70
mesure	BSS004CXRG	Moulins	LE BAS PLESSIS		Puits		7	Margelle	oui		0									0		373689	6774941	60.29
mesure	BSS004CXQJ	Boistrudan	MONBEIL	BUFFET	Puits		9	Dalle	non		0									0		373516.76	6773964.68	60.00
mesure	BSS004CXRR	Piré-sur-Seiche	LA MARTINIERE	BOUSQUET	Puits		6	Margelle	oui	04/11/2020	1	150.0	-1.27	1						0		373005.1	6777200.2	72.90
mesure	BSS004CXQK	Boistrudan	LE BOIS CHARDON	SCEA DE LA MAUDAYAIS	Forage	élevage	80	Margelle	oui	05/11/2020	1	905.0	-8.85	1		31/03/2021	1700.000		-17.000	0		371753	6772805	74.30
mesure	BSS004CXQL	Chancé	LA GRANDE BOUE	CROYAL	Puits	élevage	6	Dalle	oui	04/11/2020	1	427.0	-4.27	1						0		373216.0	6778864.7	70.50
mesure	BSS004CXQL	Boistrudan	CHENOT	RICHARD	Puits		11	Margelle	non	03/11/2020	1	154.0	-1.02	1						0		373182.807	6772613.169	72.59
mesure	BSS000ZYOK	Moulins	LA BOURGEAUDIÈRE	JOUANOLLE	Forage		60	Margelle Haut tubage	oui	03/11/2020	1	696.0	-6.77	1		01/04/2021	680.000	19.000	-6.610	1		375223	6777314	54.70
mesure	BSS004CXRH	Moulins	LA BOURGEAUDIÈRE	JOUANOLLE	Puits	agriculture	2.5	Margelle	oui	03/11/2020	1	146.0	-0.50	1		01/04/2021	124.000	96.000	-0.280	1		375329	6777440	50.20

Annexe 2

Géostatistique et interpolation par la géostatistique

➤ DEFINITION

La géostatistique est une discipline dont l'objectif est l'étude des phénomènes « régionalisés », c'est-à-dire présentant une certaine « structure » dans l'espace (x,y,z) ou dans le temps. Par « structure » on entend la corrélation spatiale d'une variable entre deux points de mesure à l'intérieur d'une zone d'étude ou au même point en deux instants différents. Ainsi la cote piézométrique en un point A d'un aquifère est en général peu différente de la cote piézométrique en un point B très proche (au même instant) : les deux cotes piézométriques sont très « corrélées ». On comprend aisément que cette corrélation diminue lorsque la distance entre les points A et B augmente. A la limite, on conçoit qu'il y ait des cas où ces cotes piézométriques soient indépendantes l'une de l'autre lorsque les points sont suffisamment éloignés.

La cote piézométrique ou encore les formations lithologiques présentent un comportement global que l'on pourrait modéliser par une approche déterministe, néanmoins elles présentent aussi des variations et des irrégularités locales qui échappent à toute représentation fonctionnelle simple et qu'il est plus rigoureux de modéliser par une approche probabiliste.

La géostatistique est une théorie et une méthodologie, fondée sur l'analyse statistique des corrélations spatiales, pour étudier les variables dites régionalisées c'est à dire dont l'évolution dans l'espace (et/ou le temps) présente un caractère à la fois aléatoire et structuré.

Deux raisons majeures justifient la mise en œuvre d'une approche géostatistique :

- Elle permet de caractériser la variabilité spatiale du phénomène que l'on étudie, à savoir le comportement des formations retenues. L'outil utilisé est le **variogramme** qui synthétise la structure de la variable. Pour une direction donnée, il indique comment varie l'écart des valeurs prises en 2 points X et X+h en fonction de la distance h. Il renseigne sur les anisotropies éventuelles et sur le degré de régularité de la variable.
- Elle permet de résoudre le problème de l'interpolation optimale, c'est à dire de l'estimation optimale d'une valeur $Z(x_0)$ inconnue à partir des informations disponibles. L'interpolateur utilisé est le **krigeage**, seule technique qui fournit simultanément la valeur estimée et l'erreur associée caractérisée par l'écart-type de krigeage.

