



HAL
open science

Projet LEARN: Impact de l'arasement des barrages sur les flux hyporhéiques et les échanges nappe rivière de la Sélune

Alain Crave, Mouhamadou Moustapha Ba, C. Roose-Amsaleg, Alexandre Boisson, Camille Bouchez, Olivier Bour, Elliott Chatton, Virginie Daburon, Thierry Labasque, Anniet M. Laverman, et al.

► To cite this version:

Alain Crave, Mouhamadou Moustapha Ba, C. Roose-Amsaleg, Alexandre Boisson, Camille Bouchez, et al.. Projet LEARN: Impact de l'arasement des barrages sur les flux hyporhéiques et les échanges nappe rivière de la Sélune. Rennes 1; BRGM; ARMINES. 2023. hal-04649382

HAL Id: hal-04649382

<https://hal.science/hal-04649382v1>

Submitted on 16 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



RAPPORT FINAL

Projet LEARN

Impact de l'arasement des barrages sur les flux hyporhéiques et les échanges nAppe Rivière de la SéluNe

Alain Crave, Moustapha Ba, Céline Amsaleg, Alexandre Boisson, Camille Bouchez, Olivier Bour, Eliot Chatton, Virginie Daburon, Thierry Labasque, Annet Laverman, Marc Olivier-Soulayrol, Agnès Rivière, Nataline Simon, Virginie Vergnaud, Joris Heyman

Décembre 2023



LEARN : Impact de l'arasement des barrages sur les flux hyporhéiques et les échanges nAppe Rivière de la Sélune

Coordinateur(s) : CRAVE Alain CNRS Géosciences Rennes

Participants :

Organisme	Nom prénom	Fonction	compétences
Géosciences Rennes	Alain CRAVE	CR CNRS	hydrogéomorphologue
	Joris HEYMAN	CR CNRS	Hydraulique/Physique
	Olivier BOUR	Prof. Univ. Rennes 1	Hydrogéologue
	Moustapha BA	Doctorant UR1 du 6/01 2020 au 31/03/2023	Hydrogéologue
	Nataline SIMON	CDD du 4/01 au 30/06 2021	Hydrogéologue
	Camille BOUCHEZ	CR CNRS	Hydrogéologue
	Thierry LABASQUE	IR CNRS	Chimie des eaux
	Eliot CHATTON	IR CNRS	Chimie des eaux
	Virginie VERGNAUD	Ingénieure UR1	Chimie des eaux
	Marc OLIVER- SOULAYROL	CDD Assistant Ingénieur 6/11/2021 - 30/01/2023	Instrumentation In-situ
ECOBIO	Anniet LAVERMAN	DR CNRS	Micro-Biologiste
	Céline AMSALEG	ing. d'Etude CNRS	Micro-Biologiste
	Virginie DABURON	Assistante Ing. CNRS	Micro-Biologiste
BRGM	Alexandre BOISSON	Ingénieur	Hydrogéologue
ARMINES	Agnès RIVIERE	Maître de conf.	Hydrogéologue

Dates de début et fin du projet : 06/01/ 2020 → 15/07/2023

Sommaire

1	Le projet de recherche	5
1.1	Contexte et objectifs	5
1.2	Localisation des sites de mesures	6
1.3	Résultats principaux	7
1.3.1	Variabilité spatiale des propriétés hydrauliques du lit de rivière	7
1.3.2	Variabilité temporelle des variables physico-chimiques	10
1.4	Difficultés rencontrées :	12
1.5	Conclusion.....	13
1.6	Appui aux politiques publiques.....	14
1.7	Production liée au projet (liste).....	15
1.8	Bibliographie	15
2	Annexe A :	17
2.1	Mesure spatialisée des flux hyporhéiques à l'aide d'une fibre optique	17
2.1.1	Utilisation de la fibre optique pour la mesure des flux d'eau	17
2.1.2	Déploiement de la fibre optique sur le site de Signy	17
2.1.3	Mesure et interprétation du signal de la fibre optique chauffée.....	19
2.1.4	Mesure de la variabilité spatiale des flux sur la Sélune à Signy	21
2.1.5	Variabilité temporelle des flux sur la Sélune à Signy	24
2.1.6	Conclusion et perspectives.....	25
3	Annexe B	26
3.1	Mesure spatialisée de la conductivité électrique et de la perméabilité hydraulique des sédiments d'un cours d'eau.....	26
3.1.1	Introduction.....	26
3.1.2	Sites étudiés.....	26
3.1.3	Matériel et protocole de déploiement	26
3.1.4	Inversion du signal électromagnétique pour le calcul de la perméabilité hydraulique. 27	
3.1.5	Principe de la mesure avec l'antenne CMD	28
3.1.6	Calcul de la porosité	30
3.1.7	Calcul de la perméabilité	30
3.1.8	Mise en œuvre de l'antenne CMD sur le site de Signy	31
3.1.9	Analyses et interprétation des données de conductivité électrique	31
3.1.10	Variation temporelle de la conductivité électrique.....	34
3.1.11	Calcul de la porosité et de la perméabilité.....	36
3.1.12	Conclusion et perspectives.....	39
4	Annexe C.....	41

4.1	Mesure et interprétation de la variabilité temporelle de grandeurs abiotiques dans les sédiments de la Sélune.....	41
4.1.1	Protocole de mesure.....	41
4.1.2	Détermination du sens des flux d'eau dans la zone hyporhéique	44
4.1.3	Crues et concentrations en oxygène dissous de la Zone hyporhéique	50
4.1.4	Conclusion et perspectives.....	53
5	Annexe D.....	55
5.1	Dynamique des ressources en eau sur le bassin de la Sélune.Relations avec l'arasement des barrages de Vezins et la Roche qui Boit.....	55

1 Le projet de recherche

1.1 Contexte et objectifs

L'arasement des barrages sur la Sélune peut avoir un impact notable sur l'hydrologie et le transfert de sédiments. Il peut engendrer un décolmatage du lit de la Sélune à l'amont et un colmatage à l'aval des barrages. En conséquence, les flux d'eau et d'éléments chimiques dissous entre trois compartiments : la rivière, les sédiments qui constituent son lit et la nappe souterraine adjacente, peuvent être impactés. Ces flux sont d'importance à la fois pour les habitats qui se développent dans le lit de la rivière et pour les échanges d'eau entre la rivière et la nappe souterraine (Krause et al., 2011).

Le projet LEARN est centré sur l'étude des gradients physico-chimiques dans les sédiments du lit de la rivière résultants des échanges entre ces trois compartiments. L'objectif est, d'une part, d'apporter des connaissances fondamentales sur les variables de contrôle de la dynamique de ces échanges et d'autre part, d'apporter des éléments de réponse sur l'impact de l'arasement en termes de colmatage du lit de la rivière.

Dans LEARN, les processus de colmatage sont caractérisés en étudiant l'évolution dans le temps et l'espace de la capacité du lit de la rivière à laisser passer les flux d'eau (perméabilité du lit de la rivière) lorsqu'il est soumis à une variation du niveau dans la rivière et dans la nappe adjacente. La perméabilité dépend, en outre, de la porosité connectée (volumes de vide entre les particules, pores, fractures, fissures, qui sont connectés les uns aux autres). La perméabilité peut évoluer sensiblement selon les tailles et la nature des sédiments qui constituent le lit de la rivière et le milieu géologique de la nappe souterraine (Storey et al., 2003 ; Genereux et al., 2008 ; Wondzell et al., 2019). Un apport important de sédiments fins à l'aval des barrages, à la suite de leur arasement, peut modifier la perméabilité du lit de la rivière en changeant la proportion de sédiments fins dans la matrice sédimentaire.

Le projet comporte trois tâches principales :

La tâche 1 vise à explorer dans les 50 premiers cm de profondeur du lit de la rivière: (i) la variabilité spatiale et temporelle des flux d'eau selon la perméabilité et le relief du lit de la rivière, (ii) à modéliser la localisation des boucles de courant hyporhéiques et le temps de résidence de l'eau.

La tâche 2 vise à mesurer comment les échanges nappe-rivière, contrôlés par les différences de hauteurs d'eau entre la nappe et la rivière variables dans le temps, influencent les flux dans la zone hyporhéique superficielle (50 cm d'épaisseur). Ces travaux seront comparés aux dynamiques d'échanges nappe-rivière à l'échelle du bassin versant, par l'analyse de chroniques et une modélisation pluie-débit-niveau souterrain globale à réservoir.

La tâche 3 vise à identifier les facteurs de contrôle de la variabilité basse et haute fréquence géochimique et biologique de la zone hyporhéique.

Pour chacun des 3 tâches, les observations nécessitent le déploiement conséquent d'instruments de mesures in-situ. Une part importante du projet est consacrée à la mise en œuvre d'une métrologie novatrice, issue des programmes de recherche nationaux et européens, pour mesurer in-situ les flux d'eau, les concentrations en gaz dissous et la perméabilité au sein de la matrice du lit de la rivière. Un parc conséquent d'appareils de mesure a été déployé sur la Sélune. Certains appareils n'ont pas fonctionné correctement. Leur dysfonctionnement a été constaté plusieurs mois après leur installation du fait de l'inaccessibilité de certains sites hors période d'étiage. Le jeu de données est néanmoins riche et son analyse complète en termes de processus hyporhéiques est présentée dans ce document.

1.2 Localisation des sites de mesures

La méthodologie mise en place vise à suivre l'évolution des gradients de perméabilité (i) en quelques points du lit de la rivière propices à l'installation de frayères à saumons ou à lamproies, (ii) entre la rivière et la nappe d'eau souterraine et (iii) sur des profils longitudinaux de la rivière de plusieurs centaines de mètres. Parallèlement, les gradients d'oxygène dissous, de conductivité électrique et de température sur les 30 à 40 cm d'épaisseur de sédiment du lit de la rivière sont suivis en plusieurs points de la Sélune (figure 1).

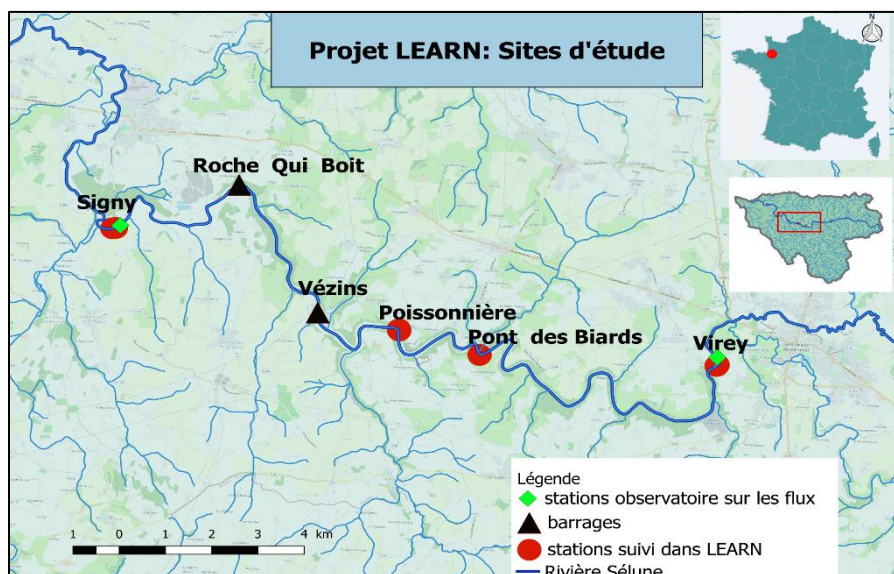


Figure 1 : localisation des stations de mesure dans LEARN. La cartographie des flux d'eau hyporhéiques et des perméabilités ont été réalisées à Signy. Le suivi des hauteurs de nappe à la Poissonnière et Signy. Le suivi aux différents points des gradients physico-chimiques à Virey, la Poissonnière et

Signy.

Ce suivi intègre trois échelles spatiales différentes d'investigation et deux échelles temporelles (Tableau 1). L'un des objectifs méthodologiques est d'explorer les possibilités d'extrapolation des données ponctuelles sur des longueurs importantes de cours d'eau en utilisant des technologies originales dans un contexte fluvial.

Trois sites principaux ont été sélectionnés (Figure 1): (i) un site amont à Virey hors influence des anciens lacs de barrage afin d'avoir un site de référence ; (ii) un site accessible dans la zone de l'ancien lac du barrage de Vézins (La Poissonnière) ; (iii) le site sensible de pompage de l'alimentation en eau à Signy situé à l'aval des barrages. Un quatrième site (pont des Biards) avait été initialement choisi à cause de la présence de bancs de sable sur un linéaire important (spécificité unique sur le cours de la Sélune). Suite à la vidange du lac de Vezin, quelques mois après le début du projet, ce volume de sable a migré à l'aval dans le lac de la Roche Qui Boit. Le site des Biard ne présentait plus d'intérêt particulier. Nous n'avons donc pas poursuivi les mesures sur ce site.

Tableau 1 : synthèse des suivis de LEARN

Type de suivi	temporel	Spatial longitudinal	Spatial transversal
Instrument(s)	Sondes autonomes dans les sédiments	Fibre optique (FO) Antenne électromagnétique	piézomètres
Echelle spatiale Profondeur verticale	1 m ² , 30 cm prof.	Plusieurs centaines de m ² .	20 m 4 m

		3 m (antenne), 20 cm (FO)	
Résolution spatiale	1 m	4 m (antenne), 30 cm (FO)	20 m
Résolution temporelle	15 minutes	annuelle	15 minutes
Variables mesurées	T°, conductivité de l'eau, O ₂ dissous, pression.	Conductivité électrique → perméabilité hydraulique Flux d'eau	Perméabilité hydraulique, sens des flux
Sites	Virey, Poissonnière, Signy	Pont des Biards, Signy	Signy, Poissonnière

1.3 Résultats principaux

Les résultats de LEARN sont : (i) d'ordre technique avec la constitution d'une base de données originale sur les gradients de grandeurs physiques de contrôle sur les flux au sein du lit de la rivière, et (ii) d'ordre conceptuel avec l'apport de connaissances sur les flux hyporhéiques. Cette base de données n'est pas encore exploitée totalement. L'analyse des données est en cours et se prolongera au-delà de la période du projet LEARN. Nous présentons ici les principaux résultats issus des analyses de données faites à ce jour. La richesse des données produites ouvre d'autres pistes de recherche, qui pourront être explorées dans la suite du projet.

1.3.1 Variabilité spatiale des propriétés hydrauliques du lit de rivière

Deux échelles spatiales différentes de mesure ont été explorées pour établir l'hétérogénéité spatiale (i) de la perméabilité hydraulique et (ii) des flux d'eau qui s'infiltrent ou s'exfiltrent du lit de la rivière.

Le déploiement de la fibre optique sur plusieurs centaines de mètres dans le lit de la rivière sur le site de Signy (200 premiers mètres à l'aval du pont de Signy) a montré l'efficacité de cette technique pour mesurer les flux d'eau hyporhéiques sur un linéaire important, avec une résolution spatiale de quelques dizaines de cm (partie détaillée en Annexe A)

Ce résultat a été obtenu en appliquant une méthodologie novatrice d'utilisation de la fibre optique (FO). Cette méthodologie consiste à chauffer la gaine métallique qui entoure la fibre optique pour étudier la dynamique de stabilisation de la température de la fibre (méthode ADTS). La dissipation de la chaleur autour de la FO dépend de deux facteurs : la conductivité thermique des sédiments et les flux d'eau. Une variation de la température le long de la FO peut être due à la variation de l'un de ces deux facteurs ou des deux.

L'ADTS sur la Sélune a permis de démontrer le potentiel de cette approche pour caractériser et cartographier les propriétés thermiques du lit de la rivière et des flux qui le traversent, avec une résolution et une précision inégalées. Les données montrent que sur les 300 m de FO déployée sur une période d'observation de plus d'un an, la conductivité thermique varie assez peu et le flux d'eau présentent des fluctuations spatiales du simple au double (Figure 2). Cette stabilité de la conductivité thermique sous-entend que les variations spatiales des flux seraient induites par des variations locales de perméabilité du lit. Cette hypothèse mérite cependant d'être vérifiée avec des mesures indépendantes de perméabilité dans le lit de la rivière avec d'autres méthodes.

Sur la Sélune, la variabilité des flux d'eau sur la période d'observation semble indépendante de la forme du fond. Résultat qui contredit les observations antérieures très ponctuelles dans le temps et l'espace (Cardenas et al., 2004, Fox et al, 2016). Les données

des trois campagnes de mesure réalisées montrent une nette diminution des flux sur 50 m et une relative stabilité sur 130 m de linéaire de la FO entre avril 2018 et septembre 2019. Nous n'avons pas encore compris l'origine de ce contraste spatiale dans la variabilité temporelle des flux. Ces travaux ont fait l'objet de plusieurs communications et articles dans des revues internationales (Simon et al., 2021, 2023).

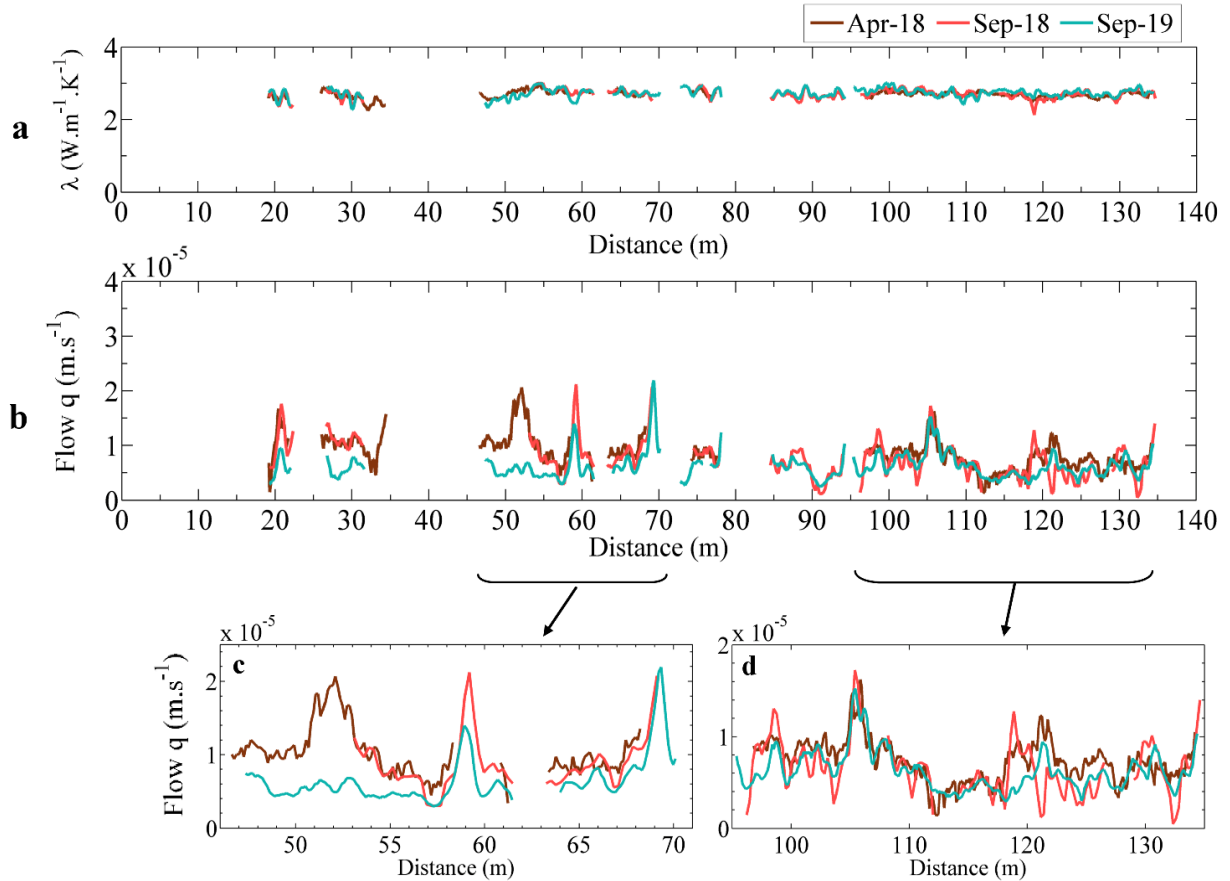


Figure 2 : Profils de la conductivité thermique a , en avril 2018, Septembre 2018 et 2019. Les graphes c et d correspondent à des zooms de secteurs indiqués sur la figure b .

Une des limites principales de l'installation réalisée sur la Sélune est qu'elle ne permet pas d'avoir le sens des flux pour définir les secteurs en infiltration (eau de la rivière qui pénètre dans le lit) de ceux en exfiltration (eau du milieu granulaire qui alimente la rivière). Il s'agit d'un problème lié à la répartition de la FO dans les sédiments. Cette mise en place n'est pas difficile à concevoir théoriquement et requière une mise en œuvre plus difficile dans le cas de la Sélune, du fait de la nature très consolidée des sédiments du lit de la rivière. Dans le cas de Signy, nous nous sommes appuyés sur l'observation d'un gradient hydraulique du toit de la nappe imposé par le pompage d'eau au sein du méandre, pour définir le sens des flux mesurés avec la FO. Le pompage situé dans la plaine alluviale du méandre engendre une dépression hydraulique et induit un sens d'écoulement de la rivière vers le point du pompage. A l'échelle du méandre, l'eau s'infiltré dans le lit de la rivière pour alimenter la nappe. Nous extrapolons ce constat à l'échelle des 300 mètres de linéaire de FO.

Le déploiement d'un conductimètre électromagnétique sur plusieurs linéaires de la Sélune d'une centaine de mètres vise à mesurer un signal de conductivité électrique caractéristique de la porosité du milieu et par là même de ses propriétés hydrauliques. L'antenne du conductimètre que nous avons utilisée permet d'explorer, selon sa

configuration, une épaisseur de sédiment de 1 à 3 mètres. La facilité de mise en œuvre de cette technique autorise un suivi plus simple que le déploiement de la fibre optique mais la mesure des propriétés du milieu est moins directe. Le travail dans le cadre de LEARN a consisté à : (i) adapter la méthode de traitement du signal du conductimètre pour éliminer le signal induit par l'épaisseur d'eau variable entre l'antenne et le lit de la rivière, et (ii) établir des linéaires de perméabilité hydraulique du substrat à différentes dates.

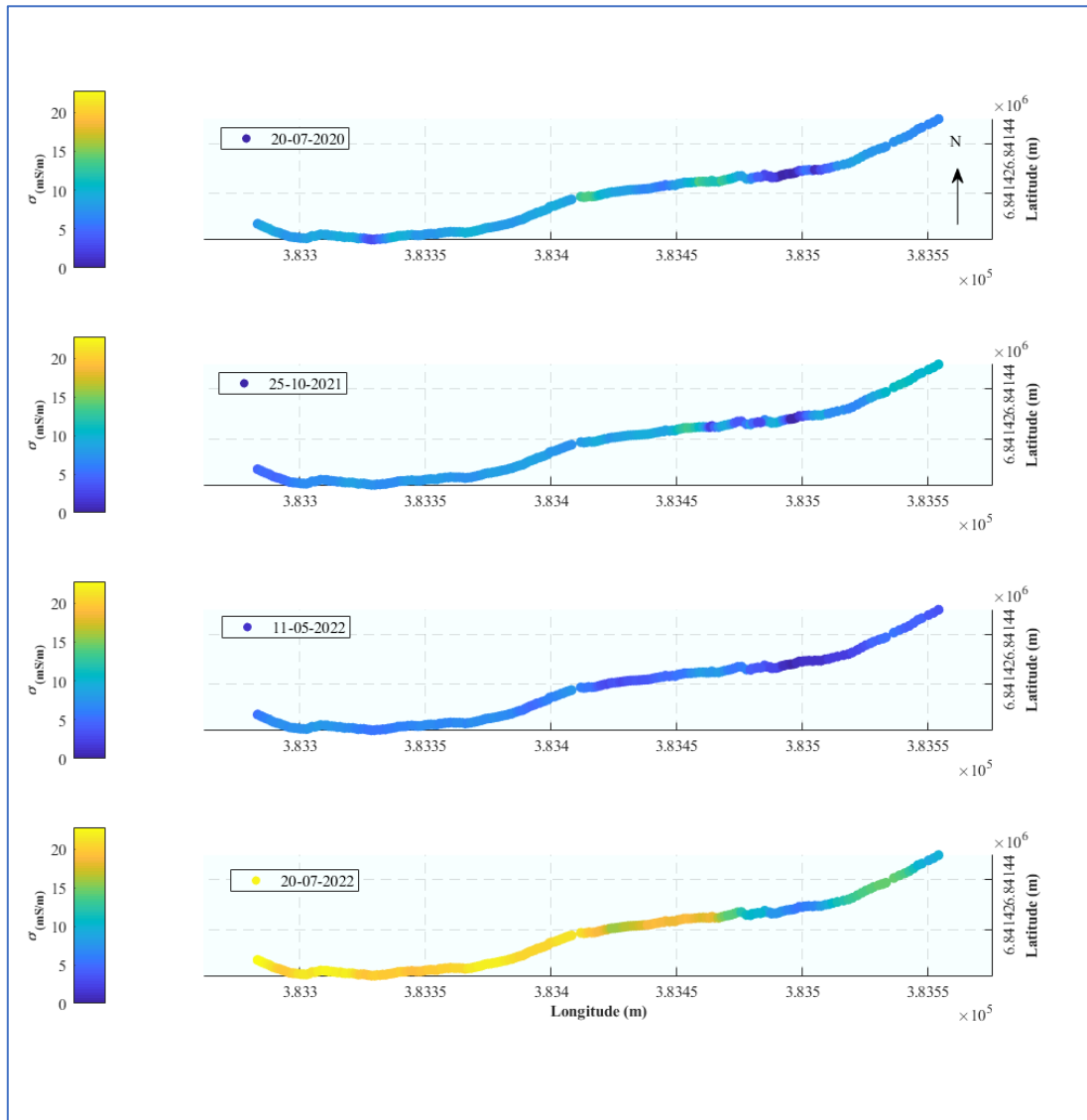


Figure 3 : cartographie de la conductivité électrique des sédiments du lit de la Sélune à l'aval du pont de Signy à différentes dates entre 2020 et 2022. L'augmentation de la conductivité électrique généralisée sur l'ensemble du profil entre mai et juillet 2022 correspond au transit et au dépôt d'un volume important de sédiment fin à Signy suite à l'ouverture du barrage de al La Roche Qui boit le 16 mai 2022.

Les données obtenues à l'aval du pont de Signy montrent une variabilité spatiale assez faible de la conductivité électrique et par là même de la perméabilité hydraulique du lit de la rivière. Elles ont permis néanmoins de localiser deux zones de plusieurs dizaines de m² où la perméabilité semble contrastée. Nous avons pu ainsi définir l'emplacement des deux stations d'installation des sondes physico-chimiques à Signy pour suivre certaines variables abiotiques dans les sédiments. Ce suivi fait l'objet d'une autre partie de LEARN présenté dans la suite du texte.

Les résultats obtenus à Signy, à l'aide d'un infiltromètre en plusieurs points de la rivière entre 15 cm et 40 cm, montrent que les variations spatiales sont principalement induites par les caractéristiques de la couche superficielle du lit (15 à 30 cm d'épaisseur). La perméabilité hydraulique à 30 cm est 10 à 100 fois inférieure à celle mesurée à 15 cm selon la localisation.

Quant à l'impact de l'ouverture du barrage de la Roche Qui Boit et du transit massif de sédiments fins jusqu'à Signy, il est notable : la conductivité électrique a doublé dans les zones de dépôts de sédiments fins. L'augmentation des valeurs de conductivité électrique mesurées est induite par les teneurs en argiles des sédiments déposés. C'est pourquoi l'augmentation de conductivité électrique la plus forte est observée dans la dépression située à l'aval du profil de mesure effectué à Signy. Dépression qui joue le rôle de piège à sédiment par décantation. On mesure également une diminution d'un facteur 10 de la perméabilité hydraulique dans les 15 premiers centimètres du lit de la rivière. En revanche, ce dépôt massif de sédiment ne semble pas avoir modifié la perméabilité au-delà de cette profondeur. Les sédiments fins ne semblent donc pas avoir pénétré dans le lit de la rivière au-delà de cette profondeur.

Les variations spatiale et temporelles de conductivité électrique ne concordent pas avec la relative homogénéité des mesures de conductivité thermique et de flux mesurée à l'aide de la fibre optique. Nous n'avons pas d'élément factuel pour expliquer cette différence. Notons cependant que la fibre optique mesure les propriétés des sédiments localement autour de la fibre (~quelques dizaines cm³) tandis que le conductimètre avec une antenne de 4 mètres mesure la conductivité électrique sur une sphère d'un rayon de 4 mètres. Les volumes échantillonnés sont donc très différents.

1.3.2 Variabilité temporelle des variables physico-chimiques

Le suivi de mesures physico-chimiques ponctuelles dans les sédiments montre une grande variabilité des réponses en termes de gradients verticaux de pression, de température et d'oxygène dissous (Annexe C). L'analyse de la variabilité des paramètres physico-chimiques ne permet pas de dégager un schéma explicatif général qui puisse s'appliquer à l'ensemble des sites. La plupart des paramètres présente des variabilités différentes selon les stations au sein d'un même site. Cette disparité spatiale indique a priori une hétérogénéité de l'amplitude et des sens de réponses physico-chimiques à des forçages comme le gradient hydraulique nappe/ri vière, le niveau d'eau ou le débit dans la rivière. Nous avons dans la mesure du possible, choisi des sites qui nous semblent similaires en termes de configuration de bathymétrie ou de localisation par rapport aux faciès d'écoulement. Cette similarité des contextes ne coïncide pas avec une reproductibilité significative dans les données.

Un des points les plus difficile à comprendre est la non concordance temporelle des différents critères, que nous avons quantifiés pour définir les phases d'infiltration et d'exfiltration dans le lit de la rivière. Ceci suggère soit des erreurs de mesures liées à une mauvaise calibration de certains appareils (capteurs de pression différentielle, conductivité de l'eau) ou des cotes relatives des niveaux piézométriques erronées.

Les chroniques de conductivité de l'eau montrent que les échanges hyporhéiques sont les plus variables sur une épaisseur limitée à environ 30 cm. Au-delà de cette profondeur la conductivité varie assez peu, contrairement à ce que l'on peut observer à 15 cm. A 15 cm, les fluctuations saisonnières sont en lien avec les phases de recharge de la nappe et d'étiage. Mais les données entre les stations ne montrent pas les mêmes phases saisonnières.

Les chroniques d'oxygène dissous (OD) montrent au premier ordre une relation nette avec les variations de hauteurs d'eau (Figure 4). Pendant les crues, les teneurs en OD chutent dans les premiers 30 cm du lit de la rivière. Dès la crue passée, le retour aux valeurs

d'oxygène dissous antérieures à la crue s'effectue rapidement. Ces fluctuations d'OD très rapides en quelques heures peuvent difficilement s'expliquer par des processus de colmatage et surtout de décolmatage rapides lors de phases de décroissance des débits. Un décolmatage, avec un lessivage des sédiments fins dans les 30 cm superficiels du lit de la rivière, nécessite une mobilisation importante du lit de la rivière pendant les phases de crues et non pendant les décrues.

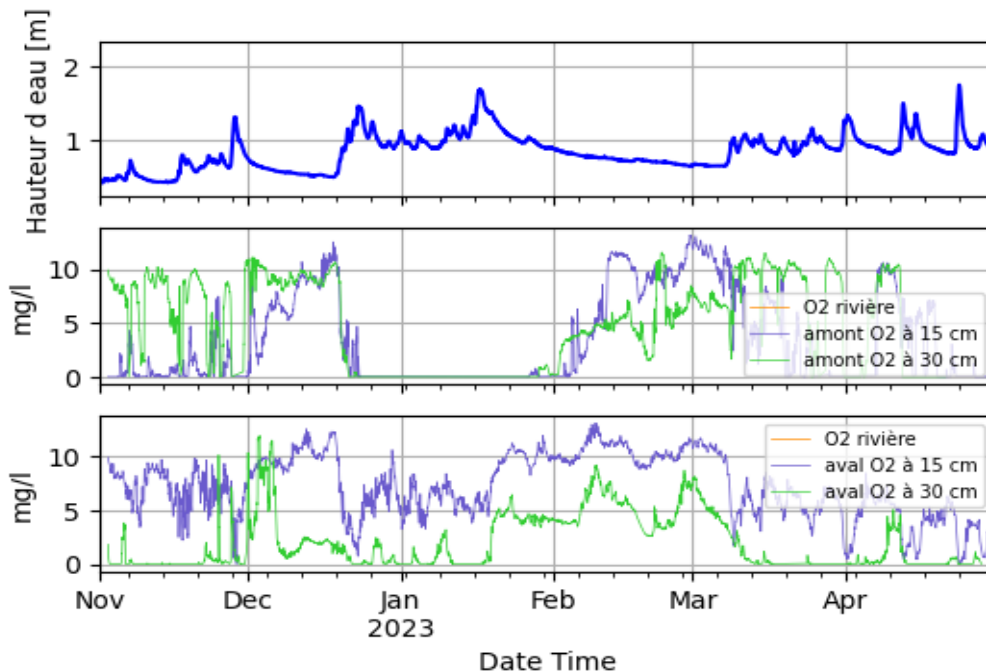


Figure 4 : hydrogramme (haut) et variation des concentrations en oxygène dissous aux stations amont(milieu) et aval(bas) à Virey

Plusieurs hypothèses peuvent être émises pour les expliquer. Une première hypothèse serait une exfiltration de flux d'eau anoxique de nappe pendant les crues. Scénario peut crédible car les mesures de hauteurs d'eau dans les piézomètres montrent une hauteur du toit de la nappe inférieure à celle de la rivière pendant les crues. Le sens des écoulements est donc de la rivière vers la nappe avec une infiltration de l'eau oxygénée de la rivière dans les sédiments. Partant d'un contexte d'infiltration d'eau avec un taux d'OD à saturation, la chute de la concentration d'OD pourrait être expliquée par l'utilisation rapide de l'OD par des bactéries afin de consommer la matière organique dissoute en plus grande concentration pendant les crues. L'hypothèse d'une activité bactérienne hyporhéique importante a été explorée en prélevant dans les sédiments à différentes profondeurs des souches bactériennes in-situ à Signy. Ces souches ont ensuite été mises en culture en laboratoire pour établir leur capacité à consommer l'oxygène avec des taux comparables de décroissance observés sur les données. Ces tests ont démontré que les souches bactériennes prélevées ne pouvaient pas consommer l'oxygène aussi rapidement. Pour le moment, l'hypothèse d'une activité bactérienne responsable des fluctuations haute fréquence des taux d'oxygène est écartée. Quel modèle conceptuel peut expliquer ces variations d'OD haute fréquence ? Cette question reste ouverte.

Le dépôt majeur de sédiments fins à Signy, lors de l'épisode du rétablissement de la continuité hydro-sédimentaire, a engendré une anoxie prolongée de 6 mois du lit de la rivière (Figure 5). Les crues d'automne ont initié l'érosion partielle de ce dépôt. S'en est suivi une augmentation très progressive des teneurs en oxygène. En février 2023, ces dernières étaient inférieures à 10% des valeurs de saturation très en-deçà des valeurs en OD observée avant ces dépôts.