➤ LE VARIOGRAMME

Dans un phénomène naturel comme la topographie ou la cote piézométrique, les cotes mesurées en différents points, bien que variables d'un point à l'autre, ne sont pas indépendantes de leur localisation. La différence de cote Z entre deux points « x » et « x + h » est d'autant plus faible que la distance h qui les sépare est petite. D'un point de vue statistique, il y a une corrélation spatiale entre les données. Cette corrélation est d'autant plus forte que les points expérimentaux sont rapprochés et que le phénomène est continu et régulier. Pour quantifier le degré de corrélation spatiale, ou plutôt la détérioration de cette corrélation avec la distance, la géostatistique fait appel à la fonction variogramme $\gamma(h)$. Cette fonction donne, en fonction de la distance h qui sépare deux points, la valeur moyenne de $1/2[Z(x+h)-Z(x)]^2$.

La Figure 1 illustre ce calcul.

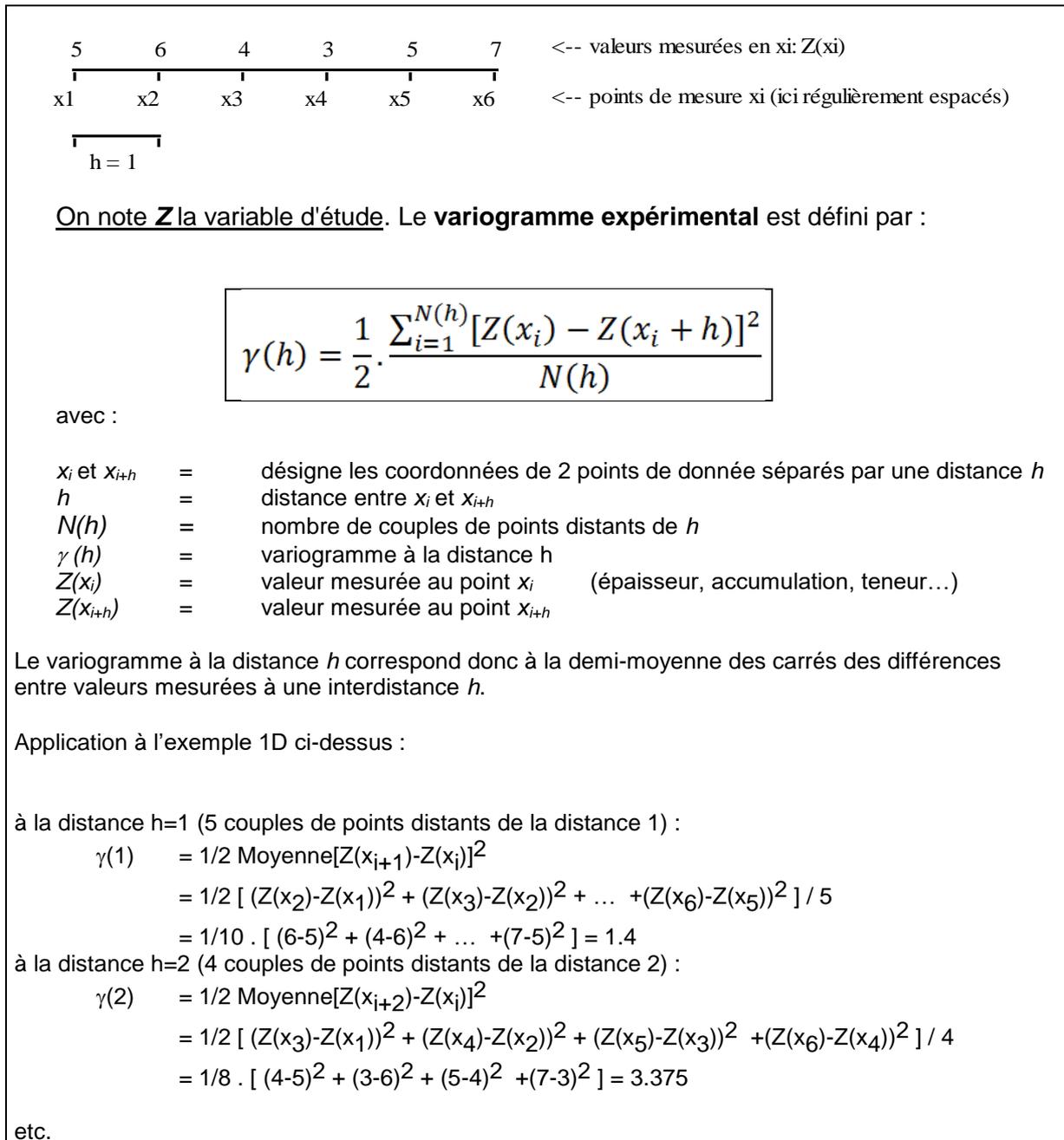


Figure 1 : Définition et exemple de calcul du variogramme expérimental

Interprétation du variogramme

Le variogramme est d'abord un outil d'analyse des phénomènes naturels. En effet, l'allure et le comportement du variogramme expérimental fournissent une image synthétique des principaux traits structuraux du phénomène étudié :

- **Continuité à l'origine.** En principe $Z(x)$ et $Z(x+h)$ sont égaux quand h tend vers 0. En pratique toutefois, ceci n'est pas toujours vérifié. En effet, il peut exister une discontinuité apparente à l'origine, qui peut être liée soit à une erreur de mesure, soit à des variations à « petites distances », en tout cas à des distances inférieures à la maille d'échantillonnage. Cette discontinuité à l'origine est appelée « effet de pépite ». Elle traduit la part de variabilité du