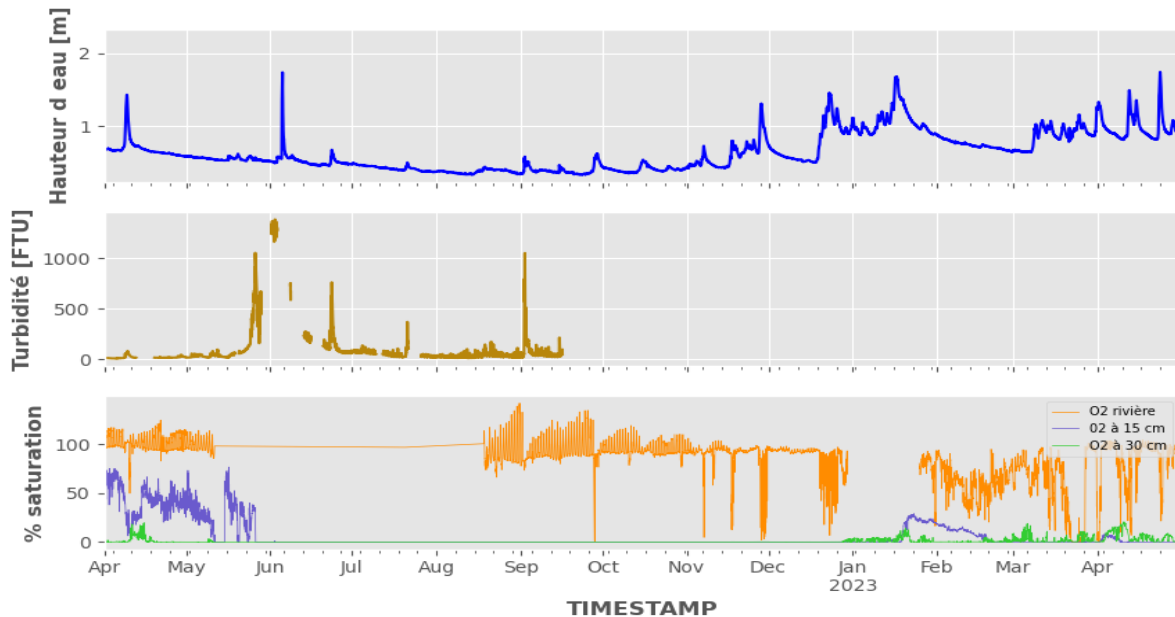


Figure 5: hydrogramme (haut), turbidité (milieu) et variation des concentrations en oxygène dissous à la station amont à Signy

Cet épisode marque un processus de colmatage dont les effets sur l'OD restent non négligeables après une année hydrologique sur les deux stations d'observation à Signy. C'est une observation majeure qui laisse suggérer une dynamique très lente d'un retour à l'état initial. A noter que les stations de mesure à Signy sont placées sur des sommets d'anciennes frayères et donc relativement moins impactés par le dépôt de sédiment que les zones du lit de la rivière plus basses. Il est vraisemblable que cette anoxie prolongée touche une grande partie du linéaire de la Sélune où ces dépôts sont observés.

Nous disposons aujourd'hui d'une base de données, qui a fait l'objet d'un article « open access » dans la revue *Data in Brief* dans lequel sont décrites les données en accès libre sur un site gouvernemental de dépôt de bases de données. L'exploitation de ces données n'est pas encore complètement finalisée et sera poursuivie pour envisager un calage de modèles de couplages entre les variables physico-chimique et biologiques.

1.4 Difficultés rencontrées :

Le projet LEARN initialement prévoyait une analyse des variables abiotiques plus poussées, avec notamment le développement des dispositifs pour mesurer les différents gaz dissous dans les sédiments. Il était également envisager de modéliser les fluctuations des variables géochimiques selon les conditions hydro-sédimentaires. Ces objectifs n'ont pas pu être réalisés du fait de l'impossibilité de recruter sur la durée du projet une même personne en post-doctorat. Par deux fois, après la période de COVID, une personne a été recrutée sur le projet LEARN en post-doctorat quelques mois pour ensuite saisir des opportunités professionnelles plus intéressantes (un poste d'ingénieur de recherche au CNRS et un post-doctorat avec un contrat plus long). De même, un poste de technicien en instrumentation in-situ a été contractualisé pour 2 ans avec une personne qui a saisi une opportunité plus intéressante de CDD après un an de travail effectif au laboratoire. Suite à ces démissions, il a été impossible de trouver des candidats intéressants et intéressés pour accepter un CDD d'un an, vu le contexte très tendu des possibilités de location à Rennes avec un contrat si court.

Nous avons également pu bénéficier d'un co-financement Région/CNRS pour recruter un doctorant à partir de janvier 2019. Après avoir participer activement au suivi des

stations de mesures in-situ, ce doctorant n'a pas pu faire une analyse complète des données pendant son contrat de thèse.

Le budget alloué pour ces moyens humains (~100 k€) a été non dépensé et donc retourné à l'AESN.

1.5 Conclusion

Si l'on recadre les résultats obtenus suivant le schéma des trois tâches proposées initialement, nos conclusions pour chacune des tâches sont les suivantes :

Tâche 1 : (i) *caractérisation de la variabilité spatiale et temporelle des flux d'eau selon la perméabilité et les reliefs de la rivière.*

La variabilité spatiale des flux d'eau mesurés avec la FO ne correspond pas, ni à la variabilité du relief de la rivière, ni à la variabilité des mesures de perméabilité observées à l'aide d'un conductimètre radar. Si nous avons pu démontrer le potentiel de ces méthodes de mesures in-situ spatialisées, les échelles de la résolution des mesures ne sont pas comparables. Ces mesures suggèrent que la variabilité spatiale des flux d'eau, dans les 15 premiers cm du lit de rivière, ne peut pas être expliquée par la perméabilité sur une épaisseur métrique. La zone des 30 premiers cm de sédiment possède une spécificité en termes de perméabilité et de conditions hydrauliques par rapport aux sédiments sous-jacents.

(ii) *modélisation de la localisation des boucles de courant et des temps de résidence.* Cette partie n'a pas pu être encore développée (voir partie : *Difficultés rencontrées*).

Tâche 2 : *influence des échanges nappe-rivière sur les flux dans la zone hyporhéique et extrapolation des échanges nappe-rivière à l'échelle du bassin versant de la Sélune.*

Les données piézométriques à Signy montrent une forte connexion entre la nappe alluviale et la rivière. Proche des berges, les niveaux de nappe suivent les niveaux de la rivière en crue. Hors des périodes de crue, la nappe s'exfiltre dans la rivière. On retrouve une dynamique du couplage nappe-rivière classique, qui impose les sens des flux entre la nappe et la rivière. La zone hyporhéique présente cependant une dynamique plus complexe selon les localisations dans la rivière. Les données de conductivité de l'eau dans les pores des sédiments du lit témoignent bien de l'arrivée d'eau de nappe ou de rivière, dans les 20 premières cm de sédiments, en fonction de la différence de niveaux entre la nappe et la rivière. Mais les fluctuations de conductivité de l'eau dans les pores de la zone hyporhéique ne sont pas systématiquement en phase avec les périodes de crues ou décrues. Les échanges d'eau nappe-rivière n'ont donc qu'un contrôle partiel sur les écoulements dans la zone hyporhéique. Des boucles de lignes de flux d'eau de rivière, s'infiltrant et s'exfiltrant sur des profondeurs et des distances assez courtes, pourraient expliquer ce découplage relatif avec un forçage hydraulique nappe/rivière plus large échelle. Ce schéma conceptuel de circulation est plus conforme à ceux proposés dans la littérature.

A l'échelle du bassin versant de la Sélune, l'étude des chroniques hydrologiques, en plusieurs points de la rivière et des hauteurs de nappe en plusieurs points du bassin versant, a permis de mieux caractériser les capacités de stockage d'eau des aquifères et la dynamique des ressources en eau. Elle montre que la Sélune amont est particulièrement vulnérable aux variations climatiques en raison d'une faible capacité de stockage. Les hauts de versants ont une capacité de stockage supérieure aux bas de versants connectés à la rivière. Ils sont donc plus résilients à un événement de sécheresse. Ils constituent la ressource principale en eau sur le bassin versant de la Sélune. En revanche, ils ont un effet mémoire pouvant atteindre 6 mois qui peut s'amplifier en cas de succession de sécheresses précoces. Les soutiens d'étiage peuvent être notablement impactés en cas de sécheresse hivernale.

Tâche 3 : *identification des facteurs de contrôle de la variabilité basse et haute fréquence géochimique et biologique de la zone hyporhéique.*

Les données physico-chimiques varient principalement dans les 30 premiers cm à partir de la surface du lit de la rivière. Epaisseur similaire à celles mentionnées dans la littérature. On note cependant une disparité importante des réponses physico-chimiques aux conditions hydrauliques dans la rivière entre les stations de mesure. En l'état actuelle de la base de données, il est donc très difficile d'établir des schémas conceptuels généraux. Seule la dynamique de l'OD pendant les crues est ubiquiste sur toutes les stations de mesures, indépendamment de leur position vis-à-vis des anciens barrages. Les crues engendrent une chute rapide (quelques heures) de l'OD sur les 30 premiers cm de sédiment avec un retour aux concentrations antérieures à la crue qui peuvent être tout aussi rapides. Les critères hydrauliques laissent à penser que les crues engendrent une infiltration de matières organiques dissoutes et d'eau saturée en OD dans la zone hyporhéique. Conditions favorables au développement bactérien qui engendrent une consommation de l'OD. Mais les souches bactériennes, que nous avons prélevées dans les sédiments à Signy, ne sont pas suffisamment actives pour se développer et consommer aussi rapidement l'OD. Ce point reste une interrogation sur laquelle nous focaliserons l'étude à l'avenir.

Le transit massif de sédiments fins pendant une quinzaine de jours, suite à l'ouverture du barrage de la Roche Qui Boit, a provoqué un colmatage du lit de la rivière entre le barrage et le méandre du Bas Montmorel. Ce colmatage a engendré une anoxie prolongée de la zone hyporhéique. Anoxie qui persiste plus d'un an après cet événement. La poursuite du suivi des conditions physico-chimiques sur les stations de Signy permettra de définir la dynamique de décolmatage et de retour aux conditions antérieures.

Le projet LEARN n'a pas pu être réalisé sur tous les aspects annoncés initialement à cause de difficultés de recrutement de moyens humains. Il a pu néanmoins permettre de constituer une base de données intéressante et originale. Etablir une cohérence sur l'ensemble des observations effectuées nécessite de poursuivre l'analyse et de modifier certains points, tant sur les protocoles de suivi in-situ, que sur les variables à étudier. Modifications qui feront l'objet d'une poursuite de l'étude sur la base des installations déjà en place. Dans le cadre de l'ANR FIFLOW, pilotés par Olivier Bour du laboratoire de Géosciences Rennes, prévoit le développement de méthodes d'interprétation des données de FO et d'instrument portatifs pour la mesure des flux dans les sédiments, qui seront testés sur plusieurs sites expérimentaux dont celui de Signy. Cet ANR débutera en janvier 2024.

1.6 Appui aux politiques publiques

Une des justifications principales des travaux de gestion des sédiments des lacs de barrages de Vezinss et Roche Qui Boit était d'éviter un transit massif de sédiments à l'aval. Avec pour conséquence, un recouvrement du lit de la rivière par une épaisseur de sédiments fins, qui empêche l'oxygénation du lit de la rivière et de son biotope.

Dans le cadre de LEARN, nous avons pu établir que l'épisode de l'ouverture du barrage de la Roche Qui Boit a engendré un colmatage du lit entre le barrage et le méandre de Bas Montmorel. Ce colmatage se traduit par une anoxie prolongée du lit de la rivière qui se poursuit depuis plus d'un an. La zone hyporhéique est devenue anoxique pendant 6 mois. Ce n'est que fin 2022, que les teneurs en oxygène remontent tout en restant très basses (quelques % de saturation). Cet événement montre l'impact que peut avoir un résidu de sédiments fins au pied d'un barrage lorsque ce résidu migre vers l'aval. Tant que les installations mises en place dans LEARN fonctionneront, la dynamique de retour aux conditions d'oxygénation antérieures de la zone hyporhéique sera suivie.

Ce dépôt massif a également engendré la formation de banquettes de sédiments fins de plusieurs mètres de largeurs en appui sur les berges droite et gauche de la Sélune.

Il en résulte un rétrécissement de la largeur de la rivière et une concentration des flux en son centre. Un retour complet aux conditions antérieures passera par une érosion complète de ces banquettes. Erosion qui a déjà été partiellement réalisée suite aux crues de 2023.

Le dépôt de banquettes de sédiments au-dessus du lit de la rivière sur une surface notable du cours d'eau peut engendrer une diminution des flux d'eau entre la Sélune et la nappe alluviale d'alimentation en eau potable de Montmorel. En effet, la rivière est l'une des sources majeures de l'apport en eau dans la nappe alluviale de Montmorel. On peut donc s'inquiéter de l'impact d'une diminution sensible des échanges d'eau entre la rivière et la nappe, induite par le colmatage du méandre qui entoure la zone de pompage. Jusqu'à présent, les services d'exploitation de la nappe alluviale du Bas Montmorel n'ont pas signalé d'évolution particulière des conditions de pompage. L'impact du colmatage sur l'alimentation de la nappe ne semble donc pas très important.

L'étude des niveaux de nappe et des débits en plusieurs points du bassin versant de la Sélune ont montré que l'effet de l'arasement des barrages ne semble pas avoir perturbé les grandes dynamiques pluriannuelles des écoulements au sien du bassin versant. Les variations seront principalement visibles en période d'étiage et évolueront en fonction du climat. La sécheresse de 2022 a montré que, malgré cet évènement exceptionnel, les débits d'étiages sont restés suffisamment importants pour maintenir naturellement un débit au-dessus du 10ème du module à l'aval de la position des barrages. Cependant, cette sécheresse exceptionnelle a eu lieu alors que les niveaux dans les aquifères qui permettent ce soutien d'étiage étaient proches des moyennes. Or, les analyses menées montrent un effet mémoire des évènements passés sur les stocks. Dans des conditions similaires mais avec un stock initialement bas en raison de faibles recharges (ex : sécheresses hivernales) sur des années précédentes, les mêmes conditions météorologiques pourraient avoir des effets sur les débits plus impactant.

1.7 Production liée au projet (liste)

Ba M., J. Heyman , A. Rivière , M.Soulayrol , V. Stubbe , F.Meric , B. Kergosien , P. Rolland , C. Petton , N. Lavenant , J.Kermarrec , A. Crave ; « *A dataset on physico-chemical hyporheic variables in the Selune River: Towards understanding the impact of dam removal on riverbed clogging processes* » Data in Brief , 2022.

Simon, N., Bour, O., Lavenant, N., Petton, C., Heyman, J., Nauleau, B., Longuevergne L., Crave, A. P. (2019, December). *A distributed heat transport experiment to estimate thermal conductivity of streambed sediments and quantify variability of groundwater/surface water interactions*. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2019, pp. H41K-1845).

Simon N., Bour O., Lavenant .N., Alain Crave¹ and Joris Heyman, Crave A., « *Spatiotemporal dynamics of stream water infiltration in a lowland river* », (soumission mars 2023 à *Water Resources Research*)

1.8 Bibliographie

Cardenas, M. B., Wilson, J. L., and Zlotnik, V. A.: *Impact of heterogeneity, bed forms, and stream curvature on subchannel hyporheic exchange*, *Water Resour. Res.*, 40, W08307, <https://doi.org/10.1029/2004WR003008>, 2004.

Fox, A., Laube, G., Schmidt, C., Fleckenstein, J. H., and Arnon, S.: *The effect of losing and gaining flow conditions on hyporheic exchange in heterogeneous streambeds*, *Water Resour. Res.*, 52, 7460-7477, <https://doi.org/10.1002/2016WR018677>, 2016.

Genereux, D. P., Leahy, S., Mitasova, H., Kennedy, C. D., and Corbett, D. R.: *Spatial and temporal variability of streambed hydraulic conductivity in West Bear Creek, North Carolina, USA*, *J. Hydrol.*, 358, 332–353, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.06.017>, 2008.

Hermans, T., Goderniaux, P., Jougnot, D., Fleckenstein, J., Brunner, P., Nguyen, F., Linde, N., Huisman, J. A., Bour, O., Lopez Alvis, J., Hoffmann, R., Palacios, A., Cooke, A.-K., Pardo-Álvarez, Á., Blazevic, L., Pouladi, B., Haruzi, P., Kenshlikova, M., Davy, P., and Le Borgne, T.: *Advancing measurements and representations of subsurface heterogeneity and dynamic processes: towards 4D hydrogeology*, *Hydrol Earth Syst Sci Discuss*, 2022, 1–55, <https://doi.org/10.5194/hess-2022-95>, 2022.

Krause, S., Hannah, D. M., Fleckenstein, J. H., Heppell, C. M., Kaeser, D., Pickup, R., Pinay, G., Robertson, A. L., and Wood, P. J.: *Inter-disciplinary perspectives on processes in the hyporheic zone*, *Ecohydrology*, 4, 481–499, <https://doi.org/10.1002/eco.176>, 2011.

Storey, R. G., Howard, K. W. F., and Williams, D. D.: *Factors controlling riffle-scale hyporheic exchange flows and their seasonal changes in a gaining stream: A three-dimensional groundwater flow model*, *Water Resour. Res.*, 39, <https://doi.org/10.1029/2002WR001367>, 2003.

Tang, Q., Kurtz, W., Schilling, O. S., Brunner, P., Vereecken, H., and Hendricks Franssen, H.-J.: *The influence of riverbed heterogeneity patterns on river-aquifer exchange fluxes under different connection regimes*, *J. Hydrol.*, 554, 383–396, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.031>, 2017.

Wondzell, S. M., Herzog, S. P., Gooseff, M. N., Ward, A. S., and Schmadel, N. M.: *Geomorphic Controls on Hyporheic Exchange Across Scales—Watersheds to Particles*, in: *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, Elsevier, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12135-9>, 2019

2 Annexe A :

2.1 Mesure spatialisée des flux hyporhéiques à l'aide d'une fibre optique

2.1.1 Utilisation de la fibre optique pour la mesure des flux d'eau

La caractérisation et la quantification des échanges nappe / rivière ou des flux hyporhéiques s'inscrivent en général dans une démarche pluridisciplinaire. Les approches sont basées sur des mesures piézométriques et/ou thermiques, sur des prélèvements chimiques ou biologiques ponctuels. Certaines méthodes permettent une quantification et un suivi, mais le plus souvent ponctuellement.

Dans ce contexte, la chaleur est un traceur particulièrement intéressant pour suivre les échanges dans la zone hyporhéique car la mesure de température est rapide, simple et fiable et qu'il a été montré que la température était un très bon marqueur des échanges nappes-rivières [Anderson, 2005 ; Constantz, 2008]. Par exemple, il a été montré comment des capteurs thermiques couplés à des mesures de pression permettaient de quantifier en différents points de mesures les flux hyporhéiques (Cucchi et al., 2018). Le développement de méthodes de mesures distribuées de température à haute résolution par fibre optique (FO) a permis d'observer des profils longitudinaux de température le long de cours d'eau sur plusieurs centaines de mètres voire quelques kilomètres (Selker et al., 2006; Tyler et al., 2009; Briggs et al., 2012 ; Krause et al., 2012). En utilisant un câble de FO déposé à l'interface entre les sédiments et la rivière, il est relativement aisé de localiser les arrivées d'eau souterraines (Westhoff et al., WRR 2011). Une autre méthode consiste à disposer le câble de la FO dans les sédiments de la rivière. Sans écoulement dans les sédiments, les variations de températures observées dépendent de la profondeur d'enfouissement, des propriétés thermiques des sédiments et des variations de température de l'eau de la rivière. L'atténuation et le déphasage des variations de température diurnes sont analysés pour estimer les flux souterrains s'ils existent. Différentes méthodes de modélisation 1D, ont été proposées (Mc Callum et al., 2012 ; Gordon et al., 2012 ; Halloran et al., 2016 ; Rosenberry et al., 2016). Toutefois, ces méthodes restent incertaines lorsque les flux sont faibles ou bien lorsqu'il n'y a pas de contraste suffisant entre la température du cours d'eau et celle de la nappe.

Nous avons développé dans le cadre de la thèse de N. Simon et du projet d'Equipex CRITEX ([/www.critex.fr/](http://www.critex.fr/)) une nouvelle méthode dite Active-Distributed Temperature Sensing (Active-DTS ; ADTS) qui permet de quantifier des flux et qui fait suite à de récents travaux auxquels a contribué l'équipe d'hydrogéologie de *Géosciences Rennes* [Read et al., 2013 ; Read et al. 2014 ; Bense et al., 2016]. Le principe est analogue à l'anémométrie à fil chaud et consiste à faire passer un courant électrique d'intensité connue le long de l'armature métallique de câbles de FO pour réaliser une impulsion thermique. La réponse en température à cette impulsion thermique dépend de la diffusivité thermique du milieu environnant (pertes par diffusion thermique) mais aussi des écoulements d'eau ou de fluide qui dissipent par advection une partie de la quantité de chaleur produite.

2.1.2 Déploiement de la fibre optique sur le site de Signy

Dans ce cadre, plusieurs centaines de mètres de câble de FO ont été enfouis en septembre 2017 dans les sédiments à 20 centimètres de profondeur sur le site du Bas-Montmorel (figure A3). Depuis, plusieurs campagnes de mesures distribuées des flux hyporhéiques ont été réalisées avec succès par la méthode active de mesure des flux. L'enfouissement des câbles de FO a permis leur préservation même en contexte de crue. Le dispositif permet ainsi de répéter les expériences dans des conditions hydrologiques variées. Ce dispositif et ces expériences sont une première mondiale, si l'on considère la

taille de la rivière et l'enfouissement de la fibre dans le lit de la rivière. Les expériences antérieures d'utilisation de la FO en rivière ont été réalisées auparavant sur des cours d'eau beaucoup plus petits et/ou sans enfouir la FO dans les sédiments (Selker et al., 2006 ; Westhoff et al., 2011).

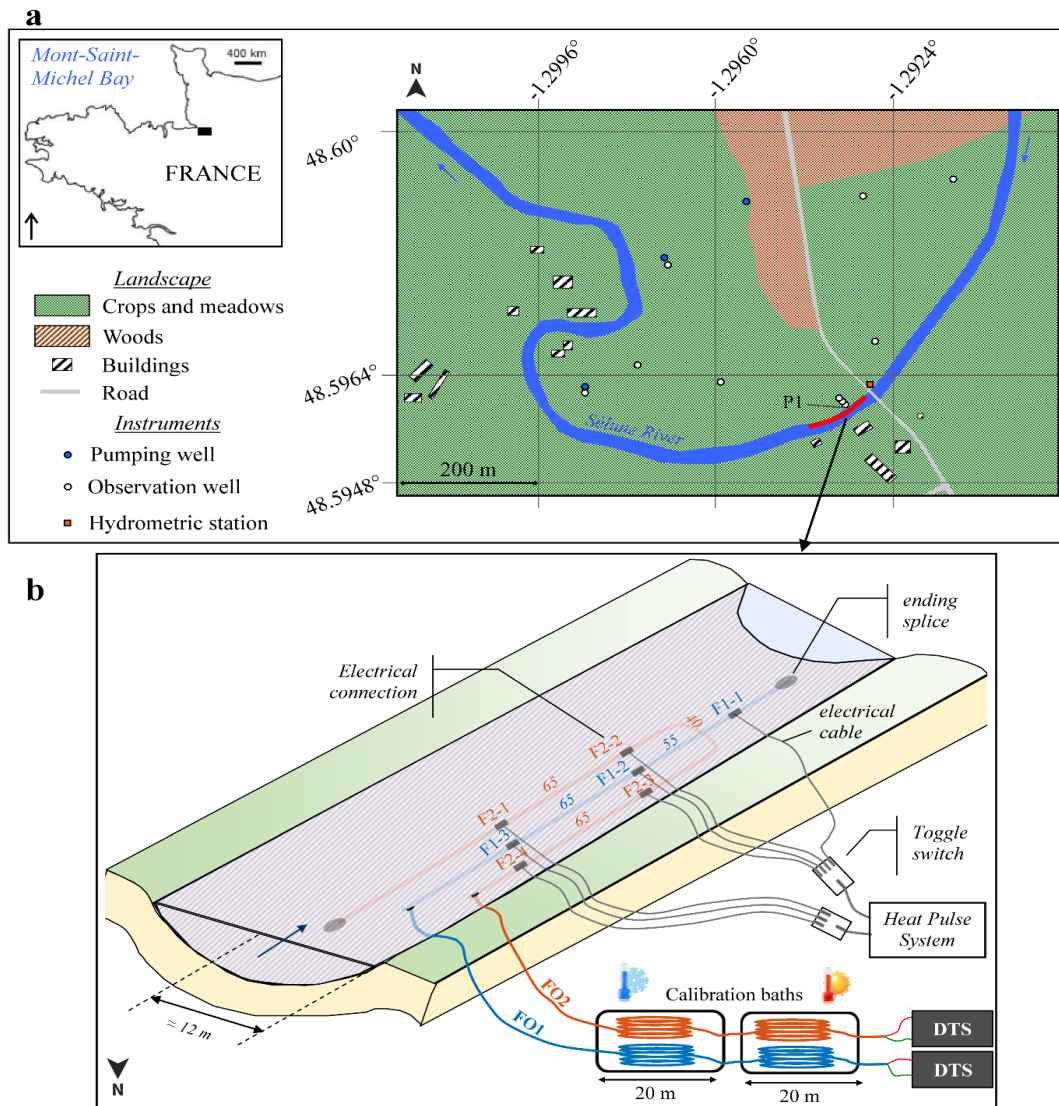


Figure A1a : localisation de l'installation de la fibre optique (en rouge) et des piézomètres sur le site de pompage du bas Montmorel à Signy. Le méandre de la Sélune encadre une plaine alluviale composée d'alluvions avec une stratification granulométrique datée du quaternaire. Figure A1b. Dispositif de fibre optique au sein du lit de la rivière. 3 brins de FO sont segmentés par des connecteurs électriques étanches. Cette configuration permet de chauffer des segments particuliers de gaine métallique de FO par effet Joules en imposant une puissance électrique à la demande.

Ces travaux ont permis d'établir le modèle numérique d'inversion du signal de température mesuré avec la FO par la méthode active de chauffe du câble de la fibre (thèse de N. Simon, financée par l'agence de l'eau Loire Bretagne), et d'acquérir un jeu de données de températures du lit de la rivière dans différents contextes de débit de la Sélune (postdoctorat, financé par l'Agence de l'eau Seine Normandie dans le cadre de ce projet LEARN). L'ensemble des résultats a fait l'objet de plusieurs communications dont deux articles scientifiques (Simon et al., 2021, 2023). Elles montrent la sensibilité et la variabilité

des mesures de flux selon les variations de niveau d'eau dans la rivière conformément aux attendus.



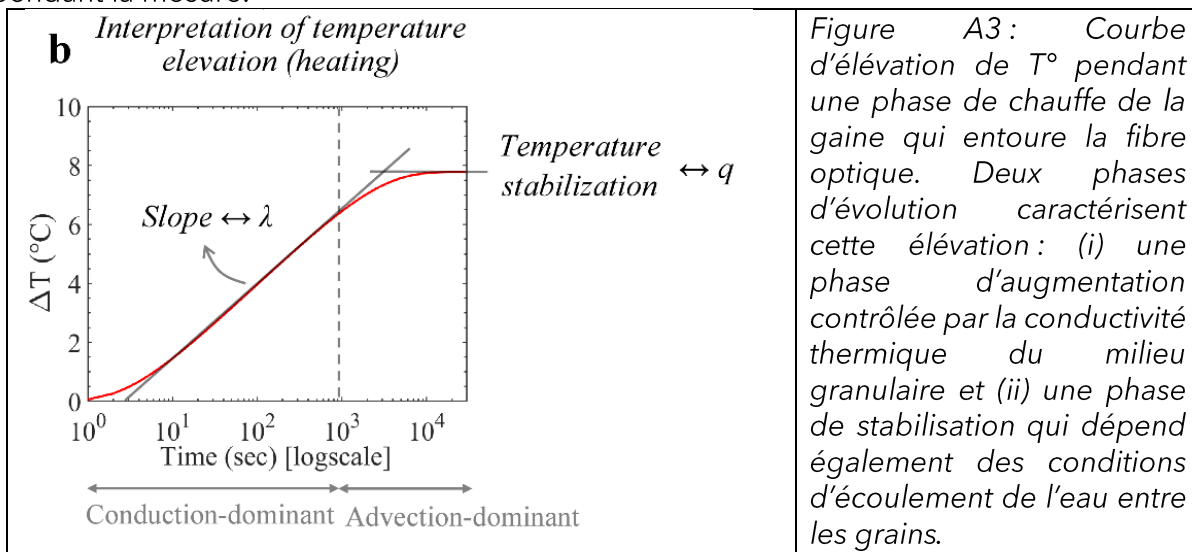
Figure A2: haut : photo du site du Bas Montmorel sur la Sélune lors d'une campagne de mesures des flux par fibre optique ; en bas à gauche : mise en place des capteurs dans les sédiments de la rivière ; en bas à droite : acquisition des mesures de température par les unités DTS (fibre optique) à l'intérieur du barnum (photo haut).

L'instrumentation du site a été complétée par la mise en place de mesures in-situ i) de température à plusieurs profondeurs pour valider localement l'estimation des flux et ii) des paramètres physico-chimiques de l'eau (O_2 , T° , C_w) (Annexe C). Enfin, un autre Master 2 à Géosciences Rennes, a travaillé sur une synthèse hydrogéologique du site. Ce stage, qui comprenait des mesures géophysiques (ERT et mesures électromagnétiques), des mesures du niveau d'eau le long de la rivière en lien avec les niveaux de nappes, des analyses géochimiques et de la modélisation numérique des écoulements sous Modflow à l'état stationnaire, a permis de décrire le fonctionnement global du site. Outre la description des échanges nappe-rivière dans un méandre à l'échelle kilométrique, ces travaux permettent de définir un cadre général indispensable à l'interprétation des mesures distribuées de flux. Cela permettra notamment d'intégrer les mesures de flux distribuées à plus grande échelle et de définir des modèles de conductance pour décrire les échanges nappe-rivière à l'échelle de la centaine de mètre. Ces éléments seront replacés dans un cadre plus large pour comparaison avec la dynamique globale du bassin et caractérisation des réponses en fonction des différents contextes géologiques. Ces travaux seront menés grâce à des analyses de chroniques et des modélisations développées ou en cours de développement au BRGM (Voir Annexe D)

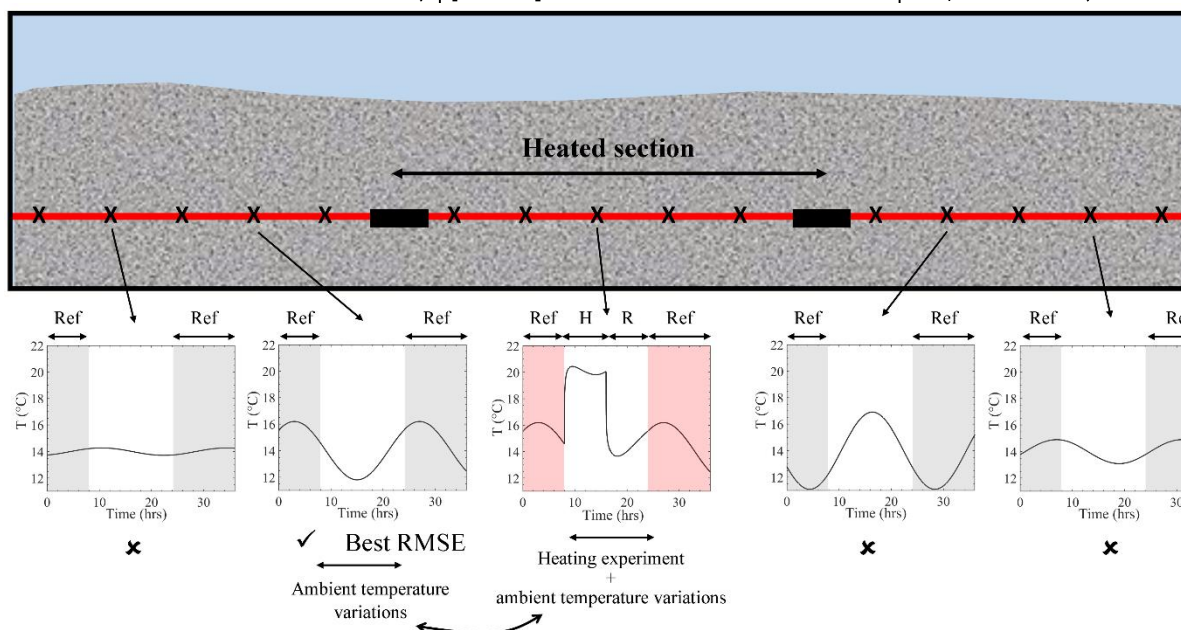
2.1.3 Mesure et interprétation du signal de la fibre optique chauffée

La méthode consiste à injecter un flux de chaleur dans le milieu poreux saturé en eau du lit de la rivière et de suivre l'élévation de T° de la FO. Le flux de chaleur se dissipe au sein

du milieu granulaire par conduction en fonction des contacts entre les grains et par advection induite par la circulation du fluide. Au début de la chauffe, la dissipation de chaleur est contrôlée par la conduction (i.e. par la conductivité thermique du milieu granulaire) (Figure A3). Puis, une fois que le milieu granulaire a atteint un certain niveau de température, la dissipation du flux de chaleur devient également sensible à l'advection induite par les écoulements entre les grains et se stabilise. La phase de variation de la température peut être modélisée numériquement de manière à calibrer la valeur de la conductivité thermique du milieu (λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]). Une fois λ déterminée, un modèle d'advection-diffusion peut être utilisé pour calculer le flux d'eau qui induit la température de stabilisation observée (Simon et al., 2021). Cette méthode de détermination des flux hyporhéiques suppose néanmoins que les fluctuations de température induite par la chauffe contrôlée sont suffisamment supérieures aux variations de température naturelles pendant la mesure.



Dans un lit de rivière, trois cas de figure d'écoulement peuvent être observés selon le sens et la valeur des flux d'eau (q [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]) entre la rivière et son lit : $q = 0$, inférieur (la



nappe fournit de l'eau à la rivière, exfiltration) ou supérieur à $0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (la rivière fournit de l'eau à la nappe, infiltration). Lorsque le flux est nul, la température de stabilisation correspond à un front de diffusion simple et peut être facilement simulé via l'application d'un modèle purement diffusif. Lorsque la nappe alimente en eau la rivière, la température naturelle du lit est stable car l'eau de la nappe est stable, tout apport de chaleur sera mesuré. Lorsque la rivière alimente la nappe, les fluctuations naturelles de la température de l'eau de la rivière, déforment le signal d'élévation de la température induite par la chauffe. Il est alors nécessaire de filtrer les variations naturelles de température, en mesurant celles-ci sur un secteur adjacent sans chauffe (Figure A4). Les équipements utilisés dans le cadre de ce projet permettent d'effectuer cette correction en chauffant un segment pendant plusieurs heures, puis de renouveler le protocole ADTS sur un autre segment. In fine, on obtient ainsi, en chaque point de mesure, une mesure du flux avec une résolution de 40 à 50 cm.

A noter cependant que ce dispositif avec une seule FO déployée dans les sédiments ne permet pas d'avoir le sens des flux et que seul le scalaire du flux est quantifié. Une estimation du sens des flux hyporhéiques nécessite un déploiement plus complexe de la FO à plusieurs profondeurs et en plusieurs directions en chaque point. Dispositif qui n'a pas été envisagé dans LEARN car il fallait dans un premier temps valider le protocole d'interprétation du signal avant de penser à un déploiement plus complexe.

2.1.4 Mesure de la variabilité spatiale des flux sur la Sélune à Signy

Les flux ont été mesurés sur les différents brins de FO installés. La Figure A5. montre un exemple d'acquisition à une date donnée. Les flux par unité de longueur de FO [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] varient entre 5×10^{-6} et $3,5 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ avec une incertitude estimée inférieure à 10 %.

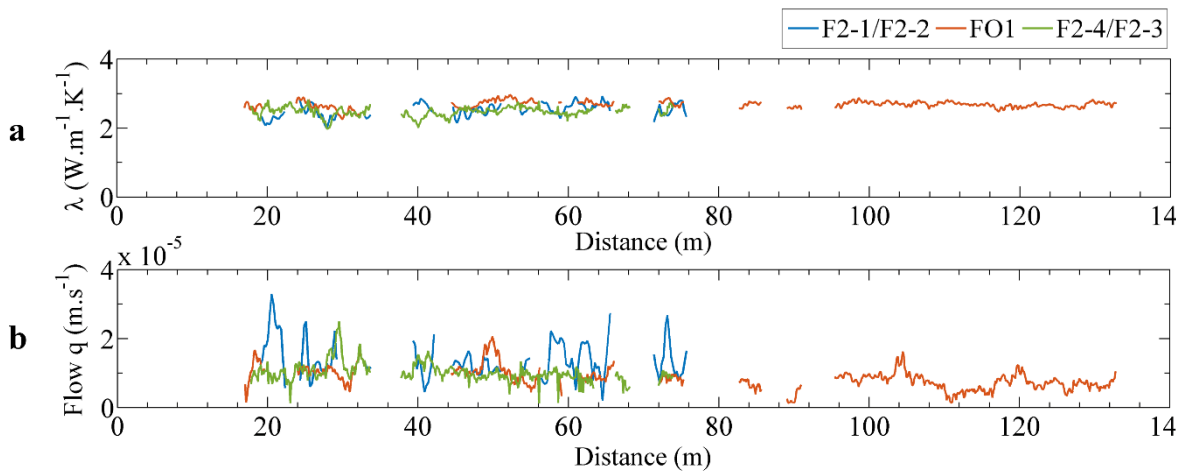
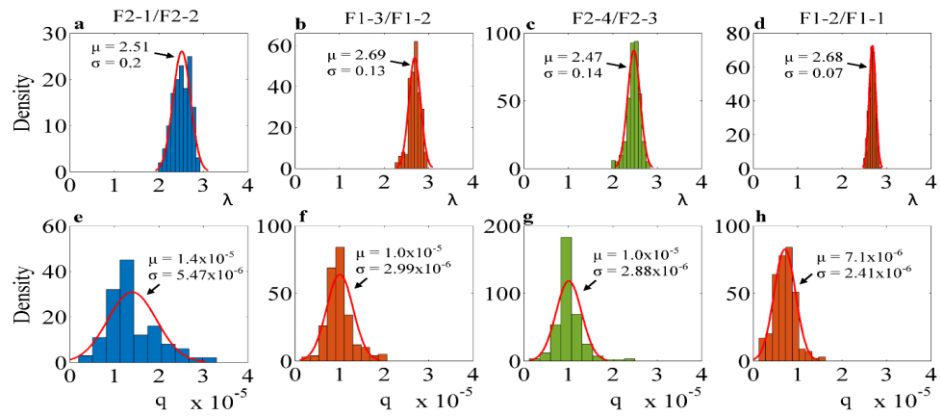


Figure A5 : Valeurs de conductivité thermique et de flux mesurées à Signy en avril 2018 sur les différents segments de la FO. Pour la localisation des segments voir la figure A1b.

La distribution statistique des valeurs sur chaque segment suit un modèle gaussien avec des écarts-types faibles entre 3 et 10 % pour λ et 20 et 30 % pour les flux (Figure A6). Les valeurs supérieures d'écart-type obtenues pour le segment F2-1/F2-2 sont induites par des variabilités spatiales physiques.

Figure A6 :
Distribution
statistique
des valeurs
de
Conductivité
thermique et
de flux
hyporhéique
acquises en
avril 2018.
Pour la
localisation
des
segments
voir la figure
A1b



Ces données dénotent une relative homogénéité des propriétés des conductivités thermiques du lit de la rivière et des flux hyporhéiques. La précision des données est remarquable au regard de leur résolution spatiale. Ce qui démontre le fort potentiel de cette technologie. En utilisant les coordonnées GPS mesurées lors de l'installation de la FO, il est possible de produire des cartes de flux (Figure A7).

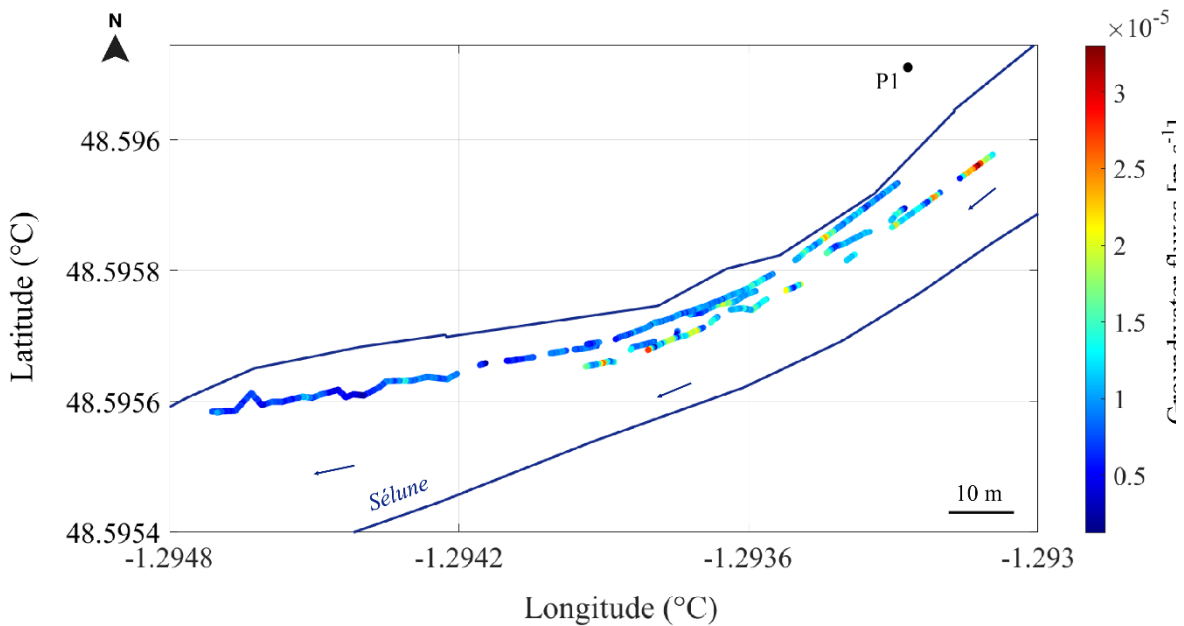


Figure A7 : Carte des flux hyporhéiques mesurés sur la Sélune à Signy en avril 2018.

De même il est possible de positionner le profil de valeurs de flux en fonction de la topographie du fond (Figure A8).

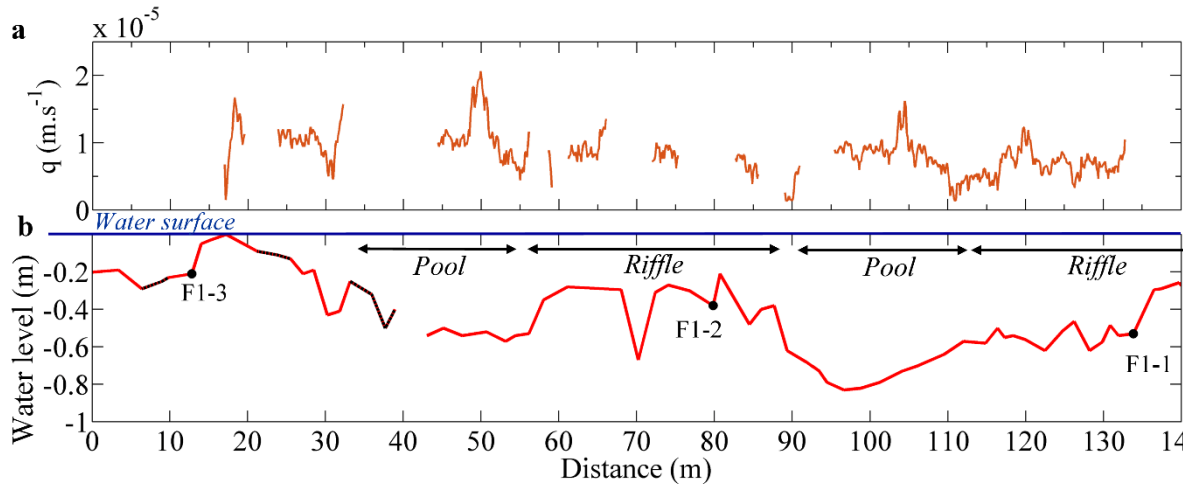


Figure A8 : variation des flux (a) en fonction de la bathymétrie du lit de la rivière (b)

On note qu'il n'y a pas de relation claire entre la forme du fond (séquence mouille/radier) et les valeurs de flux. Suggérant que les flux hyporhéiques ne dépendraient pas de la forme du fond. Cette observation suggère que le gradient hydraulique local ne contrôle pas le flux hyporhéique local. Ceci peut être une conséquence du forçage hydraulique imposé par le pompage dans le méandre alluvial qui borde la rivière à Signy. A l'échelle du méandre alluviale, les hauteurs du toit de la nappe alluviale sont en effet inférieures à celle de la rivière. Le pompage impose un sens des flux de la rivière vers la nappe, avec une infiltration de l'eau de la rivière dans son lit. Ce forçage hydraulique peut être suffisamment important pour annuler l'effet de gradients hydrauliques locaux induits par les variations spatiales de la bathymétrie le long des profils mesurés. Sans le forçage de pompage dans la nappe alluviale connexe à la rivière, il est vraisemblable que la variabilité des flux serait plus importante en étant plus sensible aux gradients hydrauliques locaux induits par les fluctuations bathymétriques du lit.

La variabilité spatiale des flux hyporhéiques observée à Signy peut être induite par des propriétés de conductivité hydraulique hétérogènes qui seraient dues à des hétérogénéités alluvionnaires du lit de la rivière. Les variations spatiales relativement faibles de la conductivité thermique et des flux indiquent que le niveau d'hétérogénéité est modéré voire faible sur cette partie de la Sélune.

2.1.5 Variabilité temporelle des flux sur la Sélune à Signy

Le protocole ADTS a été réalisé à trois dates sur plus d'une année sur la Sélune à Signy pour quantifier l'évolution temporelle de λ et des flux (Figure A9). Les résultats

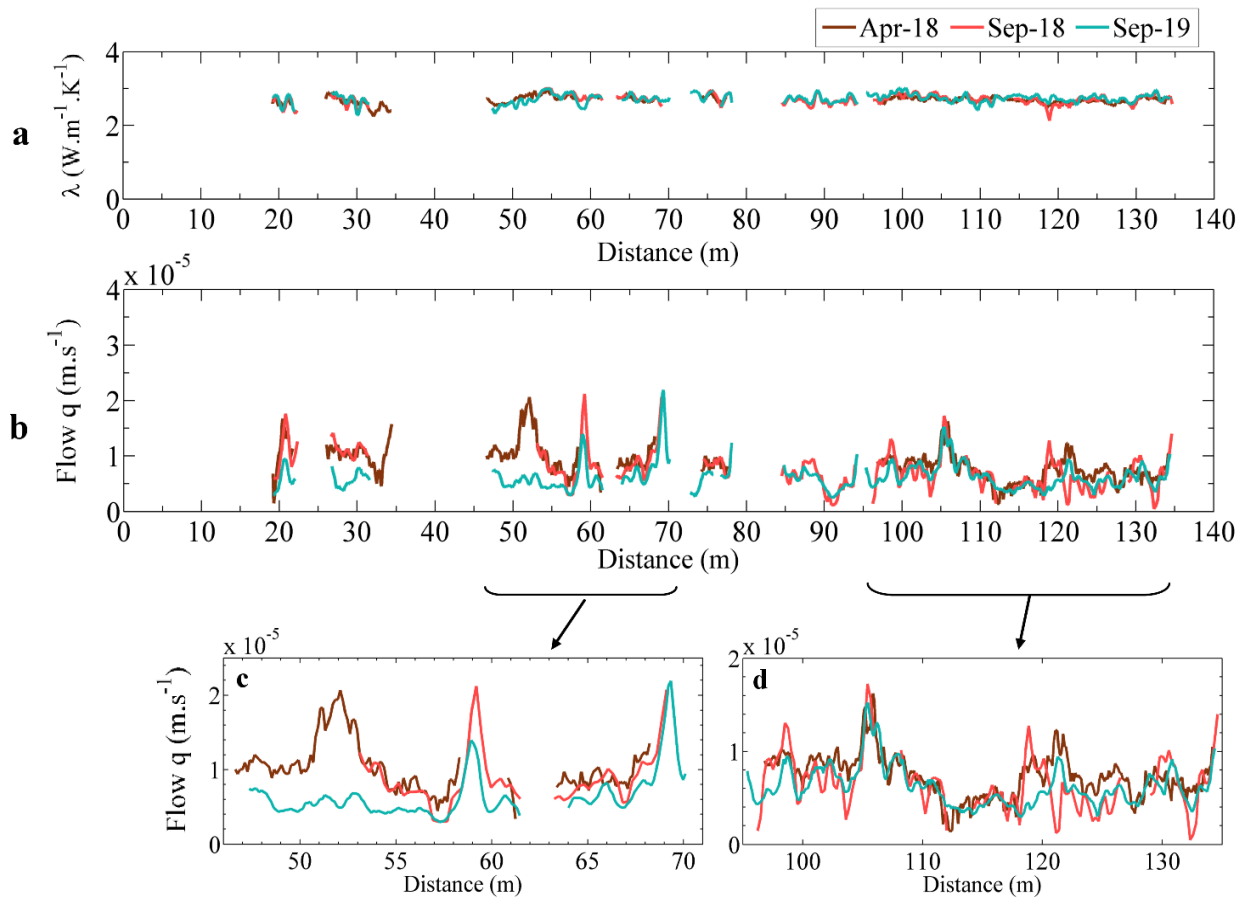


Figure A9 : Profils de la conductivité thermique a , en avril 2018, Septembre 2018 et 2019. Les graphes c et d correspondent à des zooms de secteurs indiqués sur la figure b.

montrent que la distribution spatiale des conductivités thermiques sur l'ensemble du bief où la FO est déployée, ne varie pas sur la période entre avril 2018 et septembre 2019 autour d'une valeur de $2,5 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1} \pm 5\%$ avec une reproductibilité remarquable à une résolution de 40 à 50 cm. La distribution des flux est relativement stable sur la plupart des secteurs. Seuls les 70 premiers mètres amonts sur un des secteurs montrent une diminution des flux de moitié ou une stabilité remarquable sur certains secteurs.

Les flux mesurés aux trois dates sont relativement stables si l'on considère les variations de niveau d'eau dans la rivière à ces dates. Ce résultat peut être induit par une conductivité hydraulique importante et l'effet du forçage hydraulique qui varie très peu pendant la période de mesure. L'intensité du pompage varie de façon périodique quotidiennement car il est dépendant de la demande en eau de l'inter communauté. La diminution de moitié des flux observés pour une conductivité thermique quasi constante peut être induite par un colmatage partiel du lit entre septembre 2018 et septembre 2019. Pendant cette période, on constate en effet une augmentation de la turbidité dans la rivière (i.e. de la concentration en particules fines en suspension) due à l'ouverture du barrage de Vezins et la remobilisation des sédiments stockés dans les barrages.

2.1.6 Conclusion et perspectives

La mise en œuvre de l'ADTS sur la Sélune a permis de démontrer le potentiel de cette approche pour caractériser et cartographier les propriétés thermiques du lit de la rivière et des flux qui le traversent avec une résolution et une précision inégalées. Les données montrent que la conductivité thermique varie assez peu sur les 300 m de FO déployée et durant plus d'un an d'observation. Cette stabilité de la conductivité thermique sous-entend que les variations spatiales des flux seraient induites par des variations locales de perméabilité du lit. Cette hypothèse mérite cependant d'être vérifiée avec des mesures indépendantes de perméabilité dans le lit de la rivière avec d'autres méthodes. Un des résultats majeurs est la possibilité de pouvoir caractériser les flux d'eau avec une résolution spatiale inférieure au mètre sur des linéaires de plusieurs centaines de mètres avec des centaines de points de mesures. Sur la Sélune, la variabilité des flux d'eau sur la période d'observation est inférieure à un ordre de grandeur et semble indépendante de la forme du fond. Résultat qui contredit les observations antérieures très ponctuelles dans le temps et l'espace (Cardenas et al., 2004, Fox et al, 2016).

Une des limites principales de l'installation réalisée sur la Sélune est qu'elle ne permet pas d'avoir le sens des flux de manière à définir les secteurs en infiltration (eau de la rivière qui pénètre dans le lit) de ceux en exfiltration (eau du milieu granulaire qui alimente la rivière). Il s'agit d'un problème lié à la géométrie de mise en place de la FO dans les sédiments qui n'est pas difficile à concevoir théoriquement mais qui requière une mise en œuvre plus difficile dans le cas de la Sélune, du fait de la nature très consolidée des sédiments du lit de la rivière. Ce point sera abordé dans l'ANR FIFLOW qui débutera en 2024. Dans le cas de Signy, nous nous sommes appuyés sur l'observation d'un gradient hydraulique du toit de la nappe imposé par le pompage d'eau au sein du méandre pour définir le sens des flux mesurés avec la FO. Le système est à l'échelle du méandre en infiltration et extrapoler ce constat à l'échelle des 300 mètres de linéaire de FO est raisonnable. Il serait néanmoins judicieux de vérifier si l'on peut effectuer cette extrapolation à l'échelle plus fine du mètre avec des mesures locales des gradients de pressions superficiels (sur les 20 à 30 cm d'épaisseur d'enfouissement de la FO) pour appuyer cette extrapolation. Mesure indépendante qui fait l'objet d'un autre pan du projet LEARN.

3 Annexe B

3.1 Mesure spatialisée de la conductivité électrique et de la perméabilité hydraulique des sédiments d'un cours d'eau

3.1.1 Introduction

Une des variables importantes dans les processus hyporhéiques est la conductivité hydraulique des sédiments. Cette propriété du lit de la rivière contrôle les flux d'eau circulants dans les pores de la matrice sédimentaire en fonction des gradients de pression. Plusieurs dispositifs de mesure directe de la conductivité hydraulique sont proposés dans la littérature (seepage meter, Molonari, fibre optique). Ces dispositifs sont complémentaires et plusieurs ont été déployés dans le cadre du projet LEARN. Ils présentent néanmoins l'inconvénient de ne mesurer que ponctuellement la conductivité (seepage meter, Molonari) ou de nécessiter une logistique importante trop contraignante à déployer sur des sites sans accès pour des véhicules (fibre optique). Pour compléter ce panel de dispositifs, nous recherchons une méthode de mesure facile à déployer sur des linéaires de cours d'eau kilométriques.

La mesure des conductivités électriques du sol ou du sous-sol à l'aide d'antennes électromagnétiques (CMD) fait partie des méthodes géophysiques couramment utilisées pour explorer et mesurer les propriétés géophysiques du sous-sol. Cette méthode est non invasive et permet de mesurer la conductivité sur de grandes distances (selon le vecteur de déplacement de l'antenne) avec une résolution de plusieurs mètres. Les valeurs de conductivités électriques sont ensuite interprétées en termes de porosité du milieu. Porosité du milieu qui est directement liée à sa perméabilité. Déployée de manière standard sur des terrains émergés, cette méthode n'a pas, jusqu'à présent, fait l'objet d'utilisation pour définir la perméabilité des lits de rivières, du fait de la présence d'une lame d'eau au-dessus des sédiments. Lamme d'eau qui modifie sensiblement le signal électromagnétique reçu par l'antenne. Dans le projet LEARN, nous avons testé un protocole de déploiement et de traitement du signal d'une antenne CMD afin de pouvoir filtrer le signal induit par la lame d'eau au-dessus des sédiments et pouvoir interpréter la partie du signal propre aux sédiments.

3.1.2 Sites étudiés

Plusieurs campagnes de mesures sur plusieurs sections linéaires du cours de la Sélune, réalisées en septembre 2018, Juillet 2019 et juin 2020, ont permis d'acquérir un jeu de données de signaux électriques pour tester des procédures de traitement du signal. Nous avons supposé que les contextes sédimentaires de ces sites étaient suffisamment différents pour engendrer des réponses contrastées des signaux électriques.

Par exemple : au pont de Signy, les sédiments superficiels du lit de la rivière correspondent à une granulométrie polydisperse couvrant 5 ordres de grandeurs de tailles (des limons à des blocs de taille métrique). Au pont des Biards en juillet 2020, la couverture du lit de la rivière correspondait à une distribution granulométrique centrée sur des sables de tailles millimétriques. Depuis, ce dépôt de sable important a migré à l'aval et s'est déposé dans la queue du lac de la Roche Qui Boit.

3.1.3 Matériel et protocole de déploiement

Afin de parcourir des distances kilométriques sur la rivière, l'antenne doit être transportée à dos d'homme ou sur un vecteur tracté manuellement ou à l'aide d'un drone

aquatique selon les conditions de hauteur et de vitesse d'eau dans la rivière (Figure B1). La position GPS du vecteur était enregistrée avec une fréquence de 1 Hz.



Figure B1 : différents modes de déploiement de l'antenne CMD dans un cours d'eau. Le déploiement avec un support flottant (colonne de gauche) permet d'associer la mesure électromagnétique à la mesure de la profondeur d'eau, en utilisant un sondeur acoustique positionné sous le flotteur. A noter cependant que dans le cas de l'utilisation d'un drone aquatique motorisé, il est important de laisser une certaine distance entre le drone et le flotteur portant l'antenne, afin d'éviter que le champ magnétique engendré par les moteurs du drones ne perturbe pas la mesure du champ magnétique secondaire renvoyé par le lit de la rivière.



Pour les deux campagnes de mesures, nous avons utilisé une antenne CMD Explorer configurée avec 3 distances de bobines pour obtenir plusieurs profondeurs d'investigation (1, 2 et 3 m). Lors des campagnes de 2019, un echo-sondeur a été installé pour enregistrer les profondeurs d'eau associées aux mesures électriques. Le parcours de l'antenne est géo-référencé, ce qui permet d'établir des cartes avec un positionnement précis au mètre de la conductivité électrique des sédiments.

3.1.4 Inversion du signal électromagnétique pour le calcul de la perméabilité hydraulique.

Dans ce paragraphe seront décrits uniquement la méthode générale du traitement du signal fourni par le CMD Explorer et les premiers résultats obtenus.

Les différentes étapes du calcul pour obtenir des valeurs de perméabilité du lit de la rivière à partir de mesures de conductivité électrique sont résumées Figure B2.

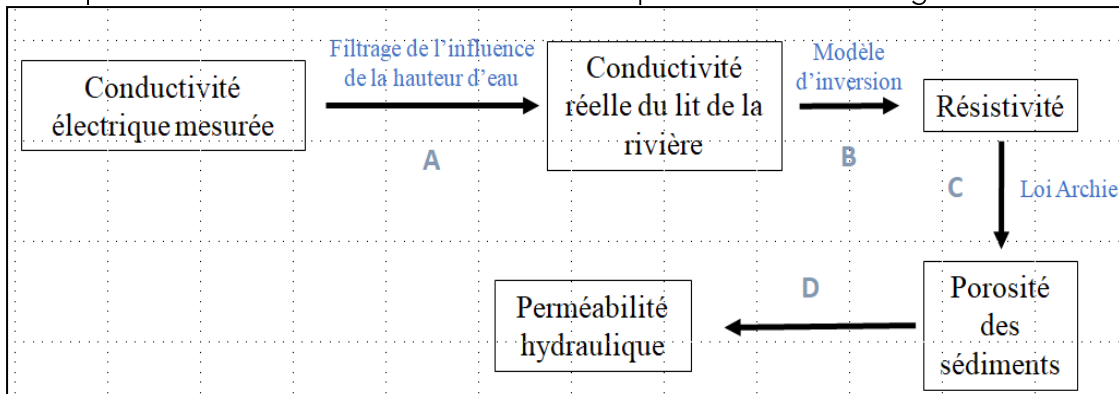


Figure B2 : schéma conceptuel de la séquence de calculs pour obtenir les valeurs de perméabilité hydraulique à partir de mesures de la conductivité électrique dans une rivière.

Nous nous sommes principalement focalisés sur la résolution de l'étape A. Première condition nécessaire au traitement de ce signal. Cette étape est la partie originale de ce travail si l'on se réfère à la bibliographie. Les étapes B, C, et D étant déjà relativement mieux documentées.

3.1.5 Principe de la mesure avec l'antenne CMD

La méthode d'induction électromagnétique (EMI) repose sur l'induction d'un champ magnétique qui crée un champ électromagnétique secondaire dans le sédiment. En effet, l'induction d'un champ magnétique primaire (H_p), émis par la circulation d'un courant électrique alternatif dans une bobine de l'antenne, crée des courants induits dans le sol qui, à leur tour, créent un champ magnétique secondaire (H_s) de fréquence identique. H_s peut être mesuré par l'antenne pour évaluer la conductivité électrique du sol étudié (Figure B3).

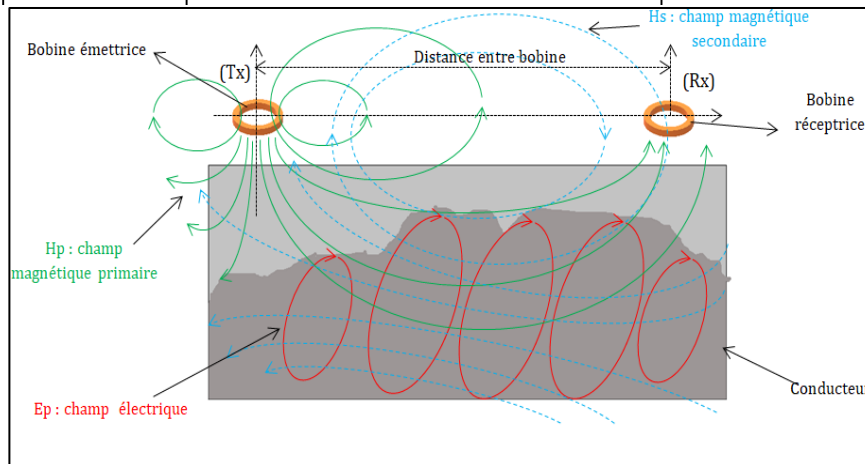


Figure B3 : Principe de fonction de la prospection électromagnétique

Une inversion 1D en temps réel de la conductivité électrique apparente est fournie par le CMD Explorer. L'appareil enregistre le décalage de phase du champ magnétique secondaire (en quadrature) et utilise une méthode de calcul pour obtenir les mesures de conductivité électrique (EC) en fonction de la composition de l'eau des pores et de la texture des sédiments. Le rapport du champ magnétique secondaire (H_s) sur le champ magnétique primaire (H_p) en quadrature de phase correspond à la conductivité apparente en siemens par mètre (S/m), tandis que le rapport en phase (P) correspond à la susceptibilité magnétique (χ), qui est une grandeur adimensionnelle. Ces rapports permettent de

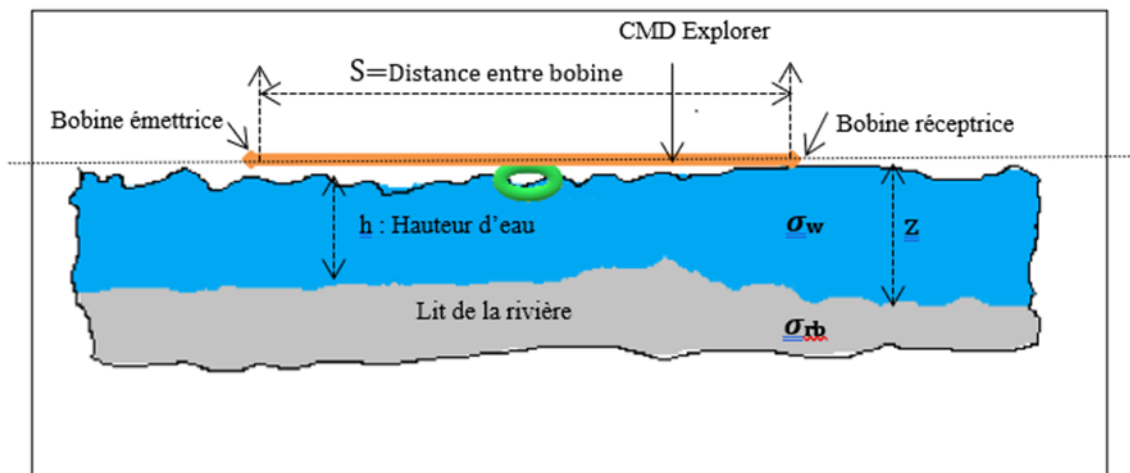
caractériser les propriétés électromagnétiques des bobines dans différentes configurations.

Le rapport H_s/H_p en quadrature est convertie en conductivité apparente σ (en mS/m) sous l'approximation d'un faible nombre d'induction (McNeill, 1980) :

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega S \mu_0} \left(\frac{H_s}{H_p} \right)_{\text{Quadrature de phase}}$$

où ω est la fréquence angulaire, S est la distance entre les bobines Tx-Rx en mètre et $\mu_0 (= 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1})$ est la perméabilité magnétique de l'espace libre. Cette conductivité apparente est identique à la conductivité vraie du terrain si ce dernier est homogène et isotrope.

Dans le cas d'un déploiement de l'antenne CMD au-dessus d'une couche d'eau, la mesure de σ du lit de la rivière, nécessite de considérer un modèle à deux couches avec une partie supérieure correspondant à la couche d'eau de la rivière (Figure B4).



FigureB4 : Schéma de principe du modèle à deux couches pour le calcul de l'inversion de la conductivité apparente.

Un développement analytique de la conductivité apparente dans le cadre du modèle à deux couches, conduit à l'expression analytique de la conductivité apparente du lit de la rivière σ en fonction de la profondeur de l'eau h , de la conductivité de l'eau σ , et de la distance entre les bobines de l'antenne S :

$$\sigma_{rb} = \frac{\sigma_a - \sigma_w \left[1 - \frac{1}{(4(h/S)^2 + 1)^{\frac{1}{2}}} \right]}{\left[\frac{1}{(4(h/S)^2 + 1)^{\frac{1}{2}}} \right]}$$

A noter que σ est une mesure intégrée sur une profondeur qui varie en fonction de l'espacement des bobines dans lequel le courant passe. Lors d'une mesure, trois distances de bobines différentes sont testées et donc trois profondeurs d'intégration sont explorées (1,1 m; 2,2 m; 3,3 m). D'autre part, la sensibilité de σ dépend de manière non linéaire de la profondeur (éloignement de l'antenne). 75% de l'amplitude du signal dépend des propriétés de la couche située à la moitié de la profondeur investiguée. Selon la profondeur d'eau, le signal correspondant à la couche de 1,1 ou 2,2 m sera considéré pour calculer σ .

3.1.6 Calcul de la porosité

Pour les milieux saturés, la variation de la conductivité électrique est liée aux changements des propriétés des sédiments et notamment les variations de volume des pores (Archie, 1947). La loi d'Archie décrit la relation entre la porosité d'une formation et sa résistivité électrique comme suit :

$$\rho = \rho_w a \theta^{-m}$$

Avec:

- ρ_w , la résistivité de l'eau d'imprégnation ;
- θ la porosité ;
- a est un facteur dépendant de la lithologie et variant entre 0,6 et 2 (a est inférieur à 1 pour les roches ayant une porosité intergranulaire, et supérieur à 1 pour les roches ayant une porosité de fracture);
- m représente le facteur de cimentation (il dépend de la forme des pores, de la compaction et varie entre 1,3 pour les sables non consolidés et 2,2 pour les calcaires cimentés).

Suivant la loi d'Archie, la résistivité d'une roche dépend de deux facteurs clés : la porosité et le degré de cimentation de la roche. Le degré de cimentation représente le niveau de remplissage des pores par des minéraux ou de la matière solide. Il vient que la résistivité dépendra fortement de la conductivité électrique de l'eau porale qui remplit les pores à saturation. Une augmentation de la porosité conduit à une augmentation de la conductivité électrique et à une diminution de la résistivité de la roche. La conductivité de l'eau porale est considérée homogène sur toute la profondeur d'investigation.

La loi d'Archie n'est valide que pour une quantité d'argile présente dans les sédiments inférieure à 20%, au-delà de ce seuil, la porosité effective est surestimée. Nous faisons cette hypothèse en considérant que les alluvions de la rivière ont été lessivés de leurs argiles.

Afin de caler la conductivité de l'eau porale pour utiliser la loi d'Archie pour chaque date de déploiement de l'antenne CMD, nous avons suivi la conductivité dans les sédiments de la rivière à plusieurs profondeurs.

3.1.7 Calcul de la perméabilité

L'équation de Kozeny-Carman (Kozeny en 1927 Carman, 1937, 1956) modélise la perméabilité d'un matériau poreux en fonction de la surface spécifique et la taille des particules qui le composent. Elle permet d'estimer la résistance au flux des fluides à travers ces matériaux en utilisant des paramètres tels que la porosité et la tortuosité.

$$k = \frac{g}{\nu} * 8.3 * 10^{-3} + \left[\frac{n^3}{(1-n)^2} \right] * d_{10}^2$$

- Avec :
- k : conductivité hydraulique [$m.s^{-1}$];
- g : accélération de la pesanteur [$m.s^{-2}$];
- ν : viscosité cinématique du fluide
- n : la porosité,
- d_{10} : diamètre pour lequel 10 % des grains ont une taille inférieure..

Cette équation a fait l'objet de plusieurs variantes selon les contextes d'utilisation (Mbonimpa et al., 2000).

3.1.8 Mise en œuvre de l'antenne CMD sur le site de Signy

A chaque campagne de mesure, nous avons effectué plusieurs profils longitudinaux amont/aval avec des configurations différentes de l'antenne pour tester différentes profondeurs d'investigation. L'enregistrement des profondeurs d'eau a été réalisé à l'aide de échosondeurs dont la précision verticale est d'environ 20 cm selon la nature du fond et dont la limite de profondeur minimale pour une détection effective du fond est de 30 cm. Certains secteurs peu profonds (<30 cm), du fait de cette limite de détection, ont été assimilés à une profondeur d'eau de 10 cm pour le traitement du signal.

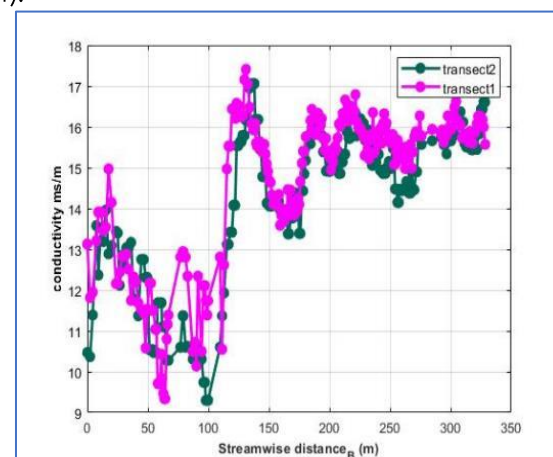
La localisation des trajectoires est mesurée à l'aide de GPS variés selon le mode de mobilisation de l'antenne. Les incertitudes dans les coordonnées géographiques des points de mesure sont pour la plupart liées au couvert végétal qui est dense en plusieurs point du parcours. Des tests réalisés sur des terrains expérimentaux ont montré que la résolution spatiale de l'antenne dont nous disposions était inférieure ou égale à 4 mètres. Par conséquent, nous avons pris en compte cette limitation en ne considérant que les points du sonar qui étaient à une distance égale ou inférieure à 4 mètres par rapport au point de l'antenne de mesure.

3.1.9 Analyses et interprétation des données de conductivité électrique

3.1.9.1 Reproductibilité des mesures de conductivité électrique:

Nous avons testé la reproductibilité des mesures de conductivités en comparant deux séries de mesures prises la même journée, en effectuant deux transects longitudinaux sur une même trajectoire estimée qualitativement sur le site de Signy. Afin de pouvoir comparer les valeurs de conductivité des deux transects, la trajectoire d'un transect médian a été calculée. Puis en chaque point de cette trajectoire, chaque valeur de conductivité de la trajectoire réelle a été affecté à la position la plus proche de la trajectoire médiane. Il est ainsi possible d'effectuer une comparaison point à point des valeurs mesurées sur chaque transect (Figure B5).

Le coefficient de corrélation entre les deux séries de mesures est égal à 0,89, marquant un taux de reproductibilité assez bon. Les écarts de valeurs observés pour une même position sont induits principalement par l'imprécision de la reproductibilité de la trajectoire entre les deux transects et l'imprécision de la mesure avec l'échosondeur de la profondeur d'eau sur les zones à faibles profondeurs (<30 cm).