phénomène que l'on ne peut expliquer soit en raison de la maille d'échantillonnage, qui ne permet pas de mettre en évidence des variabilités locales, soit en raison d'erreurs de mesure. La Figure 2 (b) ci-dessous montre un exemple d'effet de pépite.

- **Continuité spatiale au-delà de l'origine**, traduite par les observations suivantes :
 - **portée** (distance de corrélation), phénomène stationnaire - Figure 2 (a) ci-dessous ; classiquement la valeur du variogramme est plus faible à l'origine : $Z(x)$ et $Z(x+h)$ sont voisins quand h est faible, donc la valeur du variogramme est faible et augmente quand la distance augmente. Au bout d'une certaine distance entre points de mesure, la différence entre $Z(x)$ et $Z(x+h)$ n'augmente plus statistiquement car les points ne sont plus corrélés. Cette distance limite est appelée portée (distance maximale jusqu'à laquelle des points peuvent être corrélés). A partir de cette distance, la valeur du variogramme se stabilise autour d'un palier,
 - **anisotropie** (comportement différent du phénomène suivant les directions de l'espace considérées),
 - **imbrication d'échelles de variabilité** (structures emboîtées avec plusieurs échelles de corrélation spatiale),
 - **absence de portée finie** - Figure 2 (b) ci-dessous, dérive ou tendance régionale, phénomène non stationnaire.

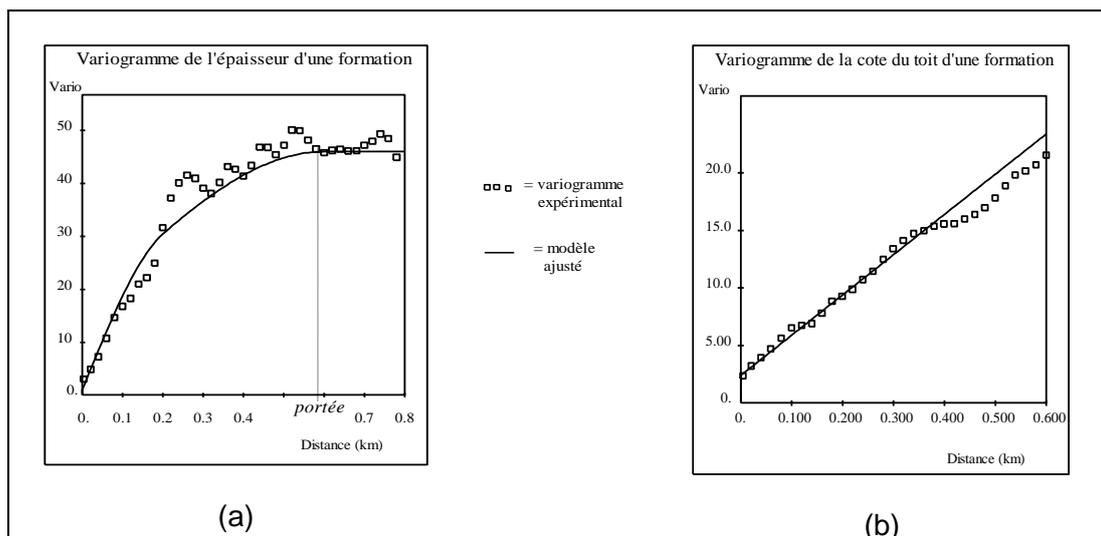


Figure 2 : Exemples types de variogrammes : (a) : variable stationnaire avec portée visible, (b) : variable non stationnaire, sans portée.