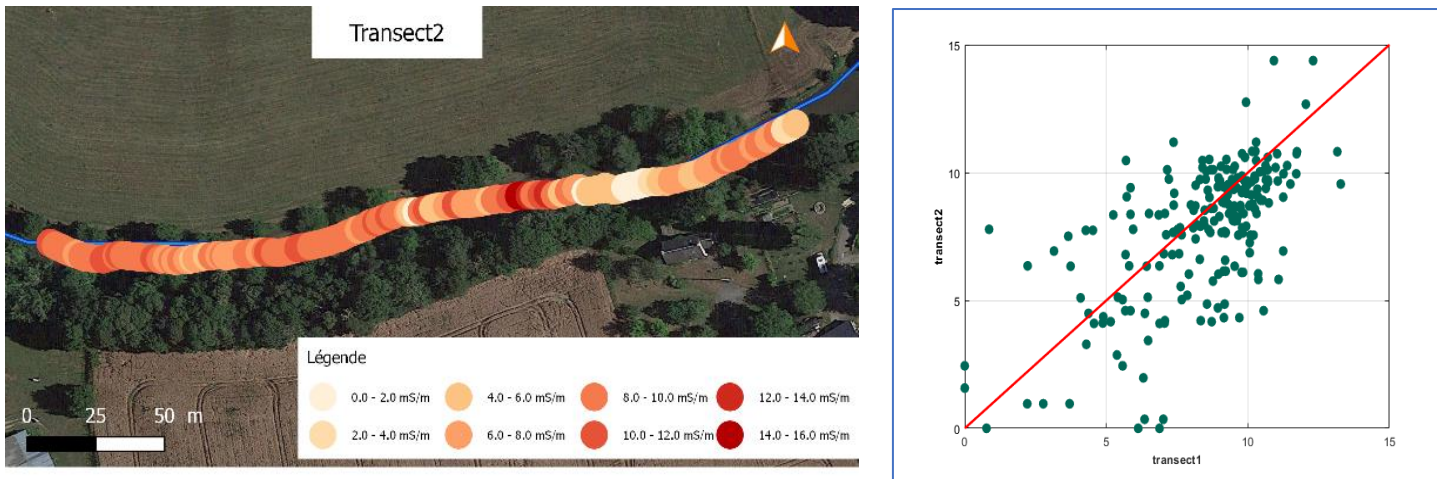
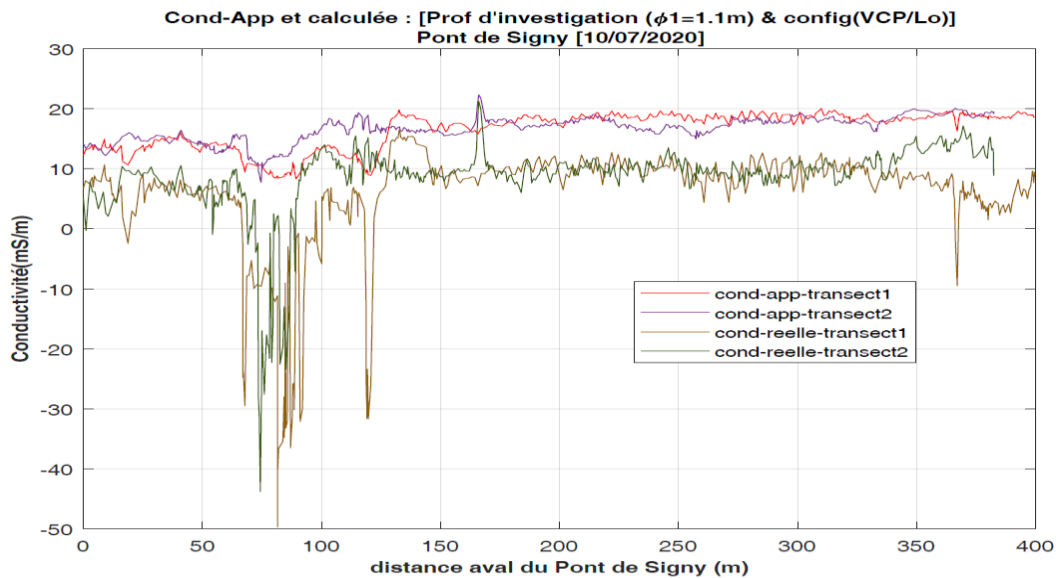


Figure B5 : colonne de droite : cartographie de la conductivité électrique mesurée avec une antenne CMD sur deux transects à une heure d'intervalle. colonne de gauche haut : profil des valeurs de conductivité mesurées sur les deux transects. L'axe des abscisses représente la distance dans le sens aval. Colonne de gauche bas : valeur de conductivité du transect 1 en fonction des valeurs de conductivité du transect 2. La droite rouge correspond à la droite 1 : 1.

3.1.9.2 Variabilité spatiale de la conductivité électrique

Les valeurs de conductivité électrique mesurées dans la Sélune montrent des variations spatiales qui sont à relier aux propriétés de perméabilité hydraulique du lit de la rivière intégrée sur 1 m de profondeur (Figure B6). On note par exemple de fortes variations locales à 75m environ à l'aval du pont de Signy, pour le moment inexpliquées. Ces résultats permettent d'envisager une localisation de variations spatiales et temporelles des propriétés hydrauliques du lit de la rivière et par là même, de mieux cibler les sites pour le suivi des gradients verticaux physico-chimiques.



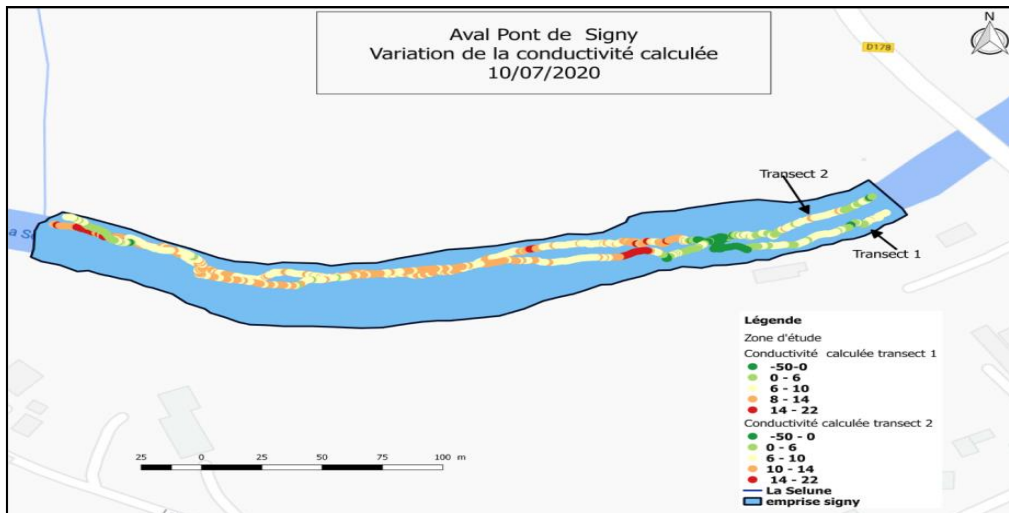


Figure B6 : figure du haut, variation de la conductivité électrique apparente et réelle (filtrée du signal induit par la profondeur d'eau) à l'aval du pont de SIGNY ; figure du bas, distribution spatiale des conductivités à Signy.

3.1.9.3 Variation verticale de la conductivité électrique

L'antenne CMD explorer offre la possibilité de mesurer la conductivité électrique intégrée sur différentes profondeurs (1,1 m, 2,1 m, 3,1m) selon l'espacement des bobines émettrices du champ magnétique. Pour chaque transect longitudinal, 3 signaux différents sont ainsi enregistrés (Figure B.7a). Les valeurs de conductivité mesurées correspondent à une intégration de la conductivité sur chacune des profondeurs. Pour tous les profils de conductivité électrique enregistrés sur le site de Signy aux différentes dates d'enregistrement, nous constatons que le signal le plus superficiel (1,1 m) est : (i) beaucoup plus variable spatialement que les signaux plus profonds (2,1 m et 3,1m), qui sont presque identiques ; (ii) globalement décalé par rapport au signaux plus profonds.

Le point (i) indique qu'une part importante de la variabilité spatiale du signal est induite par les propriétés électriques de la couche superficielle. En effet, ces variations diminuent si l'on intègre le signal sur une plus grande épaisseur de lit de rivière. Les variations spatiales du signal superficiel ne sont pas corrélées à la variabilité de la bathymétrie, elles ne sont donc pas induites par un mauvais filtrage de la conductivité induite par l'épaisseur d'eau entre l'antenne et le lit de la rivière.

Le point (ii) est dû à la valeur de la conductivité de l'eau porale qui varie entre la couche superficielle et les couches plus profondes. Si l'on normalise les conductivités électriques mesurées à 1,1m par la conductivité mesurée à 15 cm d'une part, et les conductivités électriques mesurées à 2,2 m et 3,3 m par la conductivité électrique de l'eau mesurée dans la nappe (dans les piézomètres sur la berge) d'autre part, les 3 signaux se superposent sans décalage en moyenne (Figure B7b). Cette observation démontre que la conductivité électrique de l'eau porale constitue une part importante de la conductivité enregistrée par les antennes, avec des valeurs ρ/ρ comprises entre 0,2 et 0,5 très similaires à la gamme de valeurs de porosité attendues pour des alluvions.

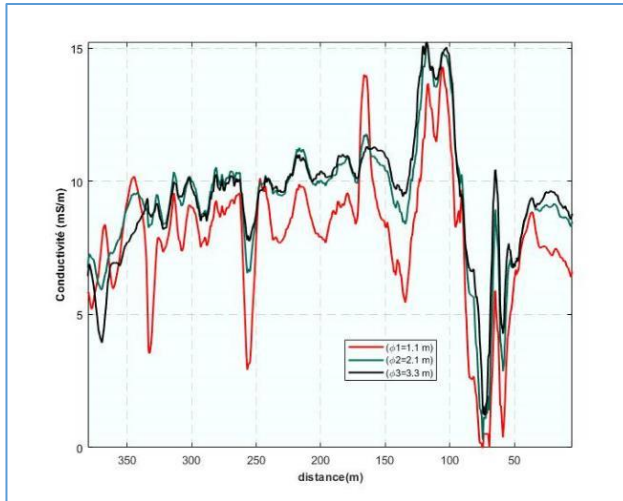


Figure B7a : conductivité électrique du lit de la rivière enregistrée pour les 3 profondeurs d'investigation pour un profil longitudinal à Signy le 20/07/2020 ; les valeurs sur l'axe des abscisses correspondent à la progression du profil d'amont vers l'aval.

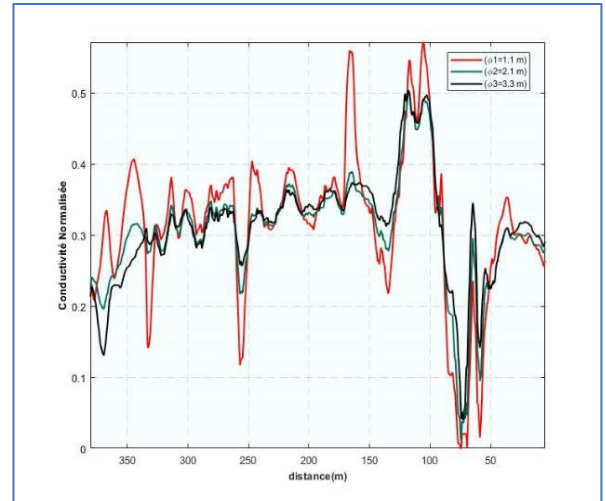


Figure B7b : Données de la figure B7a normalisées par la conductivité électrique de l'eau porale mesurée dans les sédiments à différentes profondeurs

On constate également que les signaux à 2,1 m et 3,1 m sont très similaires, ce qui démontre que la conductivité électrique dans le lit de la rivière est assez homogène dès que l'on dépasse 50 cm de profondeur. En effet, ces deux signaux correspondent à des profondeurs moindres si l'on tient compte de l'épaisseur d'eau qui peut atteindre à certains endroits 50 cm et plus.

La valeur proche de 0 observée à 75 m, est peut être due à une diminution drastique de la porosité et l'absence d'eau porale à cet endroit, avec la proximité de la roche saine. Il n'a pas été observé, à la date de cet enregistrement (20/07/2020), à la surface du lit ce type de formation. Un sondage sous les quelques premiers cm d'alluvions serait nécessaire pour éclaircir ce point.

3.1.10 Variation temporelle de la conductivité électrique

Pour suivre la variabilité temporelle de la conductivité électrique dans les sédiments, quatre campagnes de mesures ont été réalisées à Signy. Les signaux de conductivité à 1,1 m montrent des variations temporelles significatives selon les dates (Figure B8).

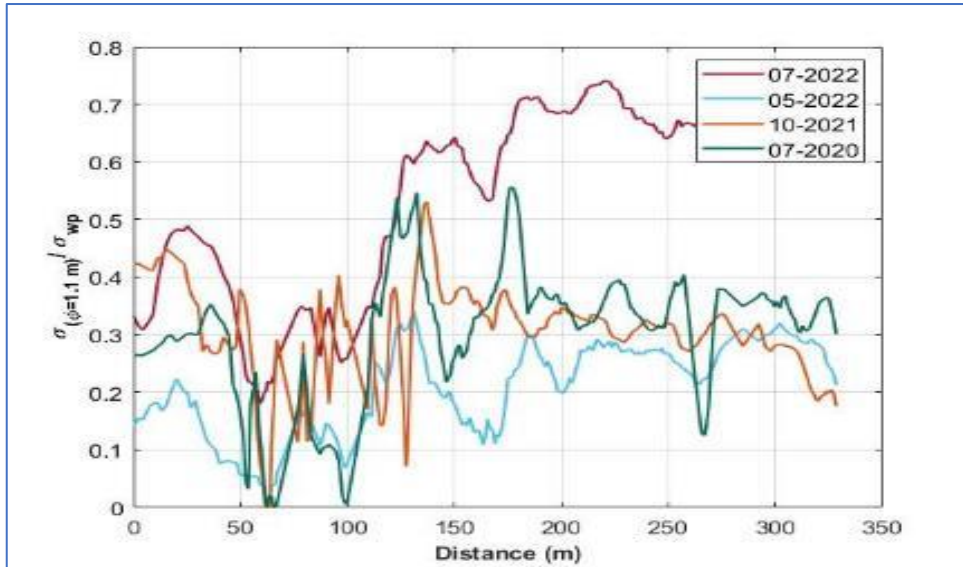


Figure B8 : Profils de conductivité électrique normalisée par la conductivité de l'eau porale σ_p à Signy obtenus lors de 4 campagnes pour une profondeur d'enregistrement de 1,1m.

Les variations spatiales entre juillet 2020 et octobre 2021 ont des amplitudes similaires mais semblent déphasées. Ce déphasage peut être dû à des écarts de distances trop différents par rapport à la position du transect médian considéré pour recaler spatialement les valeurs sur une même trajectoire. Il n'est donc pas possible, en l'état de l'analyse, d'expliquer ces différences entre ces deux dates.

Le profil de conductivité électrique normalisée par la conductivité de l'eau porale en mai 2022 est inférieur sur quasi tout le profil, comparé aux valeurs antérieures de 2020 et 2021. Les fluctuations spatiales de basse fréquence sont néanmoins similaires à celles des années antérieures. Ceci suggère un biais systématique dans le traitement des données de cette date. Biais que nous n'avons pas encore identifié.

Le profil enregistré en juillet 2022 montre très nettement une augmentation de la conductivité électrique normalisée à partir de 100 m. Cette augmentation résulte de la présence de dépôts de sédiments fins limoneux/argileux qui se sont déposés en masse à Signy, à la suite de l'ouverture du barrage de la Roche Qui Boit mi-mai 2022. Lors de cette ouverture, le culot sédimentaire du barrage s'est déposé sous formes de banquettes latérales avec des épaisseurs moyennes de 1m depuis la roche Qui Boit jusqu'au méandre du bas Montmorel. Une épaisseur de 10 à 50 cm de dépôts était également déposée au centre du chenal dans les mouilles principales. Les propriétés électriques des argiles augmentent la conductivité électrique enregistrée par l'antenne. Cette augmentation dépend du volume d'argiles sous l'influence du champ magnétique de l'antenne et notamment de la proximité des banquettes de dépôts (Figure B9).

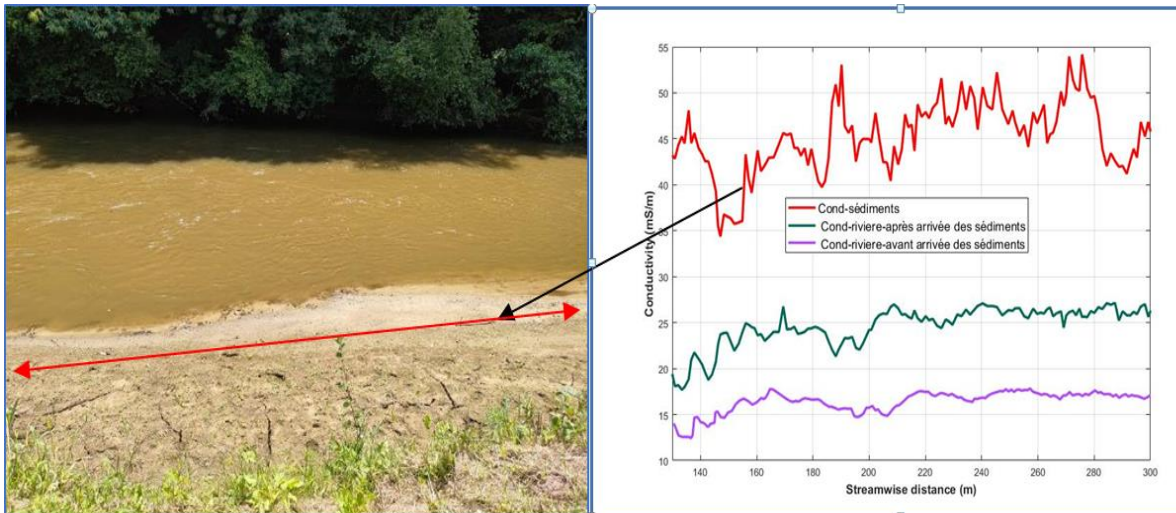


Figure B9 : partie aval de profils de conductivité électrique effectués à des distances plus ou moins proches d'une banquette de dépôts de sédiments limoneux/argileux. La courbe rouge correspond à un profil effectué sur la banquette de sédiments. La courbe verte correspond à un profil effectué au centre du chenal. La courbe violette correspond à un profil effectué au centre du chenal avant le dépôt massif de sédiments limoneux/argileux. Les valeurs de distances indiquées sur l'axe des abscisses correspondent à celles des abscisses de la Figure B8.

Le profil de conductivité électrique de juillet 2022 montre très clairement une évolution des propriétés électriques du lit que l'on peut associer raisonnablement à l'apport de sédiments argileux. Si l'on a pu démontrer l'influence des argiles sur le signal de l'antenne, il en revanche difficile de déduire la part du signal propre à la présence d'argiles, de celle engendrée par une diminution éventuelle de la porosité, qui serait engendrée par l'infiltration d'argiles dans les pores des alluvions du lit de la rivière sur une certaine profondeur.

3.1.11 Calcul de la porosité et de la perméabilité

Les valeurs de conductivité électrique sont converties en valeurs de porosité en appliquant la loi d'Archie, puis en perméabilité hydraulique en utilisant la formule de Kozeny-Carman en calant la valeur du d_{10} à l'aide de mesures indépendantes de la perméabilité (voir ci-dessous, Figure B10).

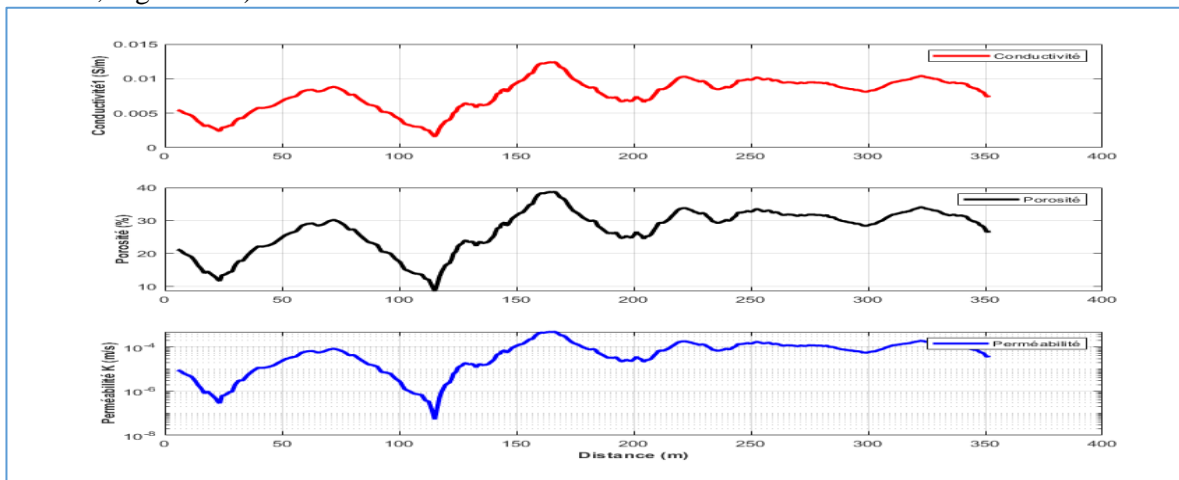


Figure B10 : profil de conductivité électrique mesuré avec l'antenne CMD (en rouge), et profils de porosité (en noir) et de perméabilité (en bleu) déduits des formulation d'Archie et de Kozeny-Carman

Afin de respecter les conditions d'application de la loi d'Archie en termes de % d'argiles, seuls les mesures antérieures à mi-mai 2022 ont été traitées avec cette formulation. Les valeurs calculées de porosités comprises entre 15 et 50 % et de perméabilités comprises entre 10^{-7} et 10^{-4} m.s⁻¹ sont cohérentes avec les valeurs admises pour les substrats alluvionnaires

Afin de confirmer la validité des valeurs de perméabilité hydraulique déduites des mesures de conductivité électrique acquises avec l'antenne CMD, nous avons mesuré la perméabilité en plusieurs points du lit de la rivière à l'aide d'un perméamètre. A cette fin, nous avons développé un perméamètre spécifiquement conçu pour mesurer la perméabilité dans un lit de la rivière en un point (B11).

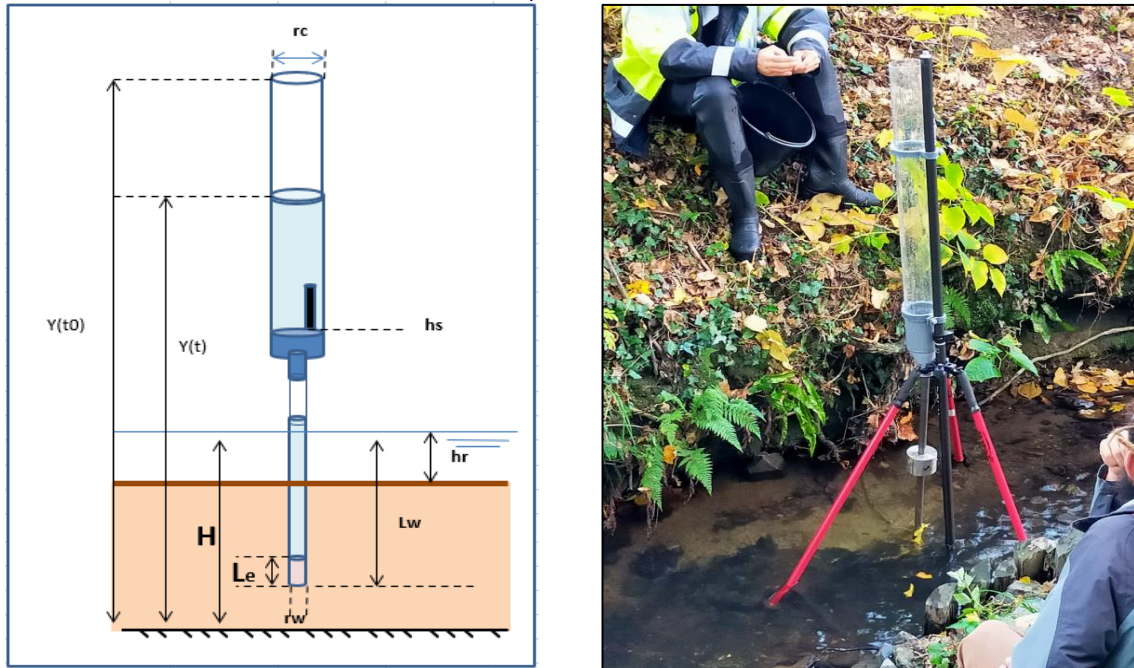


Figure B11 : Perméamètre de terrain ; à gauche, principe du test du choc hydraulique à droite version de perméamètre développé dans le cadre cette étude.

Le principe de ce perméamètre repose sur la réalisation du choc hydraulique (slug test) en imposant une hauteur d'eau au-dessus du niveau d'eau de la rivière dans un réservoir. Lorsque l'eau est drainée à travers le lit de la rivière, au travers d'un tube crépiné enfoui à une certaine profondeur dans les sédiments, la vitesse de descente du niveau d'eau dans le réservoir est fonction de la perméabilité du substrat. La perméabilité hydraulique est déduite de la vitesse de chute du niveau en utilisant la méthode de Bouwer et Rice (1989). La mesure a été réalisée 3 fois en chaque point de mesure pour une valeur moyenne. La vitesse de la chute d'eau est enregistrée par une sonde de pression à une fréquence adaptée en fonction de la vitesse de chute de manière à obtenir une courbe de chute décrite avec au moins 10 points.

Les mesures ont été effectuées avant et après le dépôt massif de sédiments en mai 2022 sur une dizaine de points à chaque fois (Figure B12). Les points de mesure sont localisés pour la plupart aux endroits où l'on observe le plus d'amplitude de variation de la conductivité électrique avec l'antenne CMD (entre 50 m et 100 m depuis l'amont des profils CMD). La profondeur à laquelle la crépine a été enfoncée varie de 15 cm à 45 cm. Trois mesures ont été effectuées à 15 cm sous une banquette de sédiment fin à 15 cm dans le lit de la rivière.

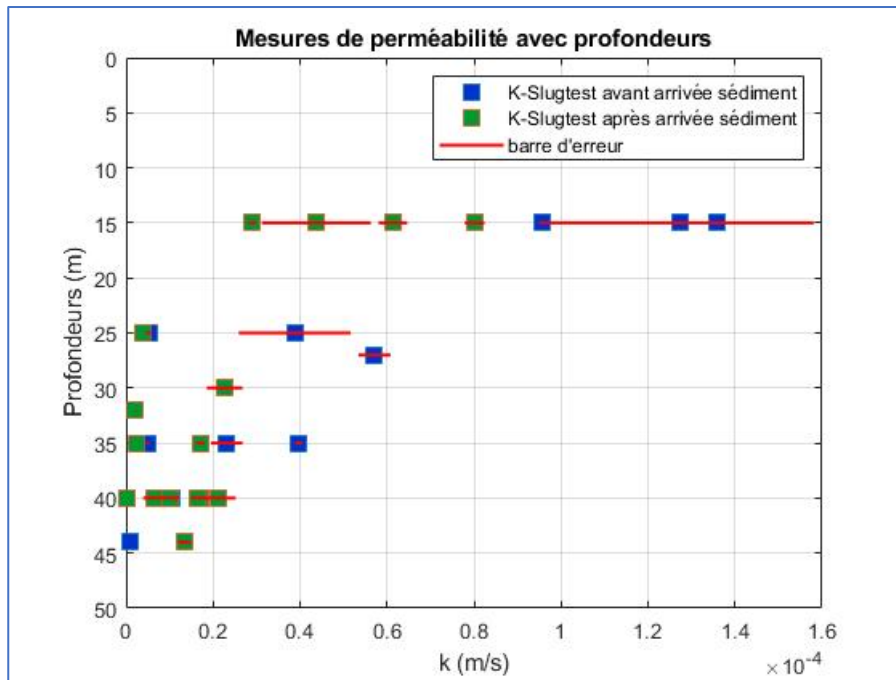


Figure B12 : Mesure de la perméabilité par choc hydraulique avant et après mai 2022 (dépôt massif de sédiments à Signy suite à l'ouverture du barrage de la Roche qui Boit) sur la rivière Sélune au site de Signy

Les perméabilités mesurées diminuent avec la profondeur. Avant mai 2022, elles sont de l'ordre de 10^{-4} m.s^{-1} à 15 cm de profondeur et de l'ordre de 10^{-5} m.s^{-1} à 45 cm de profondeur. Après mai 2022, elles sont de l'ordre de 10^{-5} m.s^{-1} à 15 cm de profondeur et de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-6} m.s^{-1} à 45 cm de profondeur. La baisse de la perméabilité est bien marquée à 15 cm. Elle l'est moins à des profondeurs plus importantes. Nous pouvons en conclure que l'impact de cet apport massif de sédiments fins est limité au premiers 15 cm du lit de la rivière dans la zone étudiée à Signy.

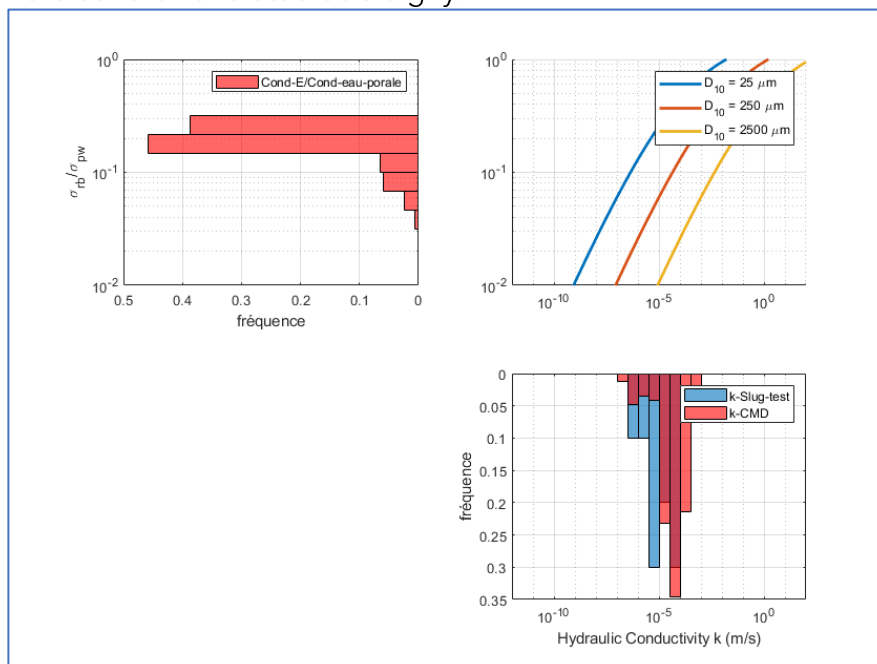


Figure B13 : Ajustement du paramètre d_{10} avec les données slug test

Ces mesures de perméabilité, faites indépendamment de la mesure réalisée avec l'antenne CMD, permettent de caler le paramètre qui caractérise la granulométrie du

substrat dans la formule de Kozeny-Carman (paramètre d_{10}). Cette calibration, bien que basée sur des informations indirectes, vise à obtenir une estimation la plus proche possible de la réalité du terrain pour assurer la pertinence des calculs de perméabilité. Un calage optimal, basé sur le recouvrement des histogrammes des valeurs obtenues par les deux méthodes de mesures (Figure B13), donne une valeur de d_{10} égale à 250 μm pour le lit de la rivière et correspond à une granulométrie de sables fins et moyens selon le tableau de Wentworth (1922). Un résultat donc très cohérent avec le contexte d'un lit de rivière.

Un positionnement des valeurs mesurées à l'aide du perméamètre sur le profil de valeurs de perméabilité obtenues avec l'antenne CMD (Figure B14), montre des qualités de correspondance très variables. Les valeurs obtenues avec le perméamètre en amont, mesurées entre 25 cm et 40 cm, se situent apparemment dans la même plage que les perméabilités déduites des mesures de l'antenne CMD. Cependant, en aval, les valeurs du slug test apparaissent nettement inférieures, présentant un ordre de grandeur moindre par rapport aux mesures effectuées par l'antenne CMD. Les écarts de valeurs observés à certains points peuvent résulter en partie de la différence de volume échantillonné entre les deux méthodes. L'antenne CMD est une mesure intégrée sur un volume de 4 mètres de rayon. La mesure du perméamètre est une mesure intégrée sur quelques dizaines de cm^3 autour de la crépine du tube d'injection. Deux échelles d'intégration très différentes. Une comparaison directe sous-entend une hypothèse d'homogénéité du milieu qui n'est pas vérifiée en tout point du profil longitudinal de la Sélune à Signy.

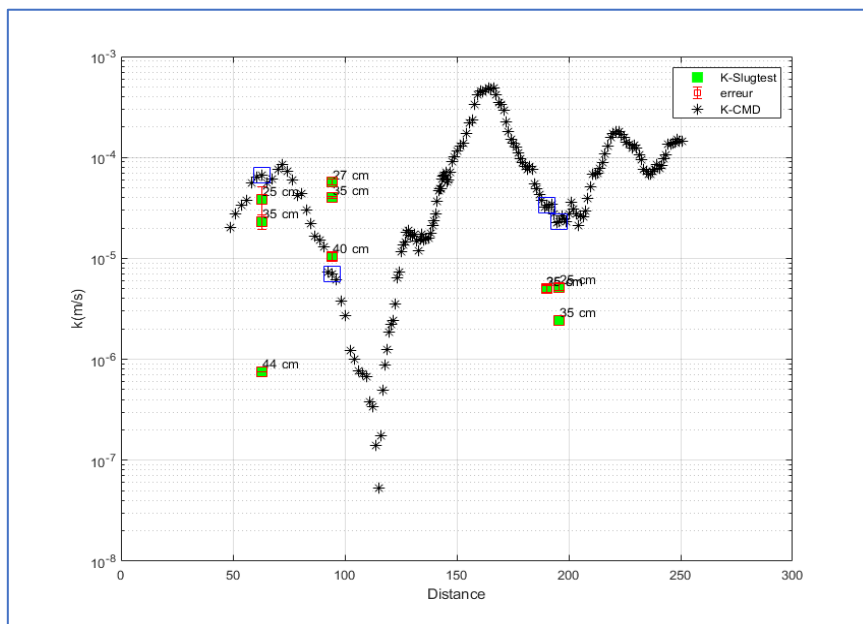


Figure B14 : Comparaison des valeurs de perméabilité mesurées au perméamètre (carrés verts) avec les valeurs de perméabilité mesurées avec l'antenne CMD (étoile noires et carrés bleus). Les valeurs en cm indiquées sur les carrés verts indiquent la profondeur à laquelle la mesure a été réalisée.

3.1.12 Conclusion et perspectives

Le potentiel de mesure de la perméabilité hydraulique du lit d'une rivière, à l'aide d'une antenne électromagnétique, est important. Sur la Sélune à Signy, nous avons pu démontrer que cette méthode permettait d'établir des variabilités spatiales et temporelles de la conductivité électrique et par là même, de la perméabilité hydraulique, via l'utilisation d'un modèle de calcul de la porosité à partir de la conductivité électrique et d'un deuxième modèle de calcul de la perméabilité à partir de la porosité. Deux étapes de modélisation qui introduisent la nécessité de caler les deux paramètres de la loi d'Archie et de mesurer la granulométrie du lit de la rivière. Cette dernière est impossible à réaliser sans des moyens conséquents et coûteux (carottes de sédiments congelées à l'azote liquide). Ce calage peut

introduire une incertitude importante sur les valeurs de perméabilité hydraulique. A noter cependant que l'incertitude des mesures de perméabilité hydraulique, quelles que soient les méthodes, est d'un ordre de grandeur.

Il n'en reste pas moins qu'une antenne CMD permet de localiser des variabilités spatiales et temporelles des propriétés physiques du lit de la rivière avec une résolution qui dépend de la distance entre les bobines de l'antenne. Selon la hauteur d'eau, le choix de l'antenne est déterminant pour obtenir une sensibilité optimale du signal aux propriétés physiques du lit. Les résultats obtenus à Signy montrent que les variations spatiales sont principalement induites par les caractéristiques de la couche superficielle du lit (15 à 30 cm d'épaisseur). L'idéal serait de pouvoir adapter le type d'antenne en fonction de la profondeur d'eau (par exemple avec deux antennes différentes pour les radiers et les mouilles) de manière à mieux cibler la couche superficielle du lit de la rivière.

Quant à l'impact de l'ouverture du barrage de la Roche Qui Boit et du transit massif de sédiments fin jusqu'à Signy, il est certainement notable sur les 15 premiers centimètres d'épaisseur du lit de rivière en diminuant d'un ordre de grandeur les valeurs de perméabilité hydraulique. En revanche, il ne semble pas avoir modifié la perméabilité au-delà de cette profondeur.

4 Annexe C

4.1 Mesure et interprétation de la variabilité temporelle de grandeurs abiotiques dans les sédiments de la Sélune

4.1.1 Protocole de mesure

Afin de comprendre les forçages des variables physico-chimiques au sein de la Zone Hyporhéique, les variations temporelles de ces variables ont été suivies en plusieurs sites de la Sélune (Virey, La Poissonnière et Signy). Le principe initial était de disposer de deux stations de mesure, de 1 m² chacune. Les dispositifs sont conçus de manière à mesurer : (i) le niveau d'hétérogénéité des gradients physico-chimiques sur la base de critères sur la dynamique temporelle, (ii) les liens de causalité entre des forçages potentiels (hydrologie et flux de sédiments) sur les flux d'eau et les concentrations hyporhéiques, (iii) l'impact de l'arasement des barrages. Ceci nécessite de suivre des gradients de grandeurs physique (T°, conductivité, pression hydraulique) et chimiques (O₂ dissous, gaz dissous) au sein du lit de la rivière à différentes profondeurs. L'observation des profils d'oxydation de piquets métalliques enfoncés dans les sédiments montrent une transition nette des processus d'oxydation à une profondeur de l'ordre de 50 cm. Nous supposons donc la présence de forts gradients physico-chimiques dans cette zone de profondeurs. Cet ordre de grandeur de l'épaisseur où sont localisés les gradients principaux correspond aux observations mentionnées dans la littérature (Houzé, 2013). Dans la mesure du possible, à chaque station, les variables abiotiques ont été mesurées à trois profondeurs (à la surface du lit de la rivière, à 15 cm et 30 cm de profondeur).

L'ensemble des points d'observation constitue un parc important instrumental avec une dizaine de sondes filaires raccordées à des centrales d'acquisition déportées sur les berges et une quinzaine de sondes autonomes. Les sondes filaires présentent l'avantage de pouvoir être contrôlées depuis les berges pour la récupération des données et la gestion des batteries quels que soient les niveaux d'eau. En revanche, le dispositif filaire est plus lourd à installer. L'utilisation de sondes autonomes en mémoire et en énergie requiert moins de logistique et perturbe moins le milieu. De plus, le contrôle du bon fonctionnement des appareils ne peut être réalisé que pendant des périodes où le niveau d'eau dans la rivière le permet. Pour des raisons de budget, les sondes autonomes utilisées sont des produits d'entrée de gamme de la marque Prosensor. De fait, ces sondes n'ont pas fonctionné parfaitement sur la durée du projet. Les périodes pendant lesquelles tous les appareils ont fonctionné de manière synchrone sont assez limitées.

La résolution des points de mesure varie selon la taille et le coût unitaire des sondes pour chaque paramètre. Le nombre de points de mesures sur une verticale de 50 cm varie selon les variables mesurées (Figure C1): trois points (T°, gaz dissous), deux points (O₂, conductivité électrique) et un point (la pression différentielle hydraulique entre la lame d'eau et au sein du substrat).

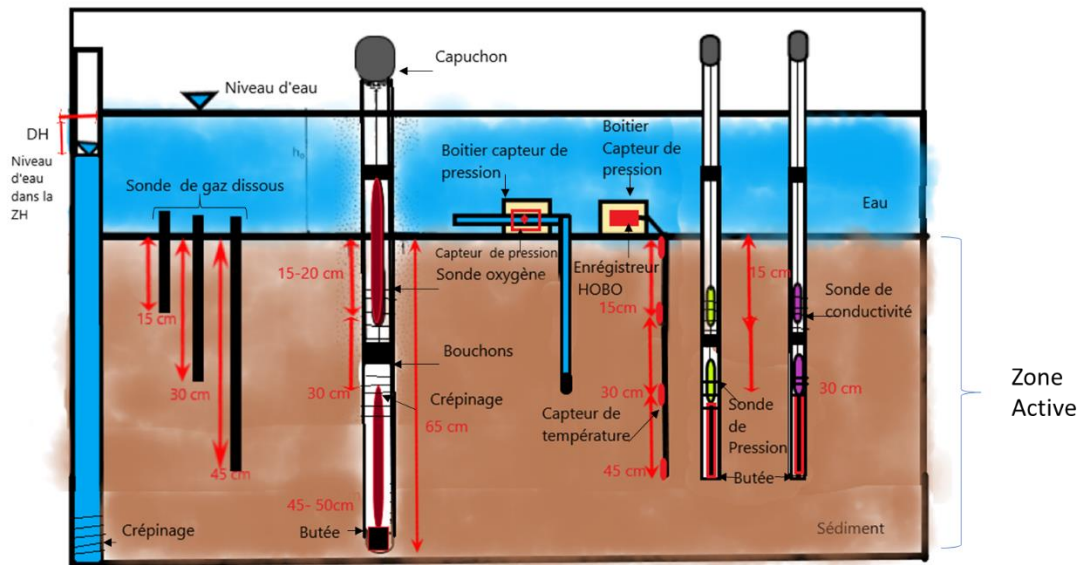


Figure C1 : schéma d'installations de capteurs multiples dans les sédiments

Initialement dans le projet, nous avons envisagé de mesurer les gaz dissous aux différentes profondeurs. Cette partie du projet envisageait le développement d'un protocole expérimental basé sur l'utilisation de membranes passives de quelques cm². Ce développement nécessitait le recrutement d'un ingénieur de recherche qui n'a pas pu avoir lieu en début de projet dès 2019, pour cause de Covid et faute de candidats. Des tests préliminaires avaient démontré le potentiel de cette technique. Ce développement fera l'objet à l'avenir d'un autre projet.

Pendant la période entre les confinements, une partie importante du temps fut consacrée à la conception technique de dispositifs de mesure in-situ. Plusieurs solutions techniques ont été explorées et testées pour répondre aux contraintes terrain propres à la rivière Sélune (forte consistance du substrat, difficulté d'accès, mise en place en condition immergée, forte turbidité de l'eau, ...). Les sondes autonomes ont été insérées dans des petits tubes PVC crépinés aux profondeurs d'intérêts. Le diamètre et la longueur des tubes ont dû être adaptés suivant les sondes disponibles dans le commerce. L'installation des tubes dans les sédiments est décrite Figure C2.



Figure C2: installation des sondes dans les sédiments de la rivière. La mise en place des sondes dans des petits tubes PVC crépinés adaptés à chaque type de sonde. Les tubes PVC sont enterrés en effectuant des pré-trous à l'aide de pieux métalliques avec un système de pilon. Ce protocole d'installation nécessite trois personnes pour être efficace sur la Sélune dont le lit est résistant.

Parallèlement, le laboratoire ARMINES développe des dispositifs Molonari (Figure C3) qui permettent la mesure des différentiels de pression dans les sédiments et par là même, des flux d'eau au sein de la matrice sédimentaire. Cinq Molonari ont été conçus et installés sur les sites. Avant d'être installés, les Molonari nécessitent d'être calibrés en laboratoire pour corriger l'effet de la température sur le capteur de pression différentiel. Les variations de température du milieu peuvent, en effet, induire des dérives du signal qui dégradent la précision du signal par un facteur 10.

Les sondes ont également été testées en laboratoire pour être inter-comparées de manière à pouvoir estimer les gammes d'incertitudes quand on compare les résultats sur les différentes stations.

Le choix des sites pour installer les équipements à Virey et à la Poissonnière a suivi un objectif de

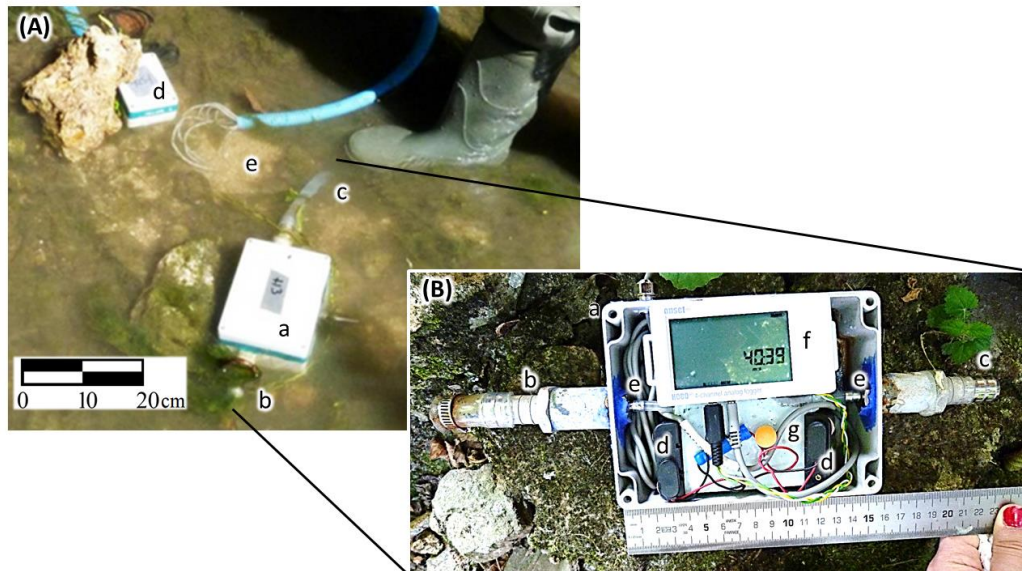


Figure C3 : (A) Installation de Molonari pour la mesure des flux d'eau hyporhéiques : a- boîtier Molonari, b- prise d'eau rivière, c- prise d'eau dans les sédiments, d- boîtier profil de température, e- sondes de température enfouies dans les sédiments ; (B) intérieur boîtier Molonari : f- datalogger, g- capteur de pression différentiel, d- lest.

mesurer les flux au travers de dépôts sédimentaires grossiers en positionnant un jeu complet sur le front amont et aval du dépôt. A Signy, la logique de mise en place a été de

suivre les flux au travers de deux frayères en positionnant un jeu complet au sommet de deux hauts bathymétriques que nous avons supposé être d'anciennes frayères. Les distances amont/aval entre les jeux de sondes à Virey, La Poissonnière et Signy sont respectivement 11, 30 et 50 mètres pour des dénivelés de quelques dizaines de cm. A Virey et La Poissonnière, les corps sédimentaires induisent un rétrécissement de la section d'écoulement de plus de 50% hors crue et correspondent à une zone d'accélération du flux et de radier rapide selon la nomenclature de Malavoi et Souchon (2002). Ces corps sédimentaires ne sont immergés qu'en période de crue. A Signy, les stations correspondent à une zone de radier sur toute la largeur de la section transversale.

4.1.2 Détermination du sens des flux d'eau dans la zone hyporhénique

4.1.2.1 Variabilité des échanges entre la nappe et la rivière

Une première approche, pour établir le sens des flux d'eau dans le lit de la rivière, consiste à comparer les cotes relatives du toit de la nappe dans les berges et de la rivière. Si le toit de la nappe est plus élevé que la rivière, le gradient hydraulique qui en résulte impose un écoulement sous-terrain de la nappe vers la rivière et donc d'une exfiltration d'eau de nappe au travers du lit. Inversement, une rivière de cote plus élevée que celle du toit de la nappe impose une infiltration d'eau de rivière dans le lit de la rivière.

Les possibilités d'installations de piézomètres sur les sites choisis pour cette étude ont été très réduites. Seul le site de Signy a permis de faire un suivi de nappe pendant une période en 2022 et 2023 (Figure C4). Il a été possible de comparer les cotes de la nappe avec les cotes des niveaux d'eau observés aux deux sites où ont été installés les sondes pour le suivi physico-chimique. Ces données montrent un gradient nappe/rievière positif une grande partie du temps. Ce gradient s'inverse pendant les pics de crue. La différence de cotes est de l'ordre d'une trentaine de cm pendant la période d'étiage et peut atteindre - 50 cm pendant les pics de crue selon l'intensité des crues.

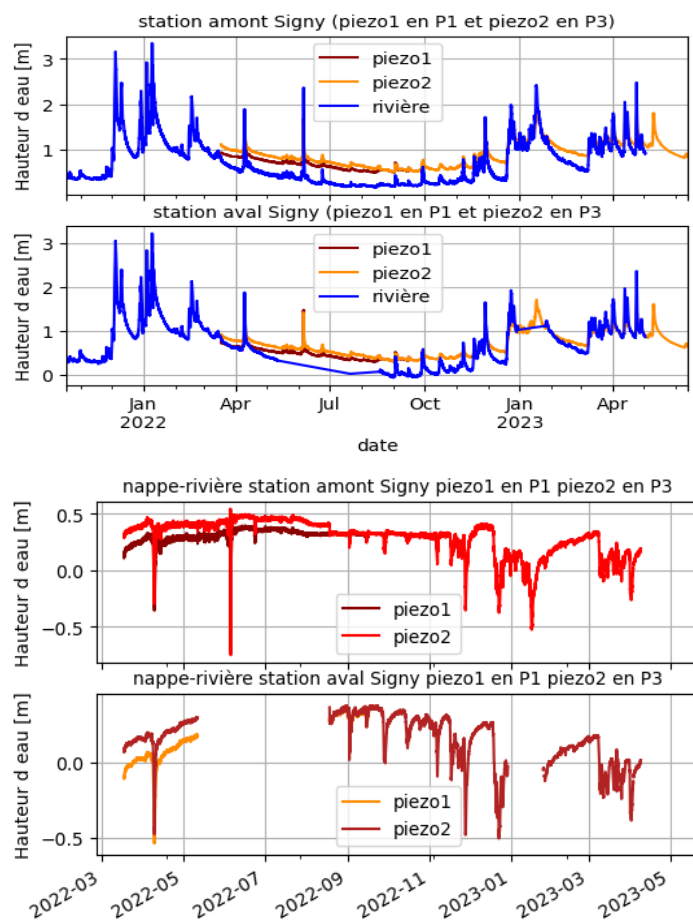


Figure C4: niveaux d'eau mesurés aux stations de mesure amont (haut) et aval (bas) sur le site de Signy. Les courbes orange et marron correspondent aux cotes du toit de la nappe mesurées dans les piézomètres 1 et 2 sur la rive droite du site de bas Montmorel. Noter que le piézomètre 1 est le plus proche de la rivière. Les deux graphiques du bas représentent les différences de cotes entre le toit de la nappe et le niveau de l'eau aux deux stations.

A noter que les deux piézomètres installés dans le méandre du bas Montmorel ne sont pas installés perpendiculairement aux deux stations amont et aval de suivi physico-chimique mais respectivement à 100 m et 150 m en amont. Cette disposition des points de mesure induit une incertitude sur les valeurs effectives de différences de cotes. En effet, la mesure des gradients hydrauliques entre la nappe et la rivière doit s'effectuer si possible perpendiculairement aux courbes isopièzes du toit de la nappe. Isopièzes que l'on peut en première approximation supposer parallèles à la rive de la rivière. La mesure de la cote de la surface d'eau dans la rivière devrait donc s'effectuer au droit du transect de piézomètres. Si l'on tient compte de la pente moyenne de la surface de l'eau de la Sélune à Signy (10^{-3}), il faut retrancher aux valeurs de différences calculées, 10 cm à 15 cm. Ce qui ne change pas fondamentalement le résultat sur les sens des flux d'eau entre la nappe et la rivière. On constate également que la cote de la nappe au piézomètre 2, qui est le plus éloigné de la rive, est au-dessus de la cote au piézomètre 1. Ce qui confirme un sens de flux d'eau allant vers la rive.

Ce résultat contredit les observations réalisées sur l'ensemble des piézomètres du champ de pompage du Bas Montmorel. Observations qui montrent indéniablement des gradients négatifs. Avec un toit de nappe qui forme un cône de déflexion vers le puits de pompage situé dans le méandre et donc un sens des flux d'eau de la rivière vers la nappe. Une vérification des cotes des installations s'impose pour confirmer les différences trouvées dans cette étude.

4.1.2.2 Variabilité du gradient de pression dans les premiers cm du lit de la rivière

Une deuxième approche pour établir le sens des flux d'eau dans la zone hyporhéique est de mesurer le différentiel de pression d'eau entre la surface des sédiments et une profondeur donnée dans les sédiments. Les capteurs de pression différentiels Molonari installés aux différentes stations de suivi physico-chimiques ont permis de réaliser ce type de mesures (Figure C5).

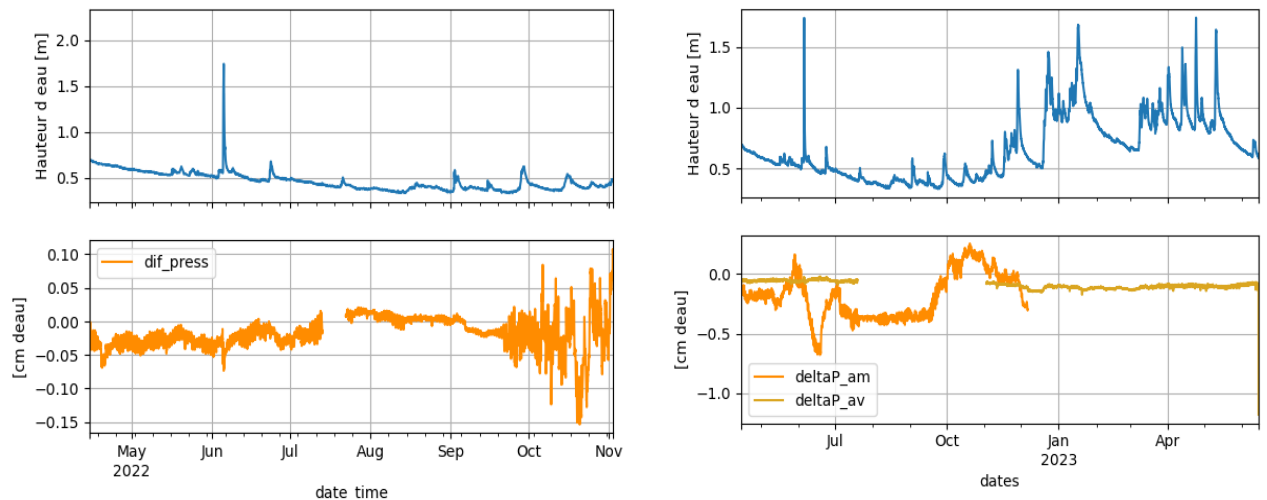


Figure C5: hydrogramme et variabilité de la pression différentielle d'eau entre la surface des sédiments et 30 cm de profondeur aux stations de Virey (colonne de gauche) et Signy (colonne de droite) pour différentes périodes. A Signy, la pression différentielle est enregistrée aux deux stations amont (deltaP_am) et aval (deltaP_av). Une pression différentielle négative correspond à une infiltration de l'eau de la rivière vers la nappe et inversement.

Les données montrent des variations de pression différentielle (dP) différentes selon les stations. A chaque station correspond une dynamique de dP spécifique :

- A Virey, la variabilité temporelle de dP décrit trois grandes phases : un dP négatif d'avril à mi-juillet 2022, un dP positif proche de zéro de mi-juillet à septembre 2023, un dP erratique ensuite. Ces trois grandes phases correspondent respectivement à une phase d'infiltration, de flux quasi nul et d'un problème technique.
- A Signy, les deux stations présentent des dynamiques de dP différentes. A la station amont, le dP montre des fluctuations mensuelles importantes avec des valeurs négatives de mai à octobre 2022 et des valeurs positives entre octobre et novembre 2022. A la station aval, le dP varie très peu pendant près d'un an avec des valeurs négatives de quelques centimètres d'eau.

Nous pouvons en conclure que la dynamique de dP ne peut pas être significative d'un site et d'une surface de rivière supérieure à une dizaine de m². Pour explorer l'échelle limite à laquelle une mesure de dP peut être significative, deux dispositifs Molonari ont été installés à 2 mètres de distance en amont d'un corps sédimentaire sur le site de la Poissonnière. Les données acquises sur une période de plusieurs mois ont montré une très bonne cohérence avec une bonne reproductibilité entre les dP de ces deux dispositifs. Ces résultats indiquent que le dP mesuré en un point est représentatif d'un contexte sur quelques m² mais pas au-delà.

La sensibilité des dP aux variations de niveau d'eau est variable voire nulle selon les stations. Seul l'évènement de crue du 5 juin 2022 semble avoir engendré une réponse en termes de dP. On constate en effet sur deux stations (Virey et Signy amont), un signal identique à cette date avec une augmentation puis une baisse et un retour au niveau initial. A Virey, cette fluctuation est très ténue et de durée similaire à celle de la crue. A Signy amont, le signal est 10 fois plus ample avec une durée 10 fois supérieure à celle de la crue. Cette covariation laisse à penser qu'une augmentation importante du niveau d'eau peut engendrer une augmentation de l'intensité de l'infiltration de l'eau de la rivière dans la zone hyporhéique. Mais cette observation n'est pas reproduite sur l'ensemble de la période d'observation quelle que soit la station. Les données ne permettent pas une généralisation d'une relation claire entre le dP et la variabilité temporelle du niveau d'eau.

4.1.2.3 Variabilité des gradients de conductivité électrique de l'eau dans le lit de la rivière

Le gradient de conductivité de l'eau poral est également un autre indicateur intéressant pour déterminer le sens des flux dans la zone hyporhéique. La conductivité de l'eau porale dans la nappe est bien souvent supérieure à la conductivité de l'eau de la rivière. La variabilité temporelle de la conductivité de l'eau porale dans la zone hyporhéique résultera de l'évolution du mélange en fonction des parts respectives d'eaux porales issues de la nappe et de la rivière. Une augmentation de la conductivité marquera un apport d'eau de nappe et inversement, une diminution de la conductivité marquera une infiltration d'eau de la rivière.

Si la conductivité dans les sédiments a été suivie sur les trois sites, c'est à Signy que nous pouvons avoir un jeu de données qui intègre la mesure de la conductivité de la nappe du fait de la présence des piézomètres.

Les chroniques de conductivité présentent des gammes de fréquences différentes selon la profondeur du conductimètre. Plus il est profond, moins il y a de variations hautes fréquences marquées dans le signal (Figure C6). Toutes les chroniques montrent des variations saisonnières de la conductivité avec un resserrement des valeurs de conductivité entre la rivière et la nappe pendant la phase d'étiage. Pendant cette phase, la rareté des pluies induit une alimentation en eau de la rivière par les écoulements de nappe profonds et donc de l'eau ayant séjourné plus longtemps dans le sous-sol et donc plus chargée en minéraux. Au retour des pluies en automne, la part de l'eau ruisselée en surface et

subsurface dans le débit de la Sélune, augmente. Ce volume transite trop rapidement dans le sol et le sous-sol pour augmenter sa charge en minéraux de manière importante.

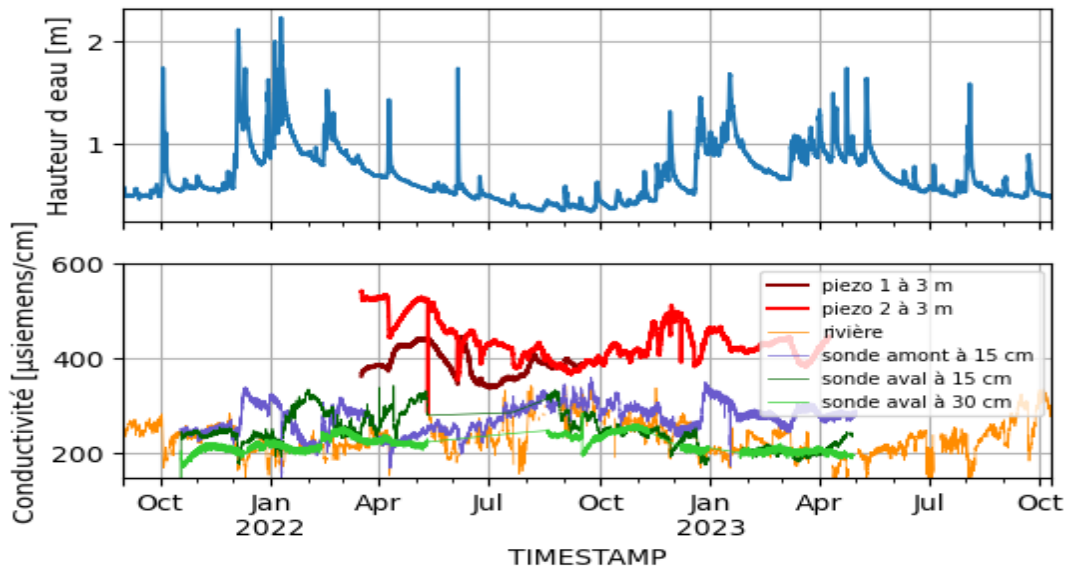
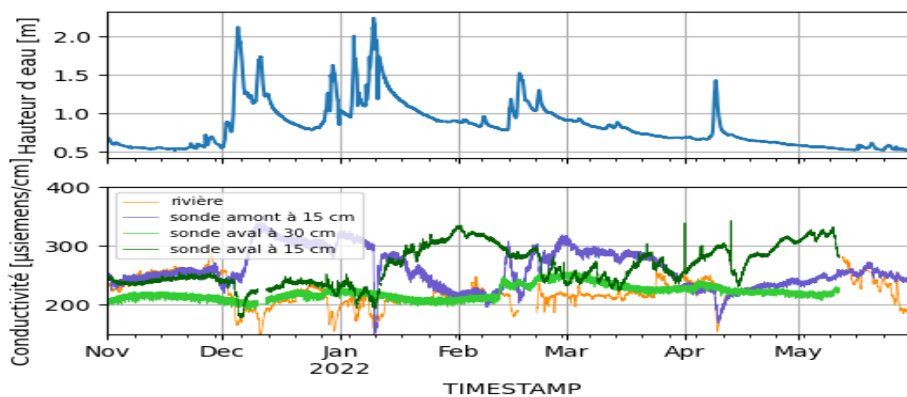


Figure C6 : Chronique des niveaux d'eau et de la conductivité de l'eau à différentes profondeurs sur le site de Signy. Les données des piézomètres 1 et 2 correspondent à la conductivité de la nappe. Point d'attention : la sonde aval à 30 cm est vraisemblablement décalibrée. Son signal devrait se situer entre les signaux des sondes à 15 cm et ceux des piézomètres.

Les variations mensuelles, hebdomadaires et journalières présentent des schémas plus complexes. A noter, que la chronique de conductivité de l'eau de la sonde à Signy sur la station aval à 30 cm présente peut de variations marquées en dehors des variations saisonnières. On en conclut que les fluctuations journalières et hebdomadaires ne se propagent pas à 30 cm de profondeur. Cette chronique présente néanmoins une anomalie avec un signal moyen la plupart du temps inférieur à la conductivité de l'eau de la rivière et de l'eau porale à 15 cm. Ce qui, chimiquement, est impossible. Nous supposons un défaut de calibration de la sonde lors de son installation. Le niveau moyen de conductivité pour cette sonde devrait se situer entre celui de la conductivité mesurée à 15 cm de profondeur et celui de la nappe.

A signy, les signaux de conductivité des deux sondes positionnées à 15 cm semblent assez sensibles aux variations de débit dans la rivière. Elles présentent cependant des différences notables quant à la correspondance avec l'hydrogramme de la rivière (Figure C7).



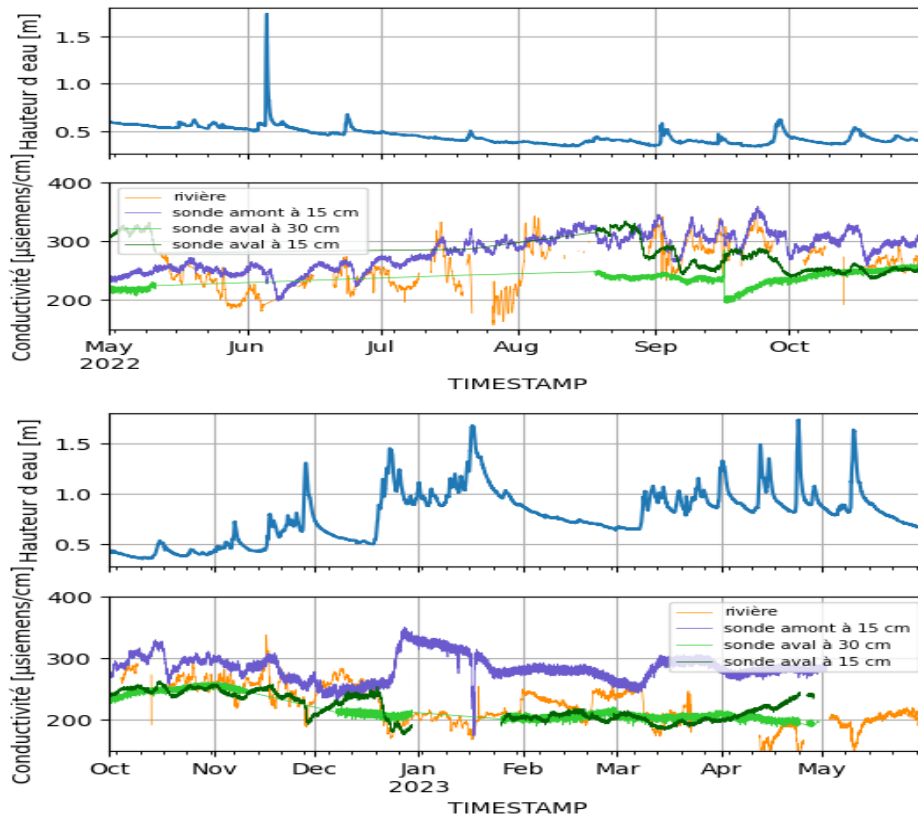


Figure C7 : hydrogramme à Signy et variations du signal de conductivité enregistrées aux stations amont et aval à Signy à différentes profondeurs.

A la station amont à 15 cm de profondeur à Signy :

- L'augmentation de la conductivité est en phase avec les périodes des hautes eaux avec des valeurs qui se stabilisent autour de 300 $\mu\text{siemens/cm}$.
- En revanche, les crues ne sont pas marquées systématiquement dans le signal de conductivité. Sur la trentaine de crues d'amplitudes très variées, seules une dizaine sont marquées dans le signal de conductivité ; avec des chutes de la conductivité dont la durée est équivalente à la durée des crues.
- La conductivité est plus sensible aux hausses rapides de niveau d'eau pendant l'été 2022.
- La conductivité suit les valeurs de conductivité de l'eau de la rivière de mai à décembre 2022.

A la station aval à 15 cm de profondeur à Signy :

- La conductivité augmente pendant les phases de récession de l'hydrogramme pendant l'hiver et l'automne 2022 pour ensuite suivre jusqu'à la fin de la chronique sur les valeurs de conductivité de l'eau de la rivière.
- Pas de valeur du début mai à mi-octobre 2022.

A la station aval à 30 cm de profondeur à Signy, le signal ne montre aucune variabilité qui peut être associée à la variabilité du niveau d'eau.

Ces observations confirment le caractère local de la variabilité des valeurs de conductivité. A la station amont de Signy, hors étiage, la conductivité de l'eau porale signe l'arrivée d'eau de nappe à 15 cm. Apport d'eau de nappe qui s'amenuise progressivement pour ne plus être significatif en étiage. A la station aval de Signy, la conductivité de l'eau porale suit une dynamique inverse de novembre 2021 à mai 2022. Au-delà de mai 2022,

l'eau de la rivière est prédominante jusqu'à 15 cm de profondeur. L'impact des crues sur les variations de conductivité semble restreint à une épaisseur de 15 cm.

On observe également, notamment à la station amont de Signy, une réponse nette de la conductivité aux crues de début janvier 2022, début avril 2022 et mi-janvier 2023. Ces crues ont engendré indéniablement une infiltration d'eau de la rivière jusqu'à 15 cm. Phase rapide d'infiltration qui peut correspondre aux valeurs négatives de la différence de niveau entre la nappe et la rivière pendant ces pics de crues.

Une comparaison des signaux de conductivité avec ceux des dP sur les deux stations de mesures ne permettent pas de valider l'un ou l'autre de ces deux types de données en termes de sens d'infiltration. A la station amont, les fluctuations moyennes de dP n'ont pas d'équivalent dans le signal de conductivité (Figure C8). A la station aval, la valeur négative quasi constante du dP (Figure C5), caractéristique d'une condition d'infiltration, ne reflète pas les fluctuations importantes de la conductivité à 15 cm, dont certaines témoignent d'un apport d'eau de nappe et donc d'exfiltration.

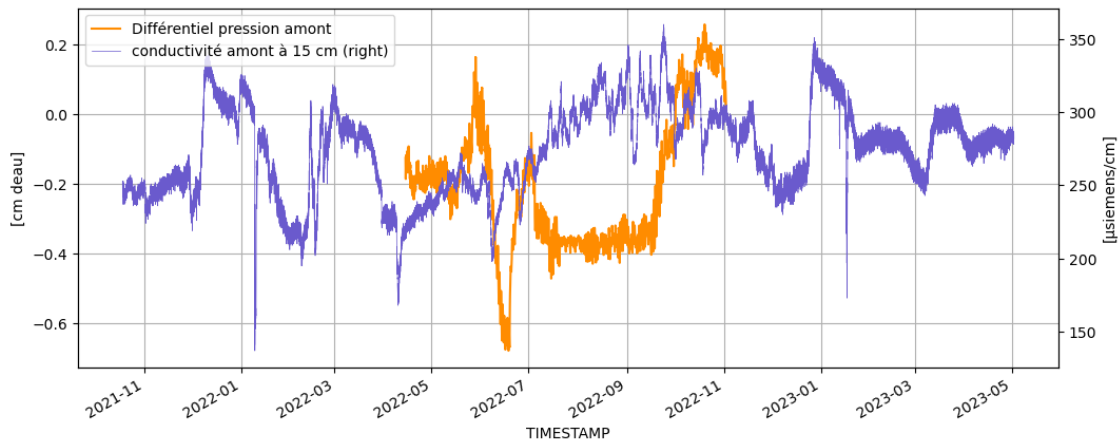


Figure C8 : Variation du différentiel de pression (échelle de gauche) et de conductivité (échelle de droite) à la station amont de Signy.

Pour conclure sur les critères utilisés pour définir le sens des échanges entre la nappe et la rivière, on constate des résultats contradictoires. Les différences de cotes entre la nappe mesurée sur la rive droite et la rivière, indiquent un sens d'écoulement de la nappe vers la rivière la majorité du temps. Ce sens s'inverse pendant des temps courts correspondants aux pics des crues. Ce schéma ne correspond pas aux données de conductivité qui indiquent des sens de flux dans la zone hyporhéique variables dans le temps avec des amplitudes et des fréquences différentes selon les stations.

Les données sur les gradients hydrauliques nappe/rievière définissent un contexte hydraulique moyen à une échelle spatiale plus large (celle du méandre) que celle des stations de mesures locales. Ces dernières sont significatives d'un contexte hydraulique beaucoup plus local (quelques m² sur une trentaine de cm d'épaisseur). Une hypothèse explicative serait l'existence de zones d'exfiltration concomitantes à des zones d'infiltration. La somme des flux à l'échelle du méandre étant contrainte par le gradient de charge hydraulique nappe/rievière. Cette configuration de circulation des flux implique des divergences et de resserrements des lignes de flux complexes dans l'épaisseur superficielle du lit de la rivière entre 15 cm et 30 cm. La distribution spatiale des lignes de flux pouvant engendrer des boucles de lignes de courants hyporhéiques sur une certaine épaisseur du lit de la rivière avec une composante longitudinale amont/aval. Un tel schéma conceptuel correspond à ceux proposés dans la littérature (Binley et al., 2014, Stewardson et al, 2016).

4.1.3 Crues et concentrations en oxygène dissous de la Zone hyporhéique

Les variations d'oxygène dissous (OD) de la zone hyporhéique résultent de couplages entre : les flux de nappe (anoxiques), les flux d'eau de la rivière (à saturation), les processus d'oxydation de la matière organique ou minérale, et de l'activité bactérienne. Initialement dans le projet LEARN, il était prévu de documenter la chimie de la zone hyporhéique avec des données originales sur les gaz dissous autre que l'oxygène. Cette tâche importante du projet n'a pas pu être réalisée pour des raisons de recrutement de moyens humains. L'OD a pu être néanmoins suivi parallèlement aux variables physiques. Une analyse des chroniques obtenues est présentée ci-dessous.

Les chroniques OD présentent une variabilité temporelle à plusieurs échelles de temps (Figure C9, C10a et b, C11a et b). Avec des variations qui peuvent dépasser les 50 % de saturation en quelques heures et les 100 % de saturation en quelques jours. Les gradients OD sont très prononcés de 0 à 30 cm avec des valeurs de saturation qui diminuent de 50 % à 100 % avec la profondeur. Dans leur grande majorité, les valeurs OD à 30 cm sont inférieures à celles à 15 cm, en cohérence avec des valeurs à saturation dans la rivière et des valeurs nulles dans la nappe. Aux stations de Virey, OD à 30 cm est 20% à 40% du temps inférieure à 2% de saturation 40% du temps. Aux stations de Signy, OD à 30 cm est 75% du temps inférieure à 1% de saturation. Cet appauvrissement rapide de l'OD à 30 cm marque une épaisseur limite, autour de 30 cm, dans laquelle l'essentiel des variations OD et de conductivité d'eau porale ont lieu.

4.1.3.1 Débits d'eau et oxygène dissous dans la zone hyporhéique

Les chroniques OD obtenues en rivière à 15 cm et 30 cm de profondeur montrent un impact notable et reproductible sur toutes les stations des niveaux d'eau sur les concentrations en OD. A la station aval de Virey, le signal à 15 cm montre une anti-corrélation claire avec les événements de crue. Un corrélogramme entre l'hydrogramme et l'OD à 15 cm atteint une valeur de -0,8 avec un écart de temps de 1 heure sur des périodes de plusieurs mois (mars à avril 2023). Si l'anti-corrélation n'est pas toujours aussi bonne sur toutes les stations et aux deux profondeurs, c'est en partie dû à l'effondrement de la concentration en OD entre 0 et 0,6 % de saturation (0 et 0,05 mg/l) sur des durées d'observation cumulées non négligeables.