➤ LE KRIGEAGE

Le krigeage est la méthode d'interpolation spécifique à la géostatistique. Par rapport aux autres méthodes d'interpolation automatique, les algorithmes du krigeage reposent sur une interprétation du phénomène à travers l'étude variographique préalable.

Le krigeage présente un double intérêt :

- Il remplace le dessin par un calcul qui permet d'estimer en tout point la valeur la plus probable du paramètre étudié. Cette interpolation prend en compte :

- la densité et la répartition des données sur le domaine étudié,
 - la plus ou moins grande continuité spatiale modélisée par le variogramme,
 - les diverses erreurs de mesure et incertitudes associées aux données.
- Il quantifie l'incertitude qui entache toute valeur interpolée. Cette incertitude, qui est une mesure de la qualité locale de la carte obtenue, est essentielle dans tous les projets où les risques encourus doivent être connus, et minimisés le cas échéant par de nouvelles mesures.

Formalisme du krigeage « ordinaire »

Le krigeage est une méthode d'interpolation linéaire qui permet d'obtenir une estimation non biaisée et dont l'erreur d'estimation est minimale.

Le krigeage le plus utilisé est le « krigeage ordinaire ».

La variable d'étude est notée Z . La valeur interpolée au point x_0 , notée $Z^*(x_0)$, est alors :

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1,n} \lambda_i Z(x_i)$$

(avec la condition $\sum_{i=1,n} \lambda_i = 1$)

$Z^*(x_0)$ est donc une combinaison linéaire des données de base $Z(x_j)$ mesurées aux points x_j .

Les λ_j sont les poids respectifs (ou pondérateurs) attribués à chaque donnée $Z(x_j)$.

Ces poids sont calculés sous contrainte que leur somme soit égale à 1 (pour des conditions de non biais) et sous contrainte d'être en accord avec la structure spatiale mise en évidence par le variogramme, de façon à ce que l'erreur d'interpolation soit minimale. Lorsqu'on interpole la valeur en un point x , le poids attribué aux données environnantes sera d'autant plus fort que cette donnée est proche, tout en tenant compte de la densité de données, de leur disposition vis-à-vis des anisotropies...

Le système d'équation permettant d'obtenir les poids de krigeage est donné Figure 3.

$$\sum_{j=1,n} \lambda_j \gamma(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_i, x_0) \quad \forall i \text{ (n équations)}$$

$$\sum_{i=1,n} \lambda_i = 1$$

- n = nombre d'informations disponibles
 i, j = indices des points de mesure ; i et j varient de 1 à n
 x_i, x_j = points de mesure
 x_0 = point à estimer
 λ_i (ou λ_j) = pondérateur (ou poids) affecté à la valeur mesurée en x_i
 μ = paramètre de Lagrange
 $\gamma(x_i, x_j)$ = valeur du variogramme $\gamma(h)$ pour h =distance entre x_i et x_j
 $\gamma(x_i, x_0)$ = valeur du variogramme $\gamma(h)$ pour h =distance entre x_i et x_0 ,

Enfin la variance de l'erreur d'estimation, appelée **variance d'estimation** ou **variance de krigeage**, vaut :

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=1,n} \lambda_i \gamma(x_i, x_0) + \mu$$

Dans les expressions ci-dessus on voit que dans le krigeage interviennent :

- les positions des informations x_i par rapport au point à estimer x_0 , par le biais des valeurs de $\gamma(x_i, x_0)$;
- la répartition des informations entre elles, par le biais des valeurs de $\gamma(x_i, x_j)$;
- la fonction structurale variogramme γ .