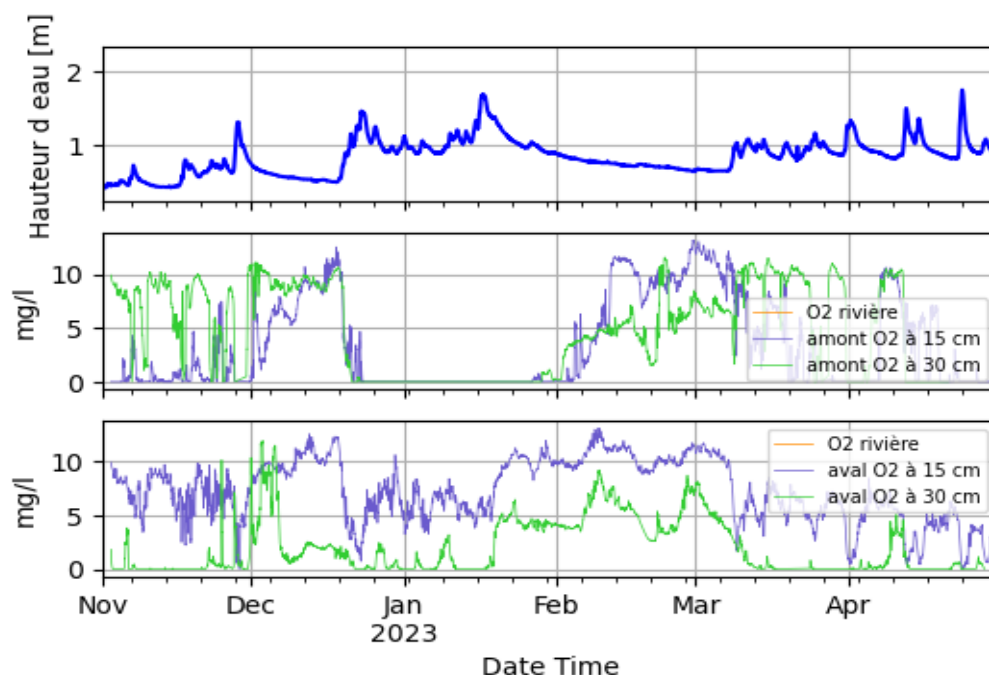


Figure C9: hydrogramme (haut) et variation des concentrations en oxygène dissous aux stations amont(milieu) et aval(bas) à Virey

Une observation récurrente sur l'ensemble des données OD, est la concomitance des taux d'O₂ les plus importants des chroniques avec les phases d'étiage. Les niveaux d'eau faibles favoriseraient l'oxygénation de la partie superficielle du lit de la rivière.

4.1.3.2 Concentration en matière en suspension dans la rivière et l'oxygène dissous dans la zone hyporhéique

A Signy les conditions sont bien plus anoxiques qu'à Virey, avec des durées importantes pendant lesquelles OD est proche de zéro à 15 cm et surtout à 30 cm, y compris pendant les phases d'étiage (Figures C10a et b, C11a et b). Le colmatage des lits de rivière par des particules fines en suspension est un processus qui engendre une anoxie du lit de rivière. Pour tester l'hypothèse d'un éventuel colmatage au niveau des stations amont et aval sur le site de Signy, les données de turbidité de l'eau à Signy ont été analysées (Figures C10a, C10b et C11).

A la station amont, l'anoxie à 15 et 30 cm correspond à l'ouverture du barrage de la Roche Qui Boit le 17 mai 2022 et le rétablissement de la continuité hydro-sédimentaire sur la Sélune. Il s'en est suivi un dépôt massif de sédiments fins à l'aval sous forme de banquettes de plus d'un mètre d'épaisseur le long des rives et un tapissage du lit de la rivière de 10 cm à 40 cm dans les dépressions du lit. Les concentrations en sédiments fins en suspension ont atteint des valeurs de plusieurs dizaines de grammes par litres. Cet événement a eu lieu en période d'étiage et ne correspond pas à une crue naturelle. Un tel transit de sédiment d'origine anthropique n'a pas d'équivalent naturel pour une rivière de plaine comme la Sélune.

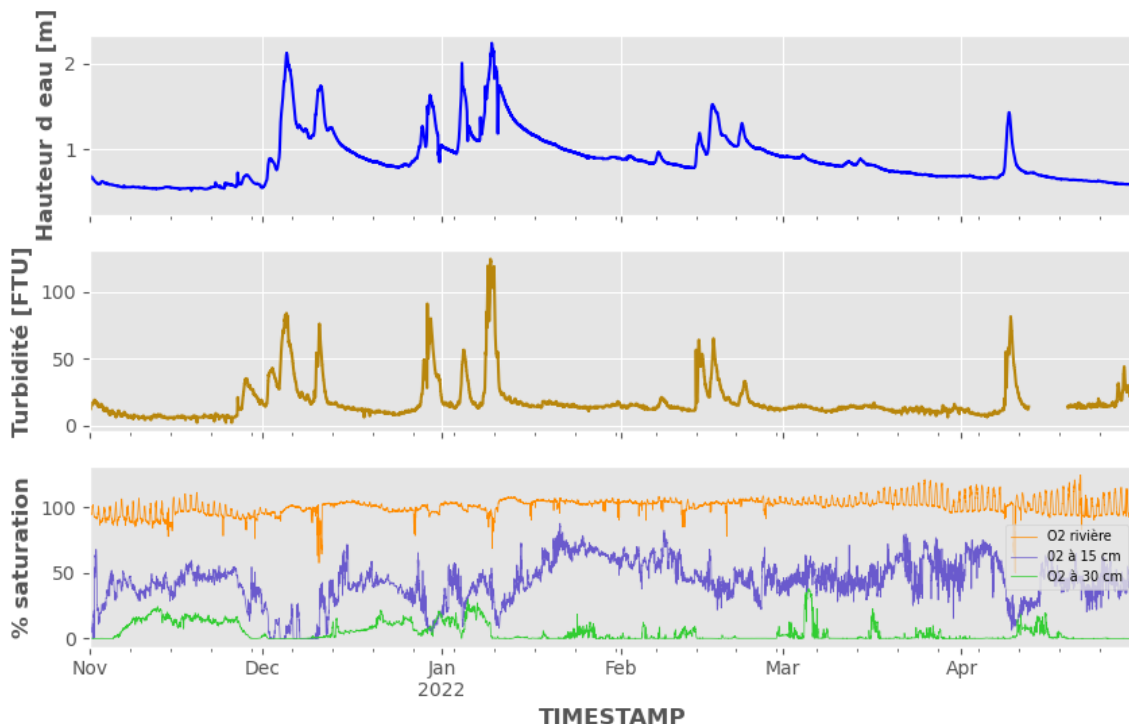


Figure C10a : hydrogramme (haut), turbidité (milieu) et variation des concentrations en oxygène dissous à la station amont à Signy

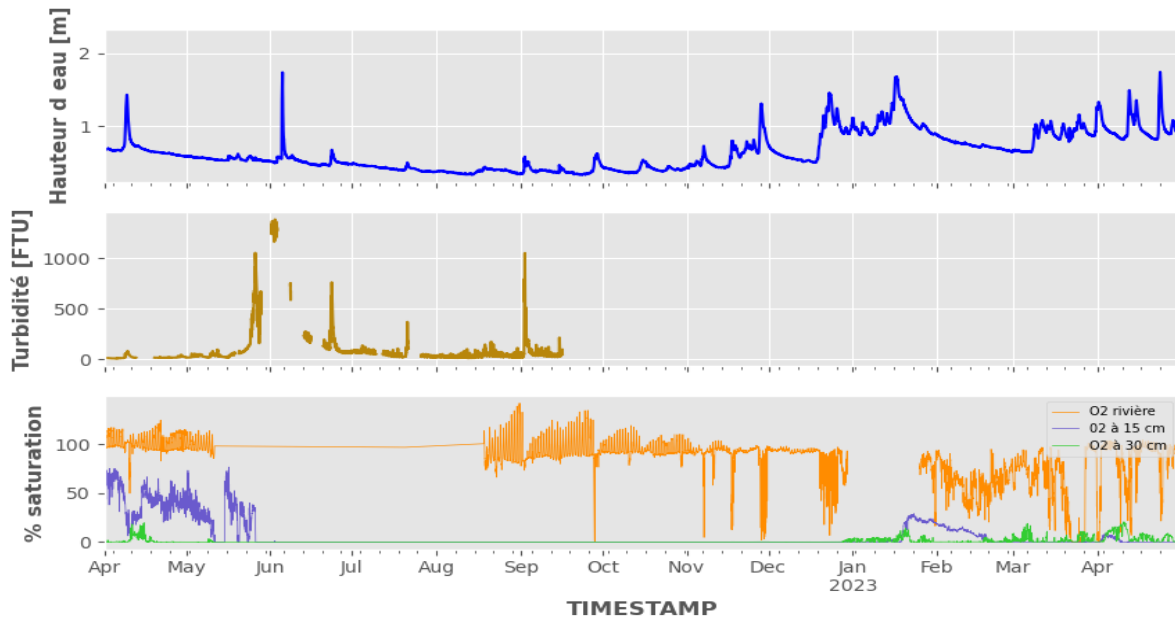


Figure C10b : hydrogramme (haut), turbidité (milieu) et variation des concentrations en oxygène dissous à la station amont à Signy

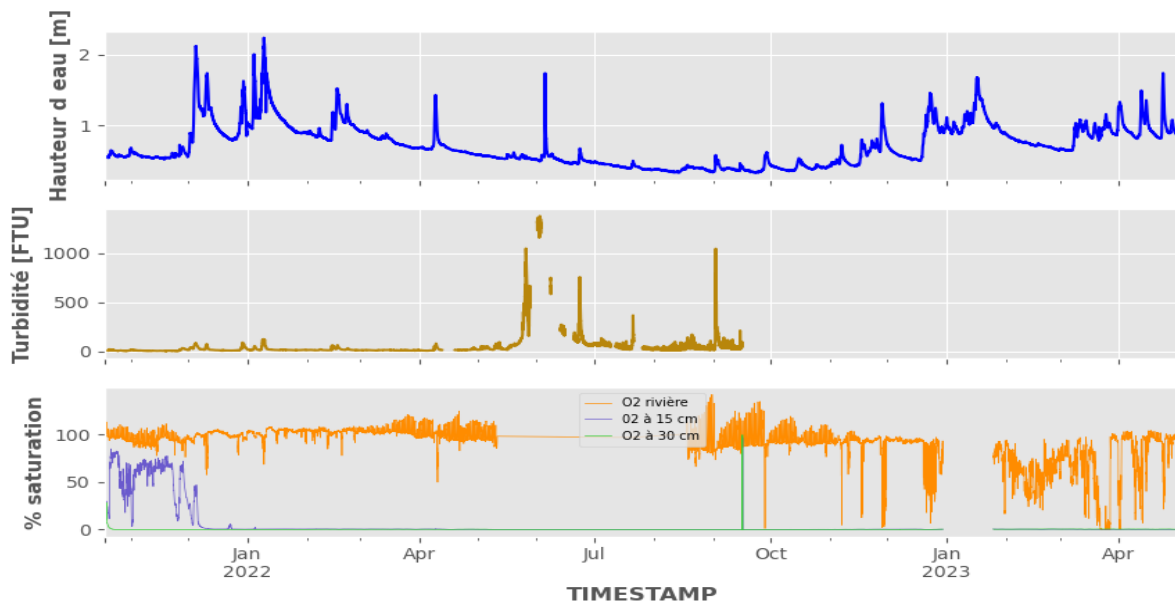


Figure C11a : hydrogramme (haut), turbidité (milieu) et variation des concentrations en oxygène dissous à la station aval à Signy

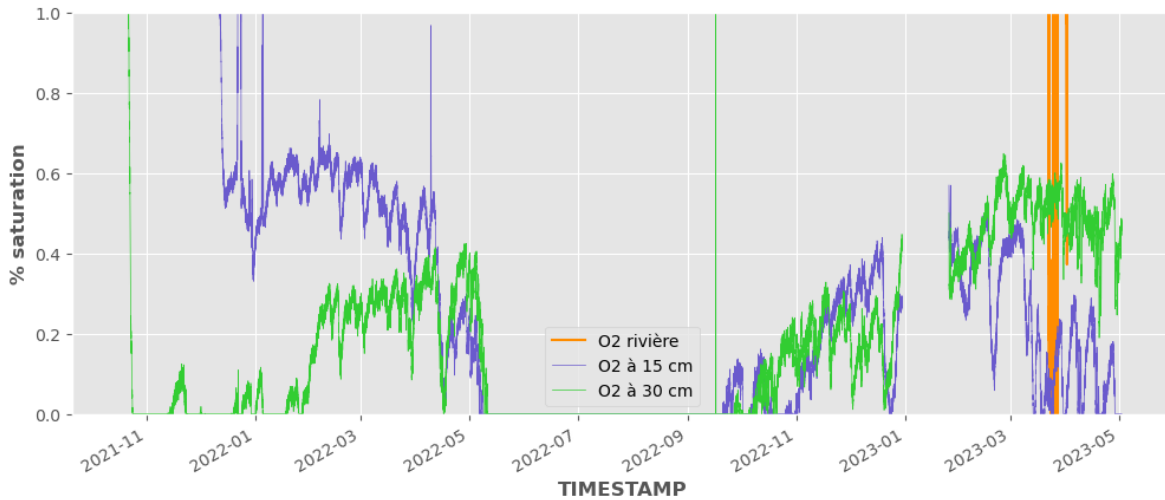


Figure C11b : variation des concentrations en oxygène dissous à la station aval à Signy avec une échelle de 0 à 1% de saturation

Les conditions d'anoxie stricte correspondent à cet évènement pour les deux stations. Un retour aux conditions antérieures s'observe à partir du mois d'octobre 2022 avec les premières crues de faible amplitude de l'automne (Figure C11b). Cet évènement sédimentaire à de toute évidence été la cause d'une anoxie prolongée aux deux stations et vraisemblablement sur une grande partie de la surface du lit.

Si l'évènement majeur de mai 2022 a eu un impact certain sur l'OD dans la zone hyporhéique à Signy, l'impact des évènements plus naturels de turbidité pendant les crues est moins évident. A la station amont de Signy, les fluctuations des concentrations en OD suivent la dynamique des niveaux d'eau et de turbidité. Si les diminutions rapides de l'OD correspondent à un colmatage du lit, le retour aux valeurs antérieures à la crue suivant la même dynamique de décroissance des niveaux d'eau, suggère un décolmatage tout aussi rapide. Une telle séquence de colmatage pour des vitesses d'eau supérieures aux vitesses d'eau qui engendreraient le décolmatage, est contradictoire. Les fluctuations OD pendant les crues sont plus probablement engendrées par des variations de sens des flux d'eau que du colmatage au sein de la zone des premiers 30 cm.

4.1.4 Conclusion et perspectives

L'analyse de la variabilité des paramètres physico-chimique ne permet pas de dégager un schéma explicatif général qui puisse s'appliquer à l'ensemble des sites. La plupart des paramètres présente des variabilités différentes selon les stations au sein d'un même site. Cette disparité spatiale indique a priori une hétérogénéité de l'amplitude et des sens de réponses physico-chimiques à des forçages comme le gradient hydraulique nappe/rivière, le niveau d'eau ou le débit dans la rivière. Nous avons, dans la mesure du possible, choisi des sites qui nous semblent similaires en termes de configuration de bathymétrie ou de localisation par rapport aux faciès d'écoulement. Cette similarité des contextes ne coïncide pas avec une reproductibilité significative dans les données.

Un des points les plus difficiles à comprendre est la non concordance temporelle des différents critères, que nous avons quantifiés pour définir les phases d'infiltration et d'exfiltration dans le lit de la rivière. Les niveaux relatifs de la nappe par rapport à la rivière indiquent un contexte d'exfiltration de l'eau de nappe dans la rivière en dehors des pointes de crues. La différence de cote entre la nappe et la rivière augmente pendant les phases de récession du débit et devrait augmenter l'exfiltration d'eau de nappe à faible teneur en oxygène et forte conductivité. Ce n'est pas ce que l'on observe. Les variations de pression différentielle, entre la surface et 30 cm de profondeur dans le lit de la rivière, ne

correspondent à aucune des variations de hauteurs d'eau, de conductivité ou d'oxygène dissous. Ceci suggère soit des erreurs de mesures liées à une mauvaise calibration des appareils, ou des cotes relatives des niveaux piézométriques erronées. Un contrôle des instruments et de leurs positionnements relatifs est nécessaire.

Les chroniques de conductivité montrent que les échanges hyporhéiques sont les plus variables sur une épaisseur limitée à environ 30 cm. Au-delà de cette profondeur la conductivité varie assez peu contrairement à ce que l'on peut observer à 15 cm. A 15 cm, les fluctuations saisonnières sont en lien avec les phases de recharge de la nappe et d'étiage. Mais les données entre les stations ne montrent pas les mêmes phases saisonnières.

Les chroniques OD montrent au premier ordre une relation nette avec les variations de hauteurs d'eau. Avec des valeurs qui tendent vers l'anoxie pendant les phases de crues. L'augmentation de la concentration des particules fines pendant la montée de crue pourrait expliquer un colmatage du lit de la rivière. En revanche, le lessivage efficace de ces particules fines pendant la descente de crue, les variations de conductivité de l'eau porale dans la zone des 15 cm et les valeurs de pressions différentielles non nulles, suggèrent des circulations d'eau dans cette zone pendant les crues. Donc l'absence de colmatage. In fine, le retour aux valeurs d'oxygène dissous antérieures à la crue, dès la crue passée, démontre l'impact nul des crues en termes de colmatage éventuel du lit. Les chutes OD pendant les crues seraient plutôt imputables à une exfiltration de flux d'eau de nappe

Le dépôt majeur de sédiments fins à Signy, lors de l'épisode du rétablissement de la continuité hydro-sédimentaire, a engendré une anoxie prolongée de 6 mois du lit de la rivière. Avec l'érosion progressive des sédiments fins déposés par les crues d'automne 2022, les teneurs en oxygène de la zone hyporhéique augmentent très lentement. En février 2023, les teneurs en oxygènes étaient inférieures à 10% des valeurs de saturation.

Afin d'apporter des données supplémentaires pour clarifier l'interprétation du jeu de données, le suivi des variables physico-chimiques sera poursuivi dans la mesure des moyens techniques disponibles. Un contrôle systématique supplémentaire du bon fonctionnement des appareils est nécessaire pour corriger les dérives analogiques éventuelles des capteurs. En termes d'analyse, les données de profils de température seront exploitées pour apporter des arguments sur le sens des flux entre 0 et 30 cm.

5 Annexe D

5.1 Dynamique des ressources en eau sur le bassin de la Sélune. Relations avec l'arasement des barrages de Vezins et la Roche qui Boit.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document public

Dynamique des ressources en eau sur le bassin de la Sélune. Relations avec l'arasement des barrages de Vezins et la Roche-qui-Boit – Contribution au projet **LEARN**

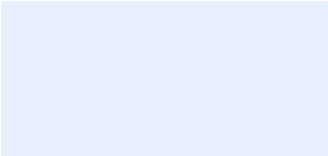
Rapport final

BRGM/RP-72849-FR

Version 1 du 12 juillet 2023

Étude réalisée dans le cadre des projets de recherche et développement

Alexandre Boisson avec la collaboration de Nicolas Cornette [CNRS/OSUR]

Vérificateur :	
Nom :	DAVID, Pierre-Yann
Fonction :	Hydrogéologue
Date :	07/10/2023
Signature :	

Approbateur :	
Nom :	DRZEWIECKI Pauline
Fonction :	Directrice Régionale
Date :	10/07/2023
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

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/yMgFcU6Ctg> ou par ce code :



Mots clés :

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

Alexandre Boisson avec la collaboration de Nicolas Cornette [CNRS/OSUR] 2023. Dynamique des ressources en eau sur le bassin de la Sélune. Relations avec l'arasement des barrages de Vezins et la Roche-qui-Boit – Contribution au projet LEARN. Rapport final V1. BRGM/RP-72849-FR, 53 p.

© BRGM, 2023, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-09/03/2023

Synthèse

Suite à la directive cadre européenne sur l'eau de 2000 imposant un bon état des cours d'eau, l'Etat avait ordonné la suppression de deux barrages hydroélectriques d'EDF dans le but de permettre à la Sélune de retrouver sa continuité écologique. L'arasement des barrages sur la Sélune pouvant avoir un impact notable sur l'hydrologie et le transfert de sédiments de la Sélune, le projet LEARN (Impact de l'arasement des barrages sur les flux hyporhéiques et les échanges nAppe Rivière de la Sélune) cherche à étudier la continuité verticale et latérale des flux d'eau entre la rivière, la zone hyporhéique, les berges et la nappe souterraine grâce à cette opportunité de suivi d'arasement de barrage. Ce projet est basé sur un partenariat entre plusieurs équipes impliquées dans les programmes d'études nationaux et internationaux sur les échanges nappe/rivière et la zone hyporhéique : CNRS, Géosciences Rennes, Ecobio, BRGM et ARMINES.

Dans le cadre de ce projet, l'implication du BRGM est orientée sur l'analyse du comportement hydrodynamique du bassin versant. Il est proposé de quantifier la dynamique des ressources à l'échelle du bassin, en faisant le lien avec les différents contextes géologiques au travers d'analyses de chroniques existantes et de modélisations. L'objectif de cette phase de l'étude est de fournir des informations sur la dynamique des ressources en eau à l'échelle du bassin versant sur la répartition des ressources sur le territoire et de mettre en lumière l'impact des barrages sur la dynamique du bassin et les mesures disponibles pour évaluer les effets de l'arasement dans le futur. Ces travaux servent aussi à caractériser les ressources, à évaluer la représentativité des expérimentations locales conduites dans le cadre du projet LEARN en évaluant les différences de conditions hydrologiques à l'échelle du bassin versant. Les analyses menées complètent aussi les projections sur l'évolution des ressources en eau du rapport BGRM/RP-71398-FR (David et al., 2022).

La présente étude par l'analyse de chroniques et la réalisation de modélisations au travers du modèle HS1D a permis de caractériser la dynamique des ressources en eau à l'échelle du bassin versant de la Sélune. Elle a permis de mettre en avant les différences de comportements entre les hauts et bas de versants qui correspondent aussi à des variations de lithologies. Elle montre que la Sélune amont est particulièrement vulnérable aux variations climatiques en raison de faibles capacités de stockage mais que les hauts de versants, bien que plus résilients à un événement de sécheresse, ont un effet mémoire pouvant atteindre 6 mois qui peut s'amplifier en cas de succession d'événements secs ou de sécheresses précoces. Les estimations des propriétés hydrodynamiques par les modélisations par versant équivalent illustrent les différences de dynamiques à l'échelle du bassin versant et fournissent des informations sur les perméabilités équivalentes de versant et des estimations de leur emmagasinement.

La vidange du barrage de Vezins a été réalisée en avril 2019 avec des travaux ayant duré jusqu'en 2020. Il est considéré que la Sélune a retrouvé son écoulement naturel au niveau de Vezins depuis mai 2019. La vidange du Barrage de la Roche-qui-Boit a débuté en mai 2022 et les travaux d'arasement ont été finalisés en avril 2023 après 10 mois de travaux.

L'effet de l'arasement des barrages ne semble pas devoir perturber les grandes dynamiques pluriannuelles des écoulements. Les variations seront principalement visibles en période d'étiage et évolueront en fonction du climat. La sécheresse de 2022 a montré que, malgré cet événement exceptionnel, les débits d'étiages sont restés suffisamment importants pour maintenir

naturellement un débit au-dessus du 10^{ème} du module à l'aval de la position des barrages (travaux en cours sur le barrage de la Roche-qui-Boit). Cependant, cette sécheresse exceptionnelle a eu lieu alors que les niveaux dans les aquifères qui permettent ce soutien d'étage étaient proches des moyennes. Or, les analyses menées montrent un effet mémoire des événements passés sur les stocks. Dans des conditions similaires mais avec un stock initialement bas en raison de faibles recharges (ex : sécheresses hivernales) sur des années précédentes, les mêmes conditions météorologiques pourraient avoir des effets sur les débits plus impactant.

La présente étude montre que, si les barrages, par le stock d'eau qu'ils permettraient de constituer, pouvaient être des éléments de la résilience du territoire face aux sécheresses, la disparition de ceux-ci, malgré les avantages environnementaux que cet arasement apporte, induit aussi potentiellement une augmentation de la vulnérabilité de la Sélune face aux sécheresses. La résilience du territoire sera dorénavant liée aux ressources souterraines (principalement les hauts de versants) dont la connaissance devra être approfondie par des suivis notamment pour une anticipation des risques.

Sommaire

1. Introduction.....	9
1.1. Contexte de l'étude	9
1.2. Objectifs	9
2. Présentation de la zone d'étude	11
2.1. Données disponibles	11
2.1.1. <i>Eaux souterraines - Piézométrie</i>	12
2.1.2. <i>Eaux superficielles - Hydrologie</i>	12
2.2. Contexte géologique.....	13
2.3. Contexte hydrogéologique.....	15
3. Résultats	16
3.1. Dynamique des débits des cours d'eau	16
3.2. Dynamique piézométrique	20
3.3. Evaluation de la contribution des eaux souterraines au soutien d'étiage	23
3.3.1. <i>Base Flow Index (BFI)</i>	23
3.3.2. <i>Périodogrammes</i>	25
3.4. Dynamique des étiages et evolution	26
<i>Dynamique de l'ensemble des stations</i>	26
3.4.1. <i>Cas de la Sélune à Saint-Aubin-de-Terregatte [Signy]</i>	27
3.4.2. <i>Cas de la Sélune à Notre-Dame-du-Touchet</i>	28
3.4.3. <i>Cas du Beuvron</i>	29
3.5. Comportement depuis l'arasement du barrage de Vezins – impact pour les prises d'eau potable	29
3.6. Modélisation et estimation des paramètres hydrodynamiques.....	30
3.6.1. <i>Fonctionnement et principes du modèle</i>	31
3.6.2. <i>Résultats</i>	33
3.7. Historique de l'évolution des ressources - Représentativité de la station débitmétrique de Vezins sur les tendances long terme	40
3.7.1. <i>Méthodologie</i>	40
3.7.2. <i>Résultats</i>	42
3.8. Délais entre les Différents compartiments hydrologiques	43
4. Conclusions.....	46
5. Références	48

Liste des illustrations

Illustration 1 : Topographie du bassin versant et localisation des stations hydrologiques et piézomètres.	11
<i>Illustration 2 : Débits spécifiques des stations du bassin (Source HydroPortail – DREAL)</i>	13
<i>Illustration 3 : Carte géologique imprimée avec principales formations et éléments structuraux (Extrait de la carte géologique n°247 – Saint-Hilaire-du-Harcouet). Les tirets rouges illustrent les principales directions de fracturations et leurs liens avec les cours d'eau</i>	13
Illustration 4 : A gauche : Modèle interprétatif de la création des structures tectoniques post-hercyniennes. A droite : Déformation d'un cylindre de roches en compression avec du flambage en son centre et des zones basses (Schroëtter et al., 2020).	14
Illustration 5 : Carte géologique simplifiée avec localisation des barrages, piézomètres et stations hydrologiques.	14

Illustration 6 : Schéma conceptuel des aquifères de socle du massif armoricain : Modifié de (Schroëtter et al., 2020).	15
Illustration 7: Débit moyen journalier des cours d'eau suite à l'arasement du barrage de Vezins. En haut en échelle linéaire en bas échelle logarithmique (Période 01/06/2019 à 31/12/2023)	16
Illustration 8: Hydrogramme unitaire (échelle logarithmique) de la Sélune à Ducey [SIGNY] avec en rouge la médiane, en bleu la moyenne et en vert les valeurs de débit de l'année 2022; Les plages grisées représentent du plus clair au plus foncé, les minimums et maximums, les premiers et derniers quartiles.	17
Illustration 9 : Débit moyen journalier des cours d'eau (Période 01/01/2010 à 01/06/2013). En haut en échelle linéaire, en bas échelle logarithmique.	18
Illustration 10 : Comparaison des chroniques de débits spécifiques des années 2011 et 2022 sur la Sélune aux stations de Saint-Aubin-de-Terregatte et Notre-Dame-Du-Touchet (Echelle logarithmique).	19
Illustration 11: Moyenne mensuelle des débits normalisés par la moyenne et l'écart-type pour l'ensemble des stations	20
Illustration 12 : Comparaison des dynamiques piézométriques sur les piézomètres de Saint-Laurent-de-Terregatte (BSS000TQJW), de Louvigné-du-Désert (BSS000TRGE) et de Mesnil-Rainfray (BSS000RCPZ).	21
Illustration 13 : Chroniques piézométriques à Saint-Laurent-de-Terregatte (en haut) et Louvigné-du-Desert (en bas). Les points rouges représentent les données manquantes.	22
Illustration 14 : Periodogrammes calculés sur les chroniques piézométriques à Saint-Laurent-de-Terregatte (en haut) et Louvigné-du-Desert (en bas).	23
Illustration 15 : Estimation du BFI pour le Beuvron à Saint-Sénier (2018-2020)	24
Illustration 16 : BFI calculés sur l'ensemble des stations du bassin	25
Illustration 17 : Exemple de périodogramme calculé à pour la station I922102001 SELUNE_St-Aubin-Terregatte [Signy]	26
Illustration 18 : Evolution des étiages aux stations présentes sur le bassin de la Sélune (en haut débits mesurés en bas débits spécifiques normalisés par l'aire drainée)	27
Illustration 19 : Evolution des étiages à la station de Saint-Aubin-de-Terregatte	28
Illustration 20 : Evolution des étiages à la station de Notre-Dame-du-Touchet	28
Illustration 21 : Comparaison des débits du Beuvron (échelle logarithmique) et des niveaux piézométriques de Louvigné-du-Desert (échelle linéaire).	29
Illustration 22 : Respect du seuil du 10 ^{ème} du module à la station de Saint-Aubin-de-Terregatte suite à l'arasement du barrage de Vezins (Barrage de la Roche-qui-Boit présent jusqu'en avril 2023).	30
Illustration 23: Sous-bassins modélisés	31
Illustration 24 : Représentation conceptuelle du schéma de modélisation hydrologique. a) Le modèle hydrométéorologique SURFEX répartit les précipitations provenant de la réanalyse SAFRAN en ruissellement de surface et infiltration à une résolution de 8 km. b) Le modèle des eaux souterraines simule l'évolution de la nappe phréatique et les processus hydrologiques sous-maille à une résolution de 25 m en utilisant l'infiltration comme donnée d'entrée. Lorsque la nappe phréatique atteint la surface, le débit d'infiltration généré est ajouté au débit de base lent et au ruissellement de surface rapide acheminé directement vers la rivière pour donner le débit de la rivière. c, d) La pente équivalente est dupliquée en deux pentes équivalentes ayant la même morphologie et les mêmes données hydroclimatiques, mais des propriétés hydrauliques effectives différentes pour représenter les variations spatiales et temporelles du débit d'infiltration et de l'écoulement de base. Les deux versants esquissent, respectivement, un versant H1 (c) à faible conductivité conduisant à une réponse rapide avec des flux d'infiltration élevés et un débit de base lent (débit H1 q1) et un versant H2 (d) à conductivité plus élevée avec une contribution prolongée après les	

périodes de recharge (débit H2 q2). e) Profil d'élévation du versant équivalent en fonction de la distance à la rivière à laquelle les processus sont modélisés. f) Les contributions des versants sont additionnées pour obtenir le débit à l'échelle du bassin hydrographique. (Cornette et al., 2022)	32
Illustration 25 : Gamme de valeurs utilisées pour l'exploration de paramètres	32
Illustration 26: Schéma de principe de la lecture des cartes d'exploration de paramètres avec deux branches de paramètres optimaux (teintes orangées/rouges) représentant le milieu. Sur la gauche, le versant 1 permettant de déterminer la perméabilité de l'aquifère régulant les écoulements les plus lents et permettant de générer les aires saturées. Sur la droite, le versant 2 permet de déterminer la diffusivité (Transmissivité/Coefficient d'emmagasinement) régulant les écoulements rapides.	34
Illustration 27: Cartes NSE pour les stations modélisées (Sélune à Notre-Dame-du-Touchet; Oir à Ducey et Beuvron à Saint-Sénier-de-Beuvron)	35
Illustration 28 : Paramètres d'optimisation des modèles	36
Illustration 29 : Comparaison des données (en rouge) et médiane des modèles (en bleu) sur le Beuvron. En haut représentation en échelle linéaire en bas en échelle logarithmique	37
Illustration 30 : Variations saisonnières de débit spécifique (médiane) et comparaison des modèles à un et deux versants. Les plages colorées représentent les premiers et derniers déciles.	38
Illustration 31 : Résultats des modèles calibrés pour la période 2004-2006. Les résultats sur l'ensemble de la période de calibration sont présentés en annexes. Les colonnes de gauche et de droite représentent respectivement les résultats pour les bassins versants de la Sélune à Notre-Dame-du-Touchet et du Beuvron à Saint-Sénier. Les bandes grises et blanches successives soulignent la période globale de récession d'avril à octobre et la période de recharge de novembre à mars. a) et b) montrent les séries temporelles d'infiltration et le ruissellement de surface données par le modèle hydrométéorologique SURFEX. c) et d) montrent les séries temporelles du débit spécifique observé (rouge) et modélisé (bleu et vert). Les courbes vertes représentent le débit médian des modèles de versant H1 sélectionnés, c'est-à-dire le versant présentant la conductivité hydraulique la plus faible. Les lignes bleues et les zones cyan représentent le cumul des débits modélisés et leur variabilité pour les deux versants équivalents H1 et H2. La différence entre les courbes bleues et vertes illustre la contribution du versant H2 moins saturé. e) et f) montrent l'évolution de la surface saturée médiane du bassin versant entre les modèles (ligne bleu marine) et sa variabilité (zone bleu marine). g) et h) montrent le rapport de débit entre les deux versants QH2/QH1. La ligne horizontale en pointillés souligne la valeur de 1 au-dessus de laquelle le débit est contrôlé de manière dominante par le versant H2 et au-dessous de laquelle il est dominé par le versant H1.	39
Illustration 32 : Décomposition des chroniques de débit de la Sélune à Saint Aubin de Terregatte (1922102001) avec en haut les données brutes journalières (en m ³ /s) et en bas les anomalies mensuelles (en noir) et anomalies lissées sur 12 mois (en rouge).	41
Illustration 33 : Evolution des écarts aux normales mensuelles lissées des différentes stations hydrométriques	42
Illustration 34: Ecart aux normales mensuelles lissées des débits journaliers aux stations de Ducey/Vezins (en rouge) et comparaison avec les autres stations disponibles.	43
Illustration 35 : Ecart aux normales mensuelles lissées des précipitations, débit de cours d'eau et piézomètres.	43
Illustration 36: Corrélogramme croisé entre anomalie de précipitations et anomalies de niveaux piézométriques à Saint-Laurent-de-Terregatte	44
Illustration 37 : Chroniques d'anomalies de précipitations (en noir), d'anomalie de niveau piézométrique (en rouge) et d'anomalie piézométrique avec ajustement temporel (en bleu – Décalage temporel de 4 mois)	44
Illustration 38 : Récapitulatifs des écarts entre anomalies de précipitations et les autres compartiments du cycle hydrologique (La Station de Signy est influencée par la présence des barrages).	45

Liste des annexes

Annexe 1	Périodogrammes des cours d'eau	49
Annexe 2	Résultats complémentaires de modélisation.....	53
Annexe 3	Résultats des modèles calibrés pour la période 2004-2006 pour l'Oir	57

1. Introduction

1.1. CONTEXTE DE L'ETUDE

Suite à la directive cadre européenne sur l'eau de 2000 imposant un bon état des cours d'eau, l'Etat avait ordonné la suppression de deux barrages hydroélectriques d'EDF dans le but de permettre à la Sélune de retrouver sa continuité écologique. Ces barrages espacés l'un de l'autre de moins de cinq kilomètres faisaient en effet obstacle aux poissons de la Sélune.

L'arasement des barrages sur la Sélune peut avoir un impact notable sur l'hydrologie et le transfert de sédiments et engendrer un décolmatage et un colmatage, respectivement à l'amont et à l'aval du lit de la Sélune. Le projet LEARN (Impact de l'arasement des barrages sur les flux hyporhéiques et les échanges nAppe Rivière de la SéluNe) cherche à étudier la continuité verticale et latérale des flux d'eau entre la rivière, la zone hyporhéique, les berges et la nappe souterraine grâce à cette opportunité unique en Europe de suivi d'arasement de barrage.

Les principales questions du projet LEARN sont orientées 1) sur les gradients physico-chimiques à l'interface eau/sédiment (des écoulements sur et dans la matrice du lit de la rivière, des biofilms et des flux d'eau entre la rivière et la nappe sous-jacente), 2) sur la distribution spatiale du colmatage et sa dynamique, 3) sur l'impact potentiel d'un colmatage de la Sélune sur la ressource en eau du Canton de Pontorson et 4) sur l'impact de l'abaissement du niveau d'eau sur l'hydrogéologie du bassin versant. Une part importante du projet est consacrée à la mise en œuvre d'une métrologie novatrice, issue des programmes de recherche nationaux et européens, pour mesurer *in situ* les flux d'eau et les concentrations en gaz dissous au sein de la matrice du lit de la rivière. Ce projet est basé sur un partenariat entre plusieurs équipes impliquées dans les programmes d'études nationaux et internationaux sur les échanges nappe/rivière et la zone hyporhéique : CNRS, Géosciences Rennes, Ecobio, BRGM et ARMINES.

Dans le cadre de ce projet, l'implication du BRGM était orientée sur l'analyse du comportement hydrodynamique du bassin versant. Il avait été initialement proposé de quantifier la dynamique des ressources à l'échelle du bassin en faisant le lien avec les différents contextes géologiques, au travers d'analyses de chroniques existantes et de modélisations. Or, en parallèle de ce projet LEARN, le BRGM a également mené une étude sur la prévision de l'évolution des débits des ressources en eau du Sud Manche à l'Horizon 2050 ((David et al., 2022); BGRM/RP-71398-FR) incluant ce type de modélisations des débits des cours d'eau via des modèles à réservoir (logiciel EROS© du BRGM). La similitude des méthodes proposées entre les deux projets a ainsi conduit à un réajustement des tâches. De ce fait, les modélisations initialement prévues au travers de modèles à réservoir via le logiciel GARDENIA© du BRGM ont été remplacées par des modélisations d'une partie des sous-bassins versants par une approche 1D permettant de représenter et qualifier la dynamique des écoulements et d'en extraire les paramètres hydrodynamiques équivalents. Les modélisations, objets du présent rapport, ont été réalisées via le code de calcul HS1D (Cornette, 2022; Courtois, 2019; Marçais et al., 2017). Dans le cadre du projet Sud Manche à l'Horizon 2050, l'interprétation en terme de variabilité de fonctionnement hydrogéologique au sein du bassin versant n'a pas été réalisée.

1.2. OBJECTIFS

L'objectif de cette phase de l'étude est de fournir des informations sur la dynamique des ressources en eaux à l'échelle du bassin versant. Au travers de l'analyse de chroniques piézométriques et hydrologiques, l'objectif est d'appréhender la répartition des ressources sur le territoire et de mettre en lumière l'impact des barrages sur la dynamique du bassin et les mesures disponibles pour évaluer les effets de l'arasement dans le futur. Ces travaux servent aussi à caractériser les ressources, à évaluer la représentativité des

expérimentations locales conduites dans le cadre du projet LEARN en évaluant les différences de conditions hydrologiques à l'échelle du bassin versant. Les analyses menées complètent aussi les projections sur l'évolution des ressources en eau du rapport BGRM/RP-71398-FR (David et al., 2022).

Une question annexe de l'étude, bien que d'importance pour le territoire dans un contexte d'évolution climatique, est de savoir si l'effet tampon de stockage des barrages peut être compensé par de nouvelles ressources en eau ou comment les éléments du territoire actuellement peu connus vont moduler la perte de ce stockage. Ceci prend en compte notamment la capacité à maintenir des débits réservés, ou en cas d'impossibilité de leur respect, à repenser ceux-ci.

2. Présentation de la zone d'étude

La Sélune est un fleuve côtier du sud du département de la Manche qui prend sa source à Saint-Cyr-du-Bailleul (50) et se jette dans la baie du Mont-Saint-Michel. Le bassin est bordé par des crêtes topographiques étirées d'ouest en est avec des altitudes pouvant dépasser 330 m (Illustration 1). Les barrages de la Roche-qui-Boit et de Vezins ont été construits respectivement en 1914 et 1927. Ces barrages sont opérés par EDF pour la production d'hydroélectricité. L'arasement de ces deux ouvrages de faible puissance hydroélectrique répond à l'engagement du Grenelle de l'environnement de rétablir la continuité écologique de ce fleuve côtier, un des tous premiers bassins à saumon de France et secteur d'action prioritaire en faveur de la restauration des populations d'anguilles. Face au constat que les barrages de Vezins et de la Roche-qui-Boit représentent des verrous infranchissables pour les poissons migrateurs sur la Sélune (3^{ème} cours d'eau en terme de potentiel à saumons), pour une production hydroélectrique relativement modérée (27 GWh soit 0,04 % de la production nationale), la décision d'arasements de ces barrages a été prise en 2009.

La vidange du barrage de Vezins a été réalisée en avril 2019 avec des travaux ayant duré jusqu'en 2020. Il est considéré que la Sélune a retrouvé son écoulement naturel depuis mai 2019. La vidange du barrage de la Roche-qui-Boit a débuté en mai 2022 et les travaux d'arasement ont été finalisés en avril 2023 après 10 mois de travaux.

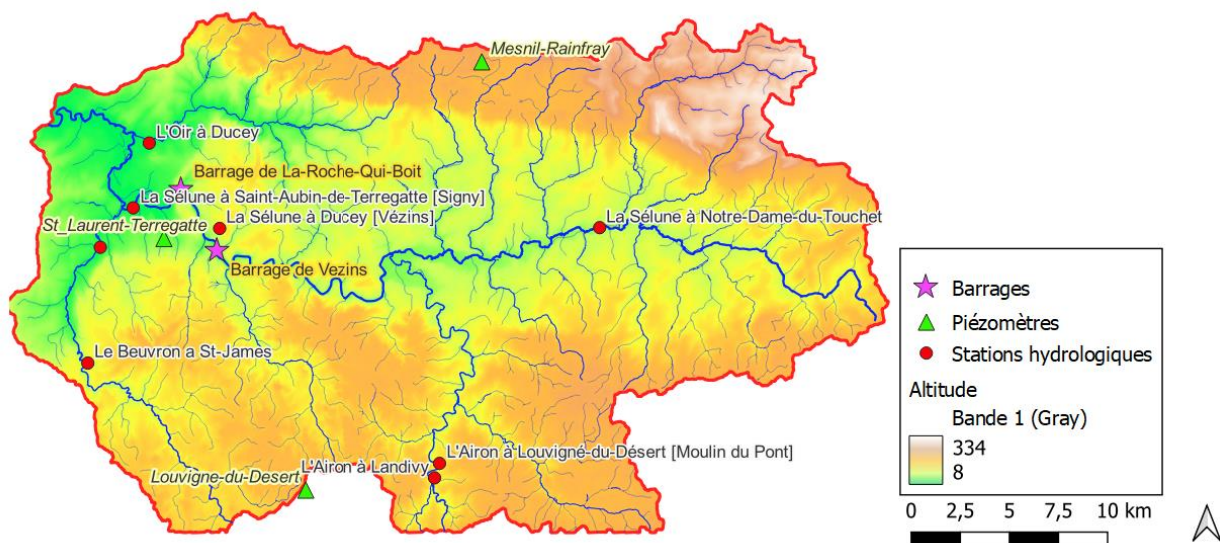


Illustration 1 : Topographie du bassin versant et localisation des stations hydrologiques et piézomètres.

2.1. DONNEES DISPONIBLES

L'acquisition de connaissances sur l'évolution des dynamiques des ressources en eau nécessite des chroniques long terme sur ces ressources. Sur ce bassin, les suivis long terme sur les eaux sont réalisés par le BRGM pour les eaux souterraines (niveaux piézométriques) et par la DREAL pour les eaux de surface (débits des cours d'eau).

2.1.1. Eaux souterraines - Piézométrie

Trois piézomètres sont présents sur ou à proximité immédiate du bassin. Ces trois points (Illustration 1) sont situés sur les communes de Saint-Laurent-de-Terregatte (BSS000TQJW), de Louvigné-du-Désert (BSS000TRGE) et de Mesnil-Rainfray sur la commune de Juvigny les Vallées (BSS000RCPZ). Les piézomètres de Saint-Laurent-de-Terregatte et Louvigné-du-Désert sont respectivement suivis depuis 2007 et 2003. Le piézomètre de Mesnil-Rainfray est plus récent avec une chronique débutant en 2019.

Le piézomètre de Louvigné-du-Désert bien que hors bassin est situé sur une formation géologique présente sur le bassin. Ce piézomètre a été utilisé dans l'étude BRGM/RP-71398-FR (David et al., 2022) et a été considéré comme représentatif de la dynamique du bassin versant.

Les données de ces piézomètres sont disponibles sur le site du réseau national ADES (<https://ades.eaufrance.fr/>).

2.1.2. Eaux superficielles - Hydrologie

Neuf stations hydrologiques sont présentes sur le bassin de la Sélune (Illustration 1). Seule une partie d'entre elles est active. Les stations de la Sélune à Ducey [Vezins] et de Airon à Louvigné-du-Désert ont été arrêtées. Celle de l'Airon à Louvigné-du-Désert a été remplacée par une station située à Landivy en 1998. Une période de 4 ans permet une comparaison entre ces deux stations de l'Airon. Les deux stations sont très proches et drainent des bassins de 150 km² et 148 km².

La station de la Sélune à Vezins est une station fictive, produite par EDF à partir des débits de sortie du barrage de Vezins dont le bassin versant est de 720 km². Débutant en 1934, elle peut être *a priori* influencée dans le temps par les règles de gestion du barrage, notamment durant l'été. Cependant, EDF indique que les données correspondent aux apports naturels reconstitués (ANR) c'est-à-dire au débit qui coulerait si le barrage n'existait pas. Les ANR sont calculés de la manière suivante : variation de réserve du lac + débit sortant du barrage (turbiné, réservé, déversé et vannes). Ces données sont issues de mesures faites sur l'exploitation puis d'abaques. Le débit reconstitué produit est lissé et comparé à des témoins de débit naturel. EDF considère que, bien qu'étant une série calculée, elle reflète avec une bonne qualité le débit moyen journalier. La qualité des données de cette station a été jugée suffisante pour la réalisation de modélisations dans l'étude du BRGM sur l'évolution des ressources en eau (Rapport BRGM/RP-71398-FR - (David et al., 2022)). La station hydrologique de la Sélune à Saint-Aubin-de-Terregatte [Signy] n'a en revanche pas été considérée dans cette étude de modélisation comme exploitable d'un point de vue hydrologique du fait de l'influence du barrage EDF amont. De même, la station de la Sélune à Ducey (aval Beuvron) est une station fictive obtenue par la somme pondérée des stations du Beuvron à Saint-Sénier et de la Sélune à Saint-Aubin-de-Terregatte [Signy]. Ces deux stations sont donc fortement influencées par les barrages durant la période précédant leur arasement.

Les données de ces stations sont disponibles sur le site HydroPortail (<https://hydro.eaufrance.fr/>), qui fournit aussi des statistiques sur les écoulements. Les débits spécifiques de certaines stations sont notamment reportés sur l'illustration 2 et montrent un débit spécifique plus important de la Sélune à la Station de Notre-Dame-du-Touchet (12,7 l/s/km²). Le débit spécifique est le plus faible pour le Beuvron (10,3 l/s/km²).

Stations de mesures	Débits spécifiques l/s/km ²
L'Oir à Ducey	11,9
Le Beuvron à Saint-Sénier-de Beuvron	10,3
Sélune à Notre Dame-du-Touchet	12,7
Sélune à Saint-Aubin-de-Terregatte	11,3

Illustration 2 : Débits spécifiques des stations du bassin (Source HydroPortail – DREAL)

2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE

Les principales formations de la zone sont les granodiorites cadomiens, ainsi que les schistes et grès briovériens (Illustration 3). Les formations briovériennes sont les formations les plus anciennes du secteur. Ces formations détritiques présentent des alternances de niveaux wackeux, silteux et argileux. Ces formations sont plissées et métamorphosées autour du massif granodioritique cadomien. Le batholite granodioritique cadomien est intrusif dans les formations briovériennes et fait partie du massif de Fougères.

La fracturation dominante observée sur la zone est tardive et est le produit d'une tectonique cassante polyphasée. Elle est dominée par une fracturation de direction N150° (+/- 20°) qui se dispose en relais constituant des couloirs de fracturation sur de longues distances. Les fractures N30° (+/- 20°) sont aussi bien représentées. Ces éléments structuraux résultent d'une phase de compression d'axe de raccourcissement nord-sud induisant des fractures N150° (+/- 20°) dextres et N30° senestres conjuguées dans un système cisailant. Ces orientations de fracturation contrôlent l'orientation des cours d'eau de la zone. Ces orientations de fracturation ont été identifiés sur la Bretagne comme particulièrement propices pour l'exploitation des eaux souterraines (Schroëtter et al., 2020). Une illustration du mécanisme est fournie Illustration 4.

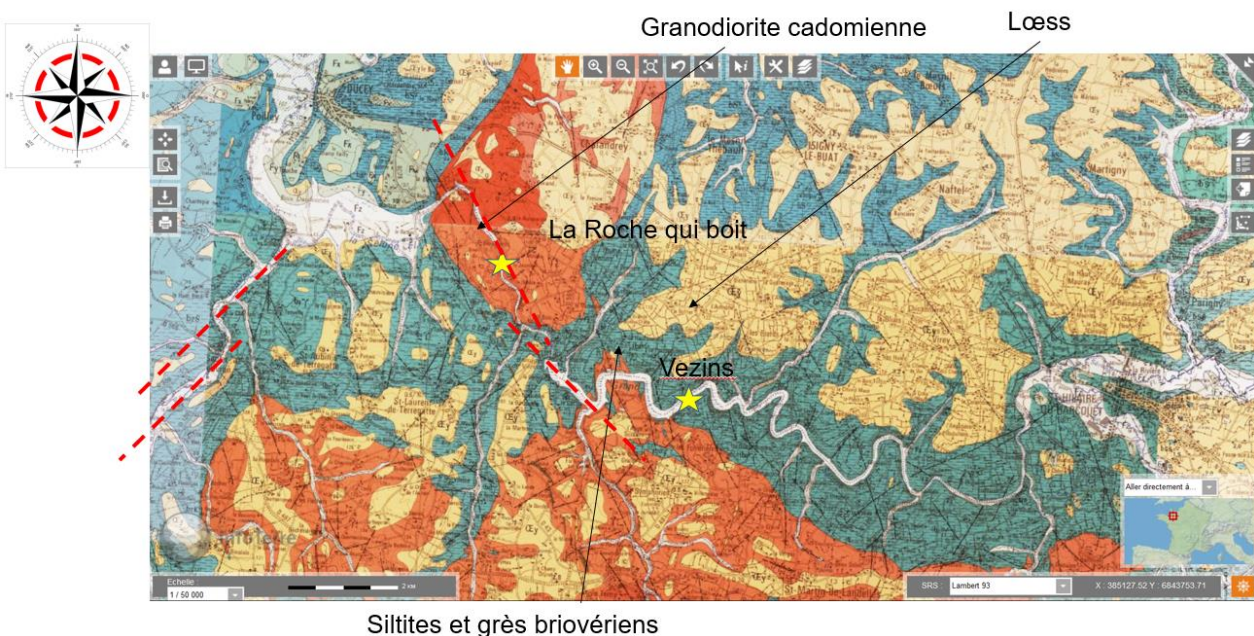


Illustration 3 : Carte géologique imprimée avec principales formations et éléments structuraux (Extrait de la carte géologique n°247 – Saint-Hilaire-du-Harcouet). Les tirets rouges illustrent les principales directions de fracturations et leurs liens avec les cours d'eau

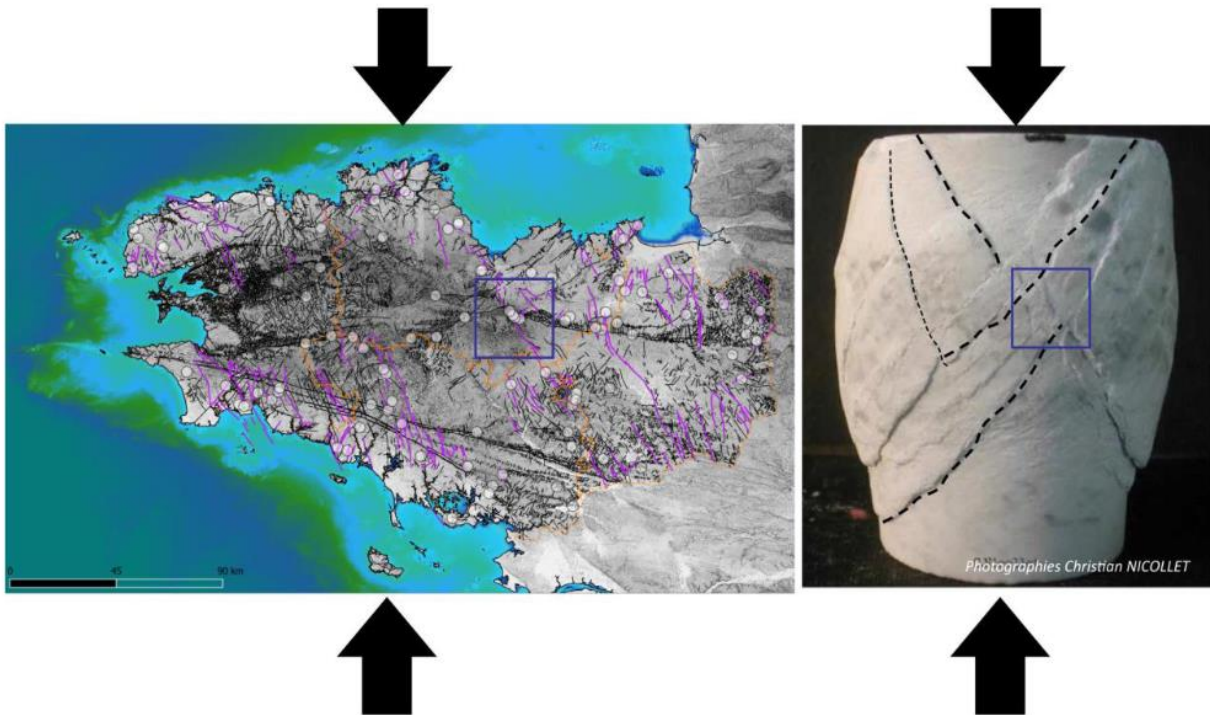


Illustration 4 : A gauche : Modèle interprétatif de la création des structures tectoniques post-hercyniennes. A droite : Déformation d'un cylindre de roches en compression avec du flambage en son centre et des zones basses (Schroëtter et al., 2020).

Une représentation simplifiée excluant les formations superficielles de la géologie du bassin est fournie Illustration 5.

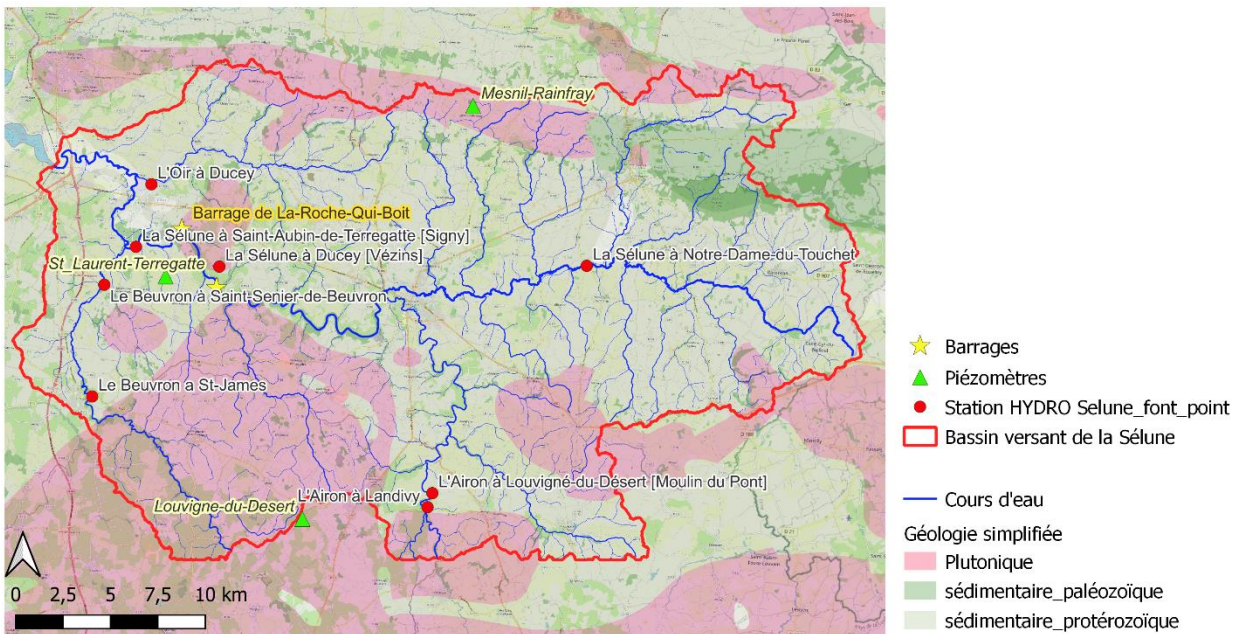


Illustration 5 : Carte géologique simplifiée avec localisation des barrages, piézomètres et stations hydrologiques.

2.3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

Les aquifères de la zone sont des aquifères de socle dans lesquels la perméabilité de la roche est héritée de l'altération et où la capacité d'écoulement est contrôlée par le développement d'un horizon fissuré. Dans ce type d'aquifère, une structure d'aquifère stratiforme découlant de l'altération peut être décrite de la surface vers la profondeur par trois zones en fonction de l'altération et de la fracturation rencontrée :

- **Les altérites** constituent un horizon meuble riche en argiles provenant de la décomposition *in situ* de la roche mère. En raison de sa composition argilo-sableuse, les altérites ont une porosité effective importante souvent comprise entre 3 et 10%. Elles sont donc souvent considérées comme ayant un **rôle capacitif**. En revanche, leur conductivité hydraulique est généralement faible en l'absence de chemins d'écoulements préférentiels et est généralement comprise entre 10^{-6} et 10^{-8} m/s.
- En dessous, l'**horizon fissuré** se caractérise par une fissuration très dense dans les premiers mètres qui décroît par la suite avec la profondeur à partir d'un maximum obtenu à l'interface entre la base des altérites et l'horizon fissuré. Dans les roches isotropes (granitoïdes) ou à foliation verticale, cette fissuration est dominée par les fractures sub-horizontales. Cet horizon fissuré peut avoir localement une forte conductivité hydraulique et assure le **rôle transmissif de l'aquifère**.
- En dessous de l'horizon fissuré, la roche saine n'est perméable que très localement à la faveur de fractures d'origine tectonique.

Une schématisation de ces aquifères est présentée Illustration 6.

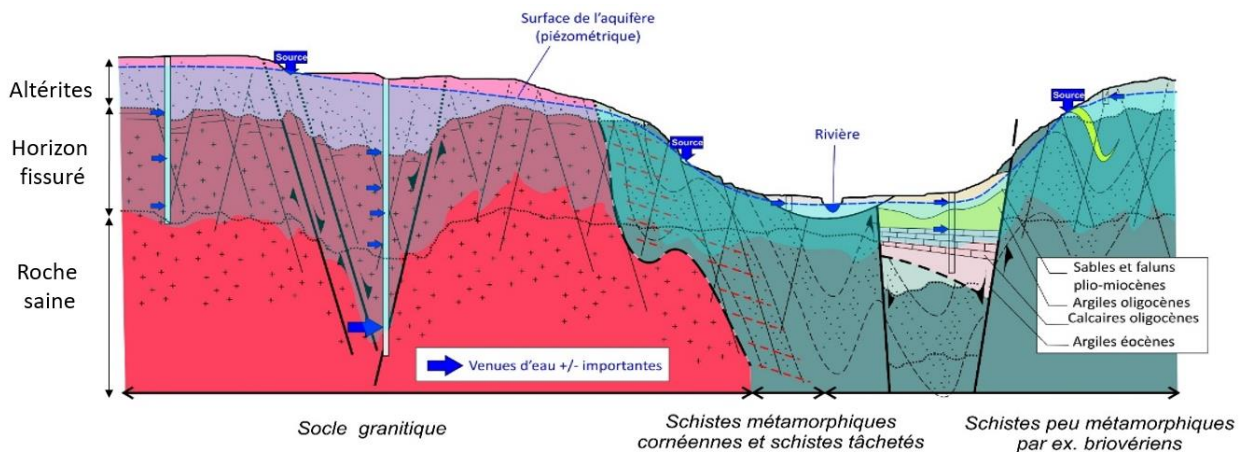


Illustration 6 : Schéma conceptuel des aquifères de socle du massif armoricain : Modifié de (Schroëtter et al., 2020).

3. Résultats

La méthodologie utilisée pour cette étude consiste en une analyse des chroniques de débits de cours d'eau et de niveaux piézométriques. Ces analyses ont pour but d'appréhender la dynamique des différents compartiments hydrologiques (eaux souterraines et eaux de surface), ainsi que d'évaluer à la fois la contribution des eaux souterraines aux débits des cours d'eau, les variations de stocks long terme et l'effet mémoire des aquifères. Les procédures de calculs utilisées sont aussi présentées dans cette section. Enfin, des modélisations au travers de modèles 1D de versants permettent une estimation des paramètres hydrodynamiques moyens (perméabilité et emmagasinement) pour certains secteurs jaugés.

3.1. DYNAMIQUE DES DEBITS DES COURS D'EAU

La dynamique du bassin peut être appréhendée grâce aux stations hydrologiques. Une comparaison des débits pour six d'entre elles est présentée pour la période après arasement du barrage de Vezins (mai 2019 à 2020) - Illustration 7. Les données sont représentées à la fois en échelle linéaire et échelle logarithmique pour accentuer la représentation des faibles débits.

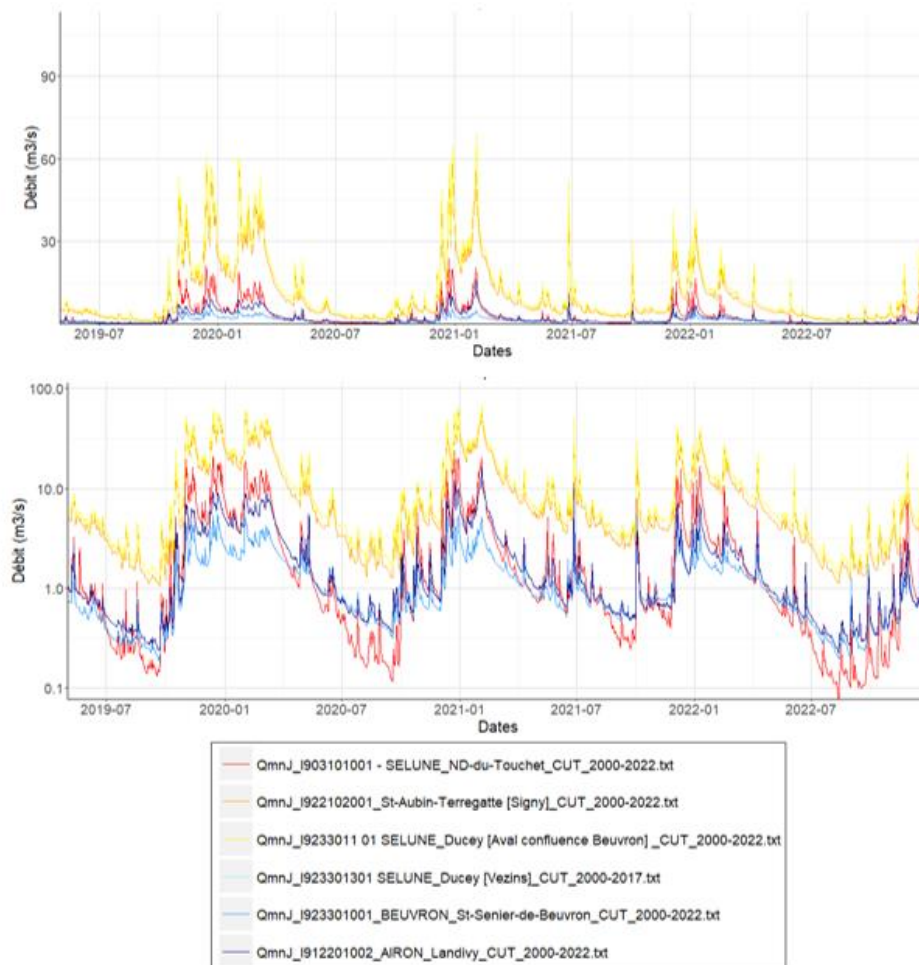


Illustration 7: Débit moyen journalier des cours d'eau suite à l'arasement du barrage de Vezins. En haut en échelle linéaire en bas échelle logarithmique (Période 01/06/2019 à 31/12/2023) – La station de la Sélune à Vezins est arrêtée sur cette période.

Ces deux figures permettent de comparer la dynamique en étiage entre les stations situées en amont du barrage (Sélune à Notre-Dame-du-Touchet) et en aval (Sélune à Saint-Aubin-de-Terregatte et à Ducey). La Sélune amont, en raison d'un bassin versant plus petit présente logiquement les étiages les plus marqués.

Pour les sous-bassins contributifs, l'Airon, le Beuvron et la Sélune amont, les dynamiques des cours d'eau sont différentes. La Sélune amont présente des débits de crête importants et des étiages plus marqués. A l'inverse, l'Airon et plus particulièrement le Beuvron ont des débits plus stables avec une plus faible différence entre faibles et forts débits.

Pour les 2 stations aval de la Sélune (la station de Vezins était inactive sur cette période), les évolutions sont similaires. Ces chroniques ne présentent pas d'étiage extrêmement sévère.

L'année 2022, année d'une sécheresse majeure à l'échelle nationale, est comparée à l'ensemble des années disponibles sur un hydrogramme unitaire en Illustration 8. Celle-ci montre que, bien qu'étant parmi les débits les plus faibles enregistrés, cette année n'est pas la plus critique enregistrée. Toutefois, cette chronique a pu être influencé par les travaux de vidange du barrage de la Roche-qui-Boit débuté en mai 2022.

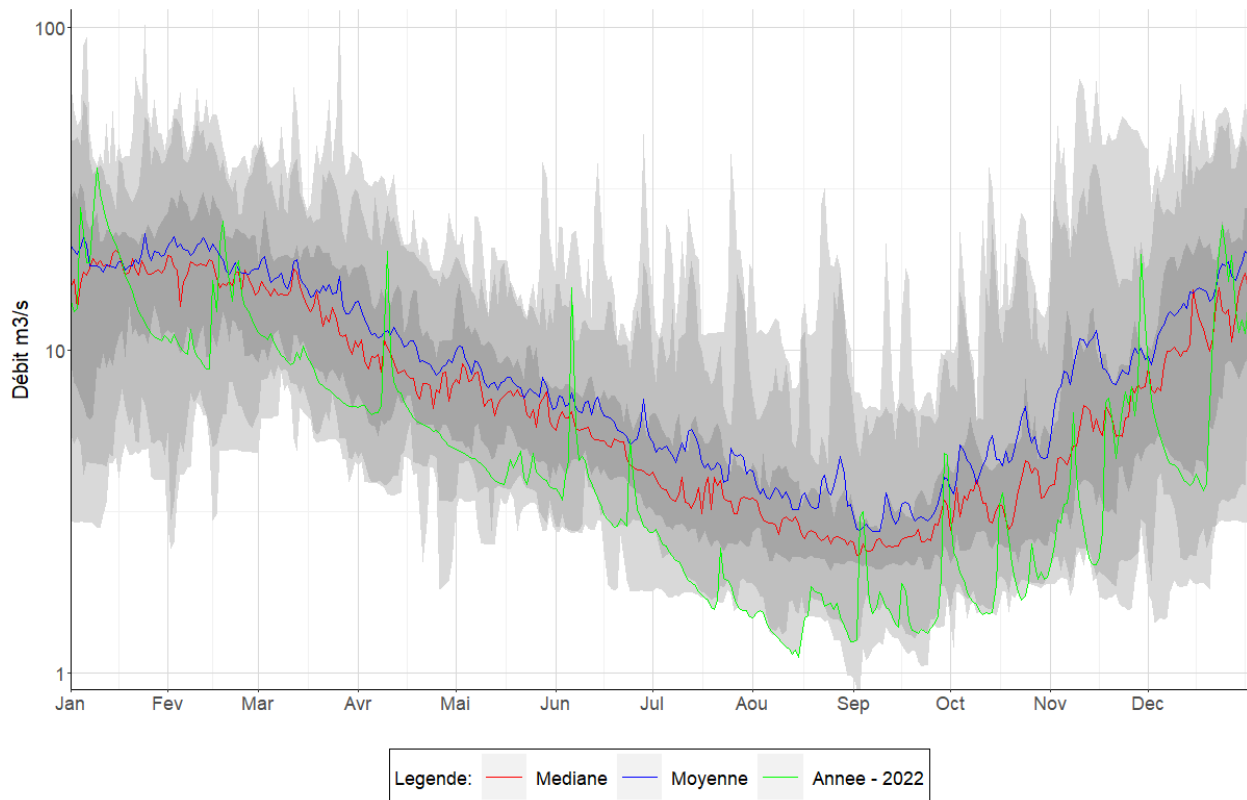


Illustration 8: Hydrogramme unitaire (échelle logarithmique) de la Sélune à Ducey [SIGNY] avec en rouge la médiane, en bleu la moyenne et en vert les valeurs de débit de l'année 2022; Les plages grisées représentent du plus clair au plus foncé, les minimums et maximums, les premiers et derniers quartiles.

Cette sécheresse peut être comparée à une autre période de faibles débits avant arasement des barrages. La période de faibles débits correspond à la période (2010-2011 - Illustration 9). Le choix de la période 2010-2011 a été fait en raison des faibles recharges de ces années induisant une forte situation de stress hydrique pour les aquifères avant une période de précipitations en août 2011. La réaction des cours d'eau est légèrement différente. Une comparaison des chroniques de la Sélune à Saint-Aubin-Terregatte (aval Barrage de Vezins) et Notre-Dame-du-Touchet (amont Barrage de Vezins) entre les années 2011 et 2022 est présenté Illustration 10.