Figure 3 : Equations du krigeage ordinaire

Le krigeage offre trois avantages principaux par rapport aux autres méthodes d'interpolation :

- il prend en compte la structure du phénomène, à travers le variogramme : il se base donc sur une fonction d'interpolation « objective », c'est-à-dire mesurée sur les données, et non « subjective » (choisie arbitrairement) ;
- il permet le calcul de l'erreur d'interpolation (ou plus précisément la variance de cette erreur) : c'est actuellement la seule méthode d'interpolation qui permet cela ;
- il permet d'intégrer des variables secondaires, corrélées à la variable d'étude, connues soit aux points de données, soit exhaustivement sur une grille. On peut ainsi prendre en compte le fait que la cote piézométrique est dans certains cas (nappes libres) corrélée à la cote topographique. Dans le cas où on utilise plusieurs variables corrélées, disponibles aux points de mesure, on parle de « co-krigeage ». Dans le cas où on utilise une variable connue de façon exhaustive, on utilise une technique appelée « krigeage avec dérive externe ».

Co-krigeage, krigeage « universel » et krigeage avec « dérive externe »

Les formules du krigeage ordinaire peuvent se généraliser au cas multivariable (prise en compte d'une ou plusieurs autres variables mesurées en quelques points), ainsi qu'au cas où on introduit une dérive liée à un polynôme dépendant des coordonnées (krigeage dit « universel ») ou d'une fonction corrélée connue en tout point de mesure ainsi que sur la grille à calculer (krigeage avec dérive externe).

Le but de ce document n'étant pas d'exposer en détails toute la théorie géostatistique, le lecteur est invité à se reporter à l'ouvrage de Chilès (1999, ré-édité en 2012), dans lequel ces méthodes sont exposées et illustrées.

Chilès, J.P., Delfiner, P. (1999). Geostatistics: Modelling Spatial Uncertainty, Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics, 695 p

➤ LA VALIDATION CROISEE

Le principe de la validation croisée est illustré en Figure 4.

La validation croisée permet de contrôler que le modèle géostatistique est pertinent et de détecter d'éventuelles singularités dans les données.

La validation croisée consiste, pour chaque point de donnée, à l'enlever temporairement et à ré-estimer sa valeur à partir des données voisines. On obtient alors au point qui a été enlevé :

- la valeur réelle $Z(x)$
- la valeur estimée (interpolée) à partir des points voisins : $Z^*(x)$
- l'écart-type d'estimation $\sigma_k(x)$ si on a utilisé un modèle géostatistique.

Ce processus est répété pour tous les points x où la variable est connue : on re-estime la valeur en ce point à partir des autres données en faisant comme s'il n'existait pas.

On peut alors calculer en tout point qui disposait d'une mesure :

- l'erreur d'estimation $Err(x) = Z^*(x) - Z(x)$, et dans le cas d'une estimation par modèle géostatistique :
- l'erreur réduite : $Ered(x) = \frac{Err(x)}{\sigma_k(x)}$

Les résultats de la validation croisée sont fournis sous forme de statistiques et de cartes :

- ✓ statistiques sur les erreurs et les erreurs réduites : moyennes, nuages de corrélation, histogrammes
- ✓ cartes des erreurs $Err(x)$ ou carte des erreurs réduites $Ered(x)$ faisant apparaître les points mal re-estimés
- ✓ nuages de corrélation ($Z^*(x)$; $Z(x)$)
- ✓ nuages de corrélation ($Z^*(x)$; $Err(x)$) ou ($Z^*(x)$; $Ered(x)$)

La variable $Ered(x)$, appelée « erreur réduite », se rapproche d'une distribution gaussienne de moyenne nulle et de variance 1.

En répétant la re-estimation de chaque donnée par les données voisines, on peut calculer l'histogramme de $Ered(x)$ et vérifier s'il se rapproche d'une loi gaussienne centrée normée.

Les points présentant une valeur de $Ered(x)$ s'éloignant du standard gaussien sont des points qui doivent être examinés car potentiellement liés à des erreurs (erreur de mesure, de localisation), ou à un comportement localement différent de la variable d'étude : il convient alors de vérifier et le cas échéant corriger la donnée de base. Lorsque la donnée est correcte et que le problème vient d'un mauvais calage du modèle géostatistique, ce modèle peut être amélioré ou recalculé localement.

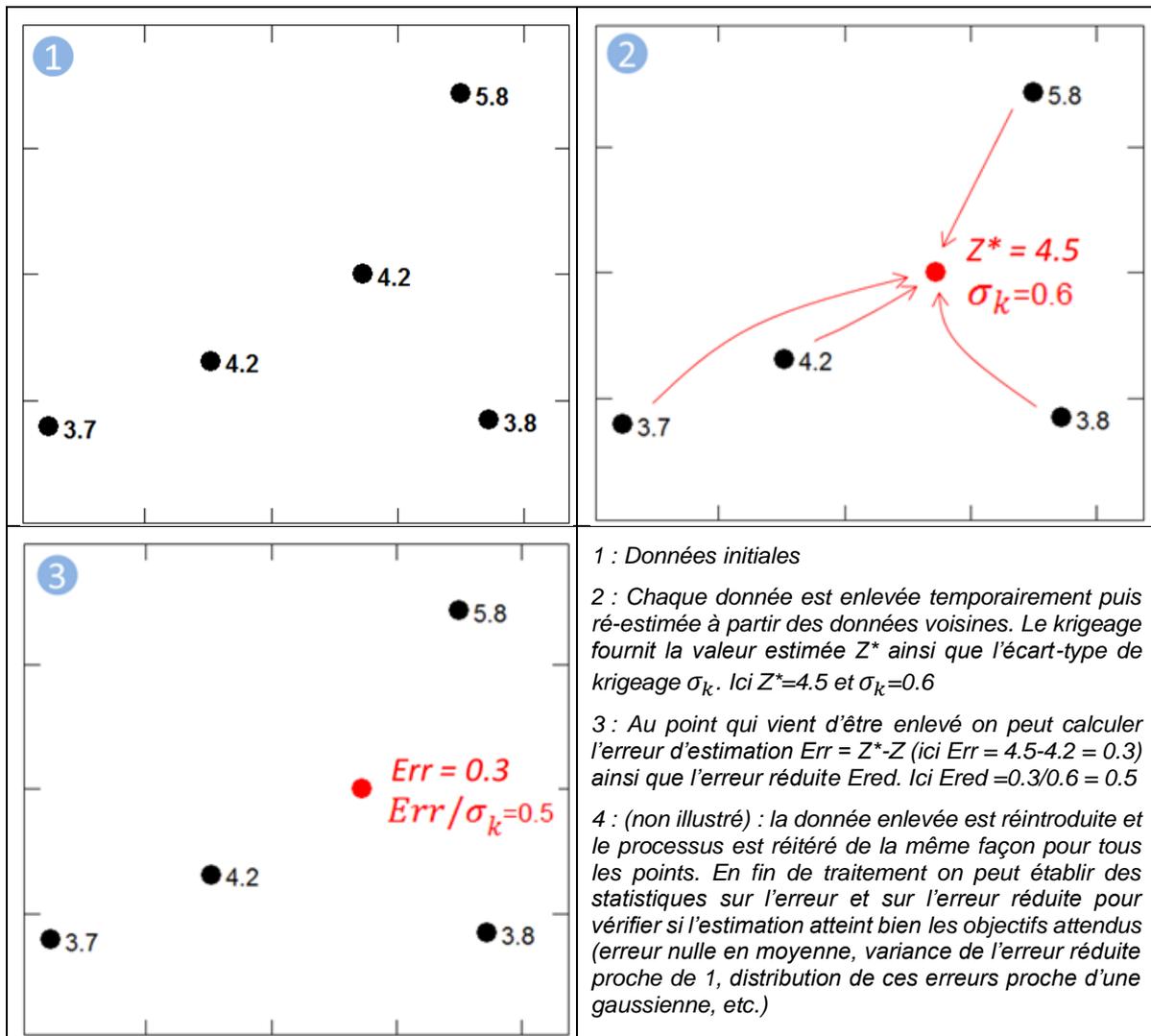


Figure 4 : Principe de la validation croisée

Annexe 3

Analyses réalisées sur les eaux de surface et les eaux souterraines en juillet 2020, novembre 2020 et mars 2021 (données EPTB Vilaine)



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Direction régionale Bretagne
2, rue de Jouanet
35700 – Rennes – France
Tél. : 02 99 84 26 70
www.brgm.fr