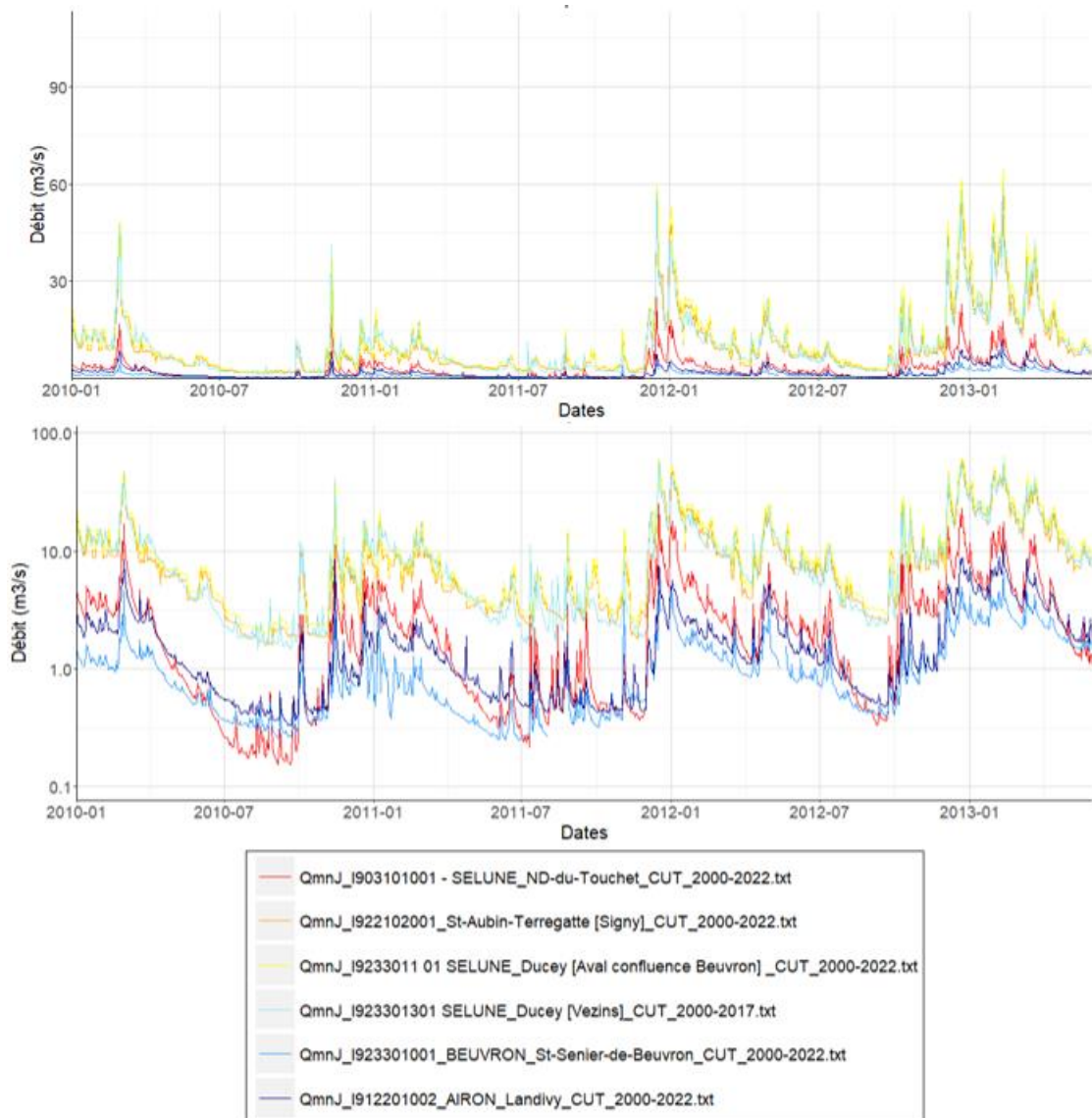


Illustration 9 : Débit moyen journalier des cours d'eau (Période 01/01/2010 à 01/06/2013). En haut en échelle linéaire, en bas échelle logarithmique.

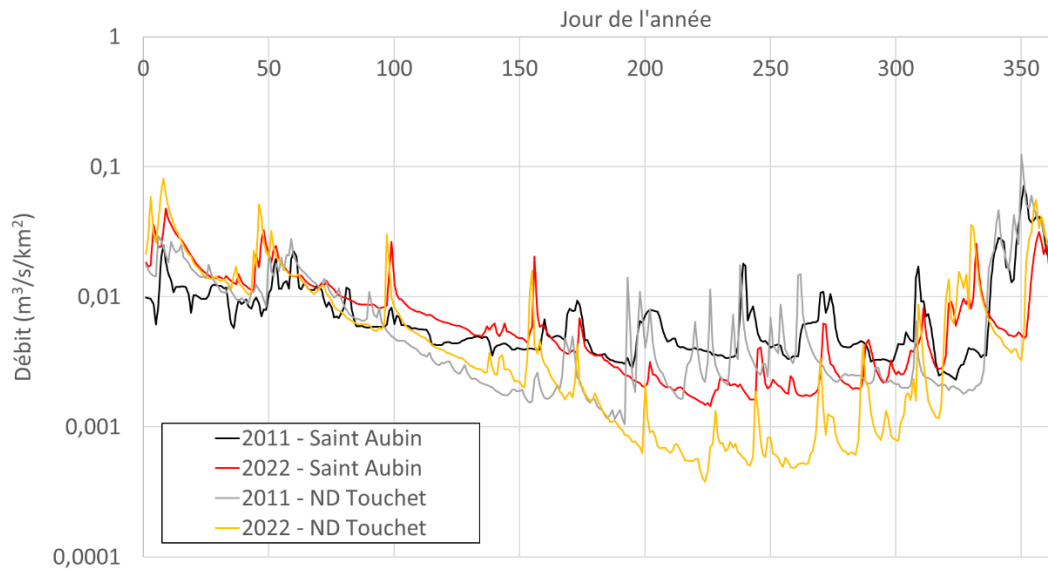


Illustration 10 : Comparaison des chroniques de débits spécifiques des années 2011 et 2022 sur la Sélune aux stations de Saint-Aubin-de-Terregatte et Notre-Dame-Du-Touchet (Echelle logarithmique).

Si la dynamique générale reste globalement la même, sur cette seconde période (2010-2013), deux différences apparaissent (Illustration 9). En 2011, des effets de seuil apparaissent sur les chroniques de la Sélune à Saint-Aubin-de-Terregatte et de Ducey (aval confluence Beuvron). Ces seuils sont liés à la présence des barrages. Ces seuils restent d'ampleur limitée. La régulation des bas débits par le barrage de Vezins n'est pas visible sur la chronique de Vezins en raison de son objectif de reconstitution d'un débit naturel. Le barrage a donc bien un effet limité sur les flux et la chronique de Vezins semble approcher les écoulements naturels. Les débits spécifiques (débits normalisés par la taille du bassin versant) sont présentées Illustration 10. Cette figure montre des dynamiques différentes pour la Sélune à Saint-Aubin-de-Terregatte avec des plateaux en 2011 (courbe noire Illustration 10) et une dynamique relative similaire à la station de Notre-Dame-du-Touchet en 2022 (courbe rouge Illustration 10). Une autre différence majeure est l'importance des étiages sur le Beuvron qui sont cette fois plus importants que sur la Sélune amont (Illustration 9). Cette différence peut être liée à une contribution des eaux souterraines différente et donc des réponses différentes de certaines parties du bassin à des sécheresses de type différent.

Afin de réaliser une comparaison entre les différentes stations, une moyenne mensuelle normalisée par la moyenne et l'écart-type de chaque station a été calculée et comparée en Illustration 11. En pointillé rouge, figure la moyenne de l'ensemble des stations. Cette normalisation permet de comparer les dynamiques sous un même référentiel (résolution mensuelle). La station amont de Notre Dame-du-Touchet a une dynamique plus rapide avec une augmentation relative des débits et une décroissance plus rapide. Cette différence est liée à un substratum probablement moins perméable et plus ruisselant en comparaison des stations de l'Airon et du Beuvron, où l'apport des eaux souterraines pourrait être plus important. Pour les stations de Ducey et de Saint-Aubin-Terregatte sur la Sélune, la dynamique plus lente peut être en lien avec les apports des autres rivières et/ou avec un possible effet tampon du barrage.

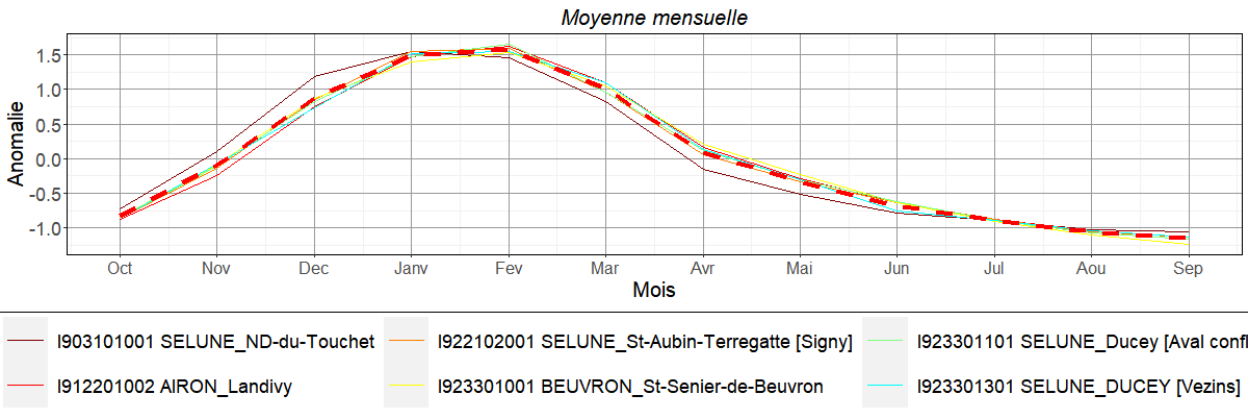


Illustration 11: Moyenne mensuelle des débits normalisés par la moyenne et l'écart-type pour l'ensemble des stations

3.2. DYNAMIQUE PIEZOMETRIQUE

Les chroniques piézométriques disponibles sur la zone sont issues de trois points situés sur les communes de Saint-Laurent-de-Terregatte (BSS000TQJW), de Louvigné-du-Désert (BSS000TRGE) et de Mesnil-Rainfray (BSS000RCPZ). Les piézomètres sont situés à des altitudes différentes. Le piézomètre de Saint Laurent-de-Terregatte est situé à une altitude de 53 mNGF, celui de Louvigné-du-Désert à 173 mNGF et celui de Mesnil-Rainfray à 229 mNGF. Pour une comparaison de la dynamique piézométrique relative, les variations moyennes ont été rapportées à l'altitude moyenne des piézomètres. La comparaison des trois piézomètres présents sur ou à proximité du bassin versant montre des dynamiques contrastées (Illustration 12). L'inertie est plus importante sur les hauts de versants qu'à Saint-Laurent-de-Terregatte située à une altitude plus basse. Le piézomètre de Saint Laurent-de-Terregatte montre des remontées rapides et ponctuelles tout au long de l'année, avec des augmentations rapides régulièrement espacées liées aux précipitations induisant des recharges ponctuelles. Ce comportement rapide et le seuil apparent des niveaux bas peut être en lien avec la rivière à proximité. A l'opposé, les piézomètres de haut de versants, en bleu et jaune sur l'illustration 12, ont des variations plus continues montrant des phases de remontée (recharge) et de baisse clairement définies. L'année 2022, année de sécheresse, montre des niveaux plus bas que les années précédentes, reflétant l'intensité de celle-ci.

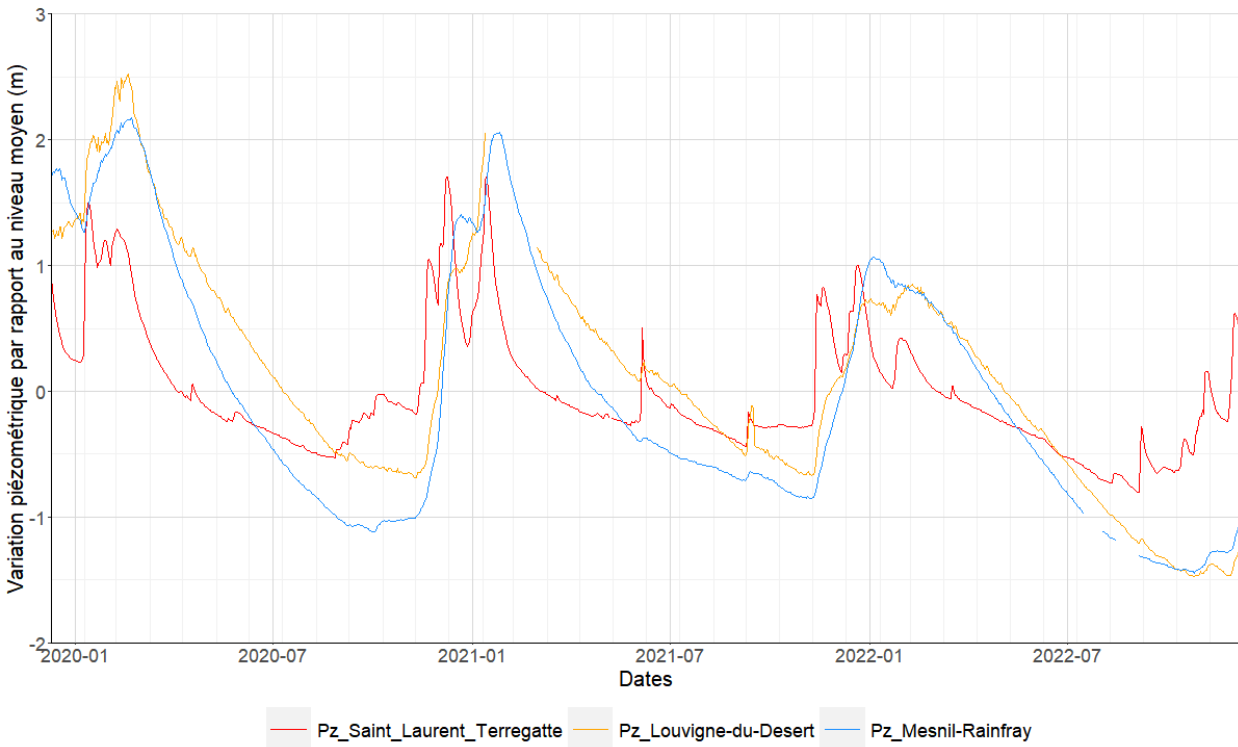


Illustration 12 : Comparaison des dynamiques piézométriques sur les piézomètres de Saint-Laurent-de-Terregatte (BSS000TQJW), de Louvigné-du-Désert (BSS000TRGE) et de Mesnil-Rainfray (BSS000RCPZ).

La dynamique rapide du piézomètre de Saint-Laurent de-Terregatte peut être due à une faible porosité et/ou à une forte perméabilité de l'aquifère et/ou à un niveau de nappe de faible profondeur. Ces éléments vont dans le sens d'une faible capacité de cette zone pour le soutien d'étiage des cours d'eau.

Les deux autres piézomètres aux dynamiques plus longues pourraient présenter des capacités de stockage et de soutien de cours d'eau plus importantes. La comparaison des évolutions de niveaux d'eau sur les périodes plus longues peut permettre d'évaluer la sensibilité des aquifères aux successions de sécheresses. La totalité des chroniques disponibles pour les piézomètres de Saint-Laurent-de-Terregatte et Louvigné-du-Desert sont présentées Illustration 13. Cette comparaison montre des dynamiques annuelles différentes. Ces différences de dynamiques ont des répercussions sur le moyen et long terme. A noter que les chroniques disponibles sur le piézomètre de Mesnil-Rainfray sont trop courtes pour une analyse (début des données de 05/11/2019).

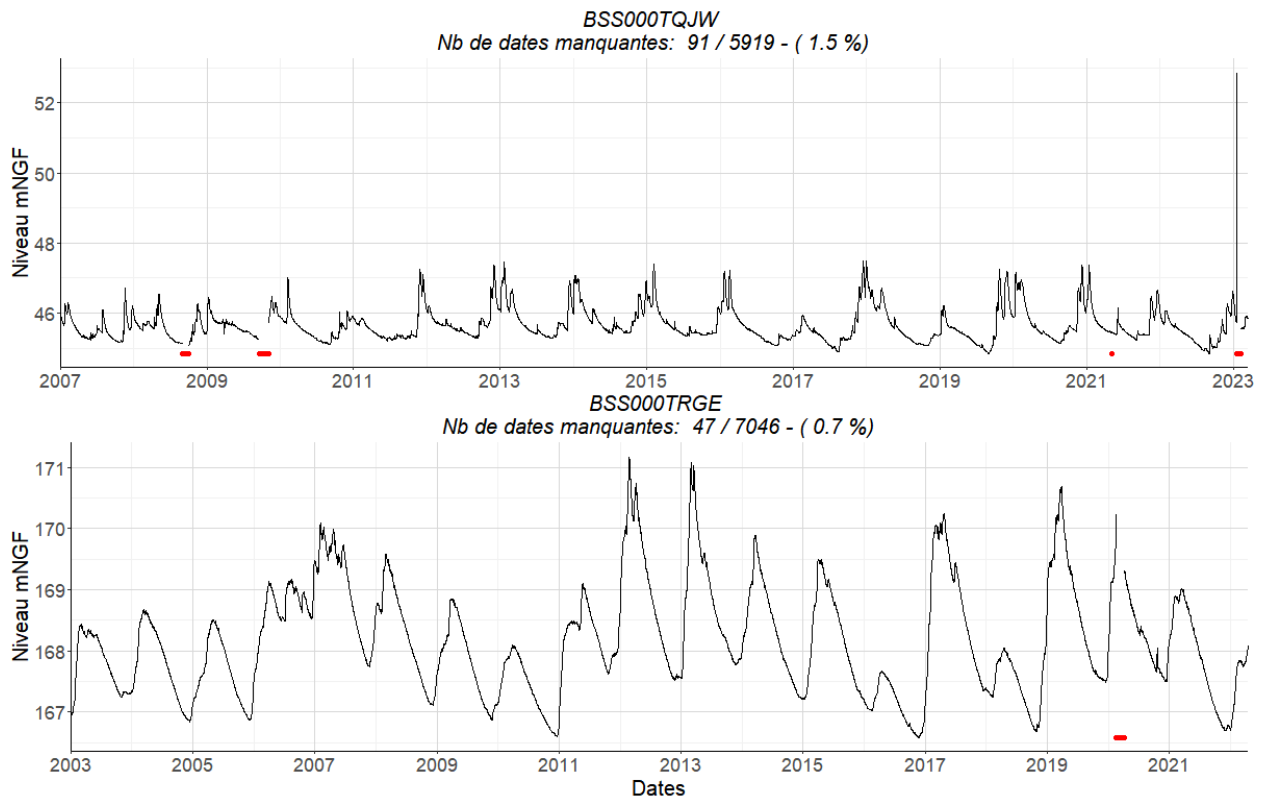


Illustration 13 : Chroniques piézométriques à Saint-Laurent-de-Terregatte (en haut) et Louvigné-du-Desert (en bas). Les points rouges représentent les données manquantes.

Les deux chroniques piézométriques montrent des comportements contrastés avec des cycles à dominante annuelle à Saint-Laurent-de-Terregatte et des dynamiques annuelles mais aussi pluriannuelles à Louvigné-du-Désert. L'importance de ces cycles peut être quantifiée à l'aide de périodogrammes (Illustration 14). Bien que dominé par une périodicité d'un an (cycle annuel), le piézomètre de Louvigné-du-Désert présente aussi une puissance spectrale relativement importante de 6.6 ans. La présence de cycles plus longs peut provenir d'une meilleure capacité de stockage ou d'une faible perméabilité. La présence d'un signal de cette fréquence dans le débit des cours d'eau peut être un indicateur d'une forte contribution des eaux souterraines en raison d'une capacité de stockage importante. Dans la suite de ce rapport (partie 3.3.2) la présence de ce cycle sera aussi recherchée dans les débits des cours d'eau.

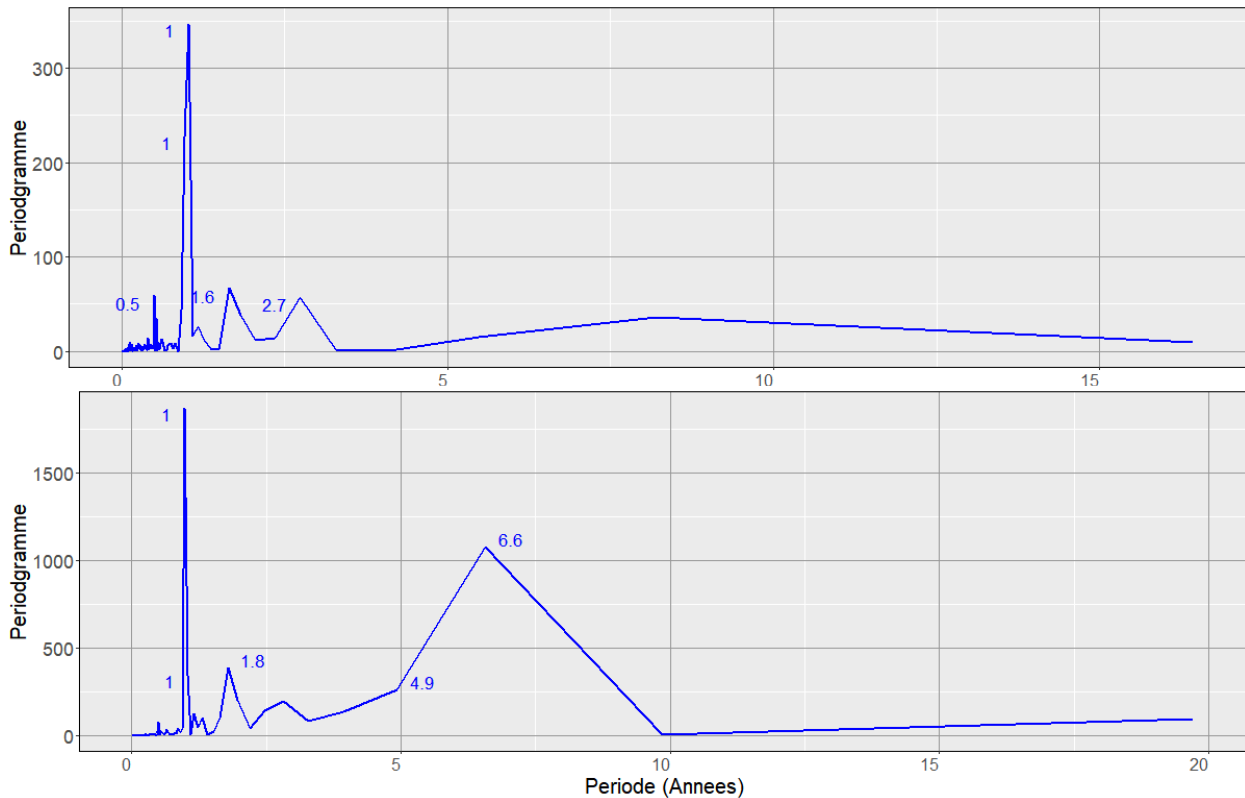


Illustration 14 : Periodogrammes calculés sur les chroniques piézométriques à Saint-Laurent-de-Terregatte (en haut) et Louvigné-du-Desert (en bas).

3.3. EVALUATION DE LA CONTRIBUTION DES EAUX SOUTERRAINES AU SOUTIEN D'ETIAGE

3.3.1. Base Flow Index (BFI)

Les contributions des ressources souterraines aux débits des cours d'eau ont été évaluées par le calcul du BFI (Base flow index). Le BFI est un indicateur de la contribution des eaux souterraines aux cours d'eau basé sur le ratio entre l'écoulement réel et une estimation de l'écoulement de base. Les études réalisées avec le BFI (Gustard and Demuth, 2008; Tallaksen and Lanen, 2004) montrent que cet indice varie de 0.15 pour les bassins très peu perméables avec des cours d'eau réagissant rapidement, à 0.95 pour les bassins à forte capacité d'infiltration et des régimes d'écoulement réguliers.

Les procédures de calculs sont décrites dans (Gustard and Demuth, 2008; Tallaksen and Lanen, 2004). Les procédures de calculs utilisées dans cette étude sont celles présentes dans le programme ESTHER du BRGM (Seguin et al., 2018). Un exemple de décomposition est fourni en Illustration 15 pour un bassin à forte contribution souterraine (le Beuvron à Saint-Sénier) avec en rouge l'estimation du débit de base.

Le BFI est calculé selon l'équation suivante :

$$BFI = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{b_i}}{\sum_{i=1}^n Q_i}$$

Equation 1

Avec Q_i : écoulement journalier
 Q_{bi} : écoulement de base

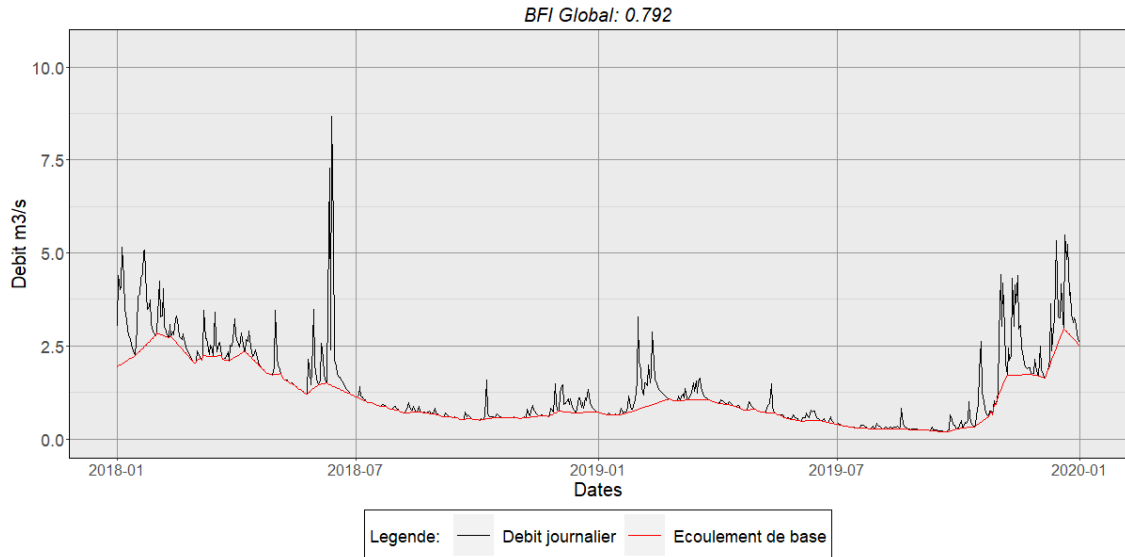
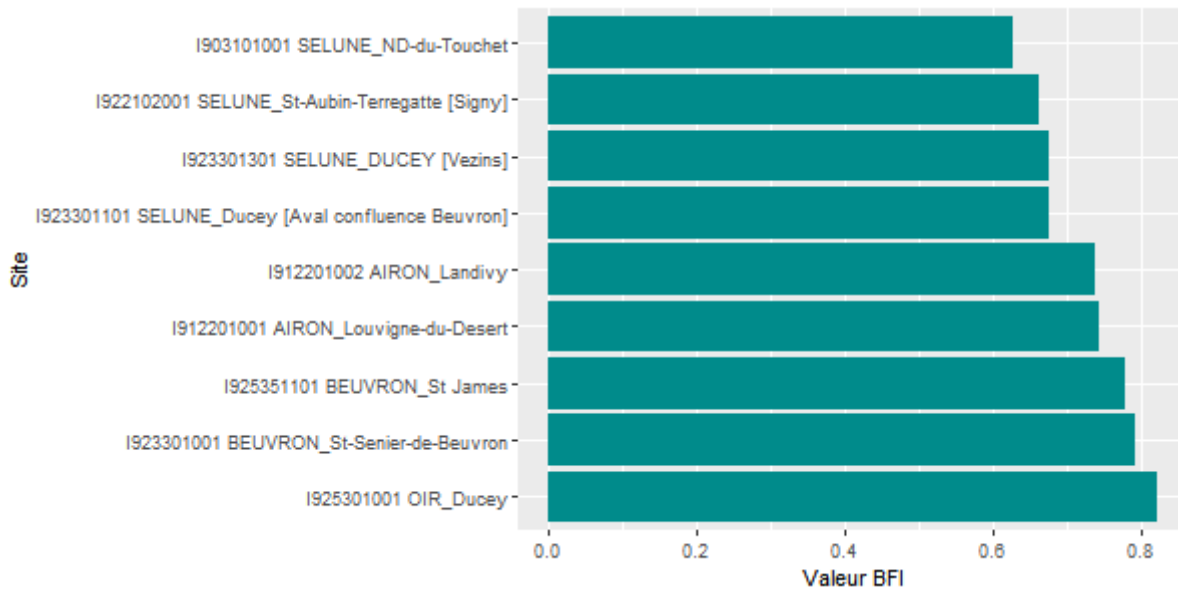


Illustration 15 : Estimation du BFI pour le Beuvron à Saint-Sénier (2018-2020)

Les BFI ont été calculés sur toutes les chroniques de débits disponibles (Illustration 16). Ce classement indique une plus forte contribution des eaux souterraines pour l'Oir (0.82), le Beuvron et l'Airon. A l'inverse, la plus faible contribution des eaux souterraines est estimée pour la Sélune Amont, mesurée à Notre-Dame-du-Touchet.



Station de mesure	BFI
I903101001 SELUNE_ND-du-Touchet	0,626
I922102001 SELUNE_St-Aubin-Terregatte [Signy]	0,662
I923301301 SELUNE_DUCEY [Vezins]	0,674
I923301101 SELUNE_Ducey [Aval confluence Beuvron]	0,675
I912201002 AIRON_Landivy	0,737
I912201001 AIRON_Louvigne-du-Desert	0,743
I925351101 BEUVRON_St James	0,778
I923301001 BEUVRON_St-Senier-de-Beuvron	0,792
I925301001 OIR_Ducey	0,82

Illustration 16 : BFI calculés sur l'ensemble des stations du bassin

La contribution des eaux souterraines aux débits des cours d'eau est principalement contrôlée par la perméabilité de l'aquifère et son emmagasinement, mais aussi par des caractéristiques géomorphologiques telles que la pente et la géométrie du bassin versant. L'importance relative de ces éléments ne peut être différenciée en utilisant cette procédure méthodologique. Cette différenciation est réalisée par des travaux de modélisations et sera présentée plus loin dans ce rapport (section 3.6).

3.3.2. Périodogrammes

Les périodogrammes permettent d'évaluer la répartition fréquentielle de la puissance d'un signal suivant les fréquences qui le composent. Les périodogrammes peuvent permettre d'identifier de manière complémentaire au BFI une contribution des eaux souterraines aux cours d'eau et de généraliser les observations faites à partir de données piézométriques. Pour les cours d'eau, ces cycles pluriannuels apparaissent à la faveur de grandes variations climatiques (successions d'années humides et ou sèches) et de la capacité de l'aquifère à constituer des stocks et les maintenir dans le temps. D'une manière générale, on peut considérer que les cycles pluriannuels s'effacent pour les bassins où les eaux souterraines sont les moins contributives (ou que les aquifères ont peu de capacité de stockage). Les périodogrammes ont été calculés pour l'ensemble des chroniques de débits. Des fréquences pluriannuelles sont marquées sur l'Airon et le Beuvron avec des cycles secondaires de 6 et 7 ans respectivement. Inversement, bien que toujours visibles, ces cycles sont très peu marqués sur les stations de la Sélune à Vezins, Notre-Dame-du-Touchet et légèrement plus visible à Ducey. Il sont en revanche plus visibles sur la Sélune à Saint-Aubin-de-

Terregatte [Signy] (Illustration 17). Les périodogrammes sont fournis en annexe 1. La présence marquée de ces cycles informe sur la capacité du milieu à maintenir des stocks pluriannuels mais montre aussi la possibilité d'effets cumulatifs de sécheresses. Ces résultats sont en accord avec les observations des BFI.

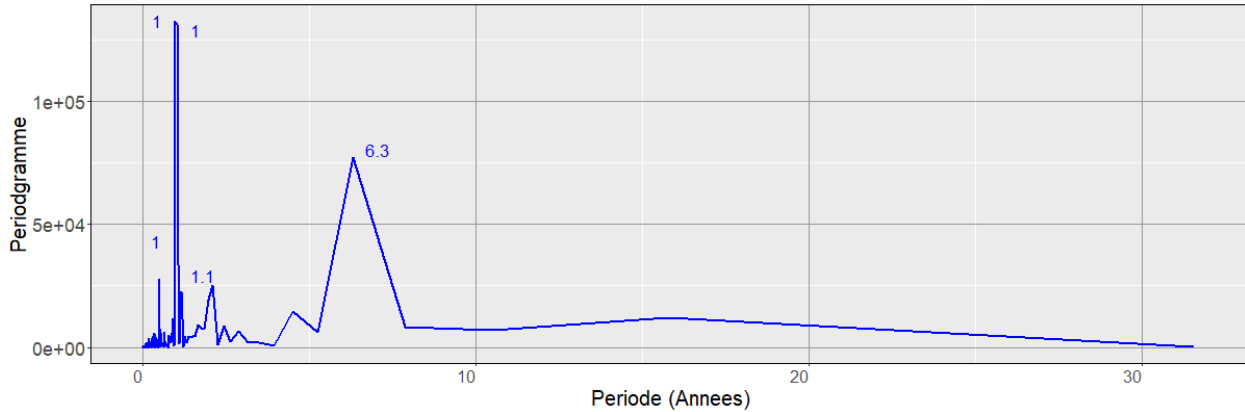


Illustration 17 : Exemple de périodogramme calculé à pour la station I922102001 SELUNE_St-Aubin-Terregatte [Signy]

3.4. DYNAMIQUE DES ETIAGES ET EVOLUTION

Dynamique de l'ensemble des stations

L'évolution de l'intensité des étiages est présentée (Illustration 18) pour l'ensemble des stations de mesures en échelle logarithmique pour la période 2008-2022. Ayant une moindre contribution estimée des eaux souterraines, la Sélune à Notre-Dame-du-Touchet présente les débits d'étiage les plus faibles de façon quasi-systématique. Les très faibles débits semblent de plus en plus fréquents. Le Beuvron présente aussi, notamment en 2011, des étiages sévères. Les différences des débits s'expliquent par la taille des bassins contributifs, le Beuvron, la Sélune Amont et l'Airon ayant des surfaces nettement plus petites.

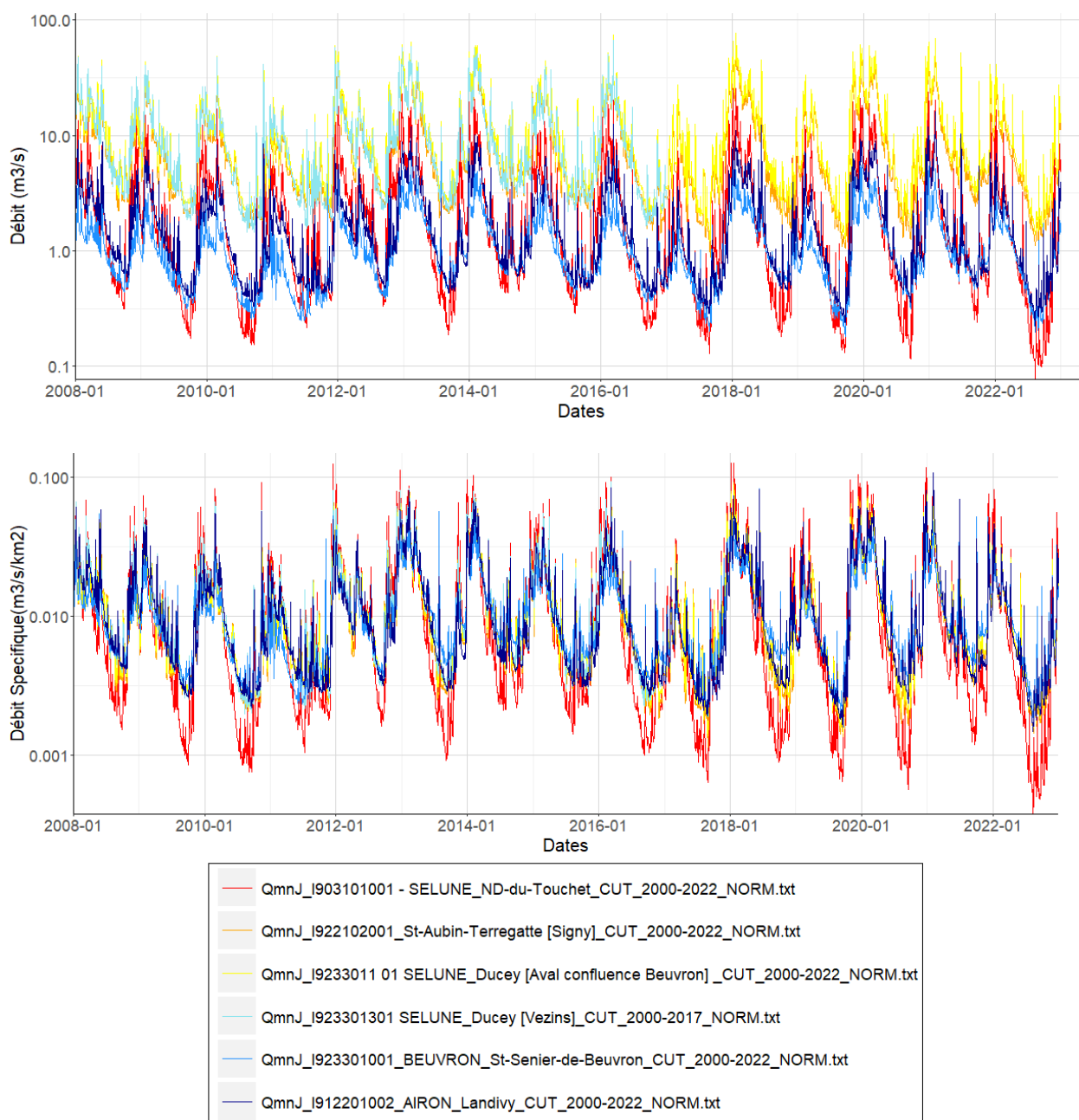


Illustration 18 : Evolution des étiages aux stations présentes sur le bassin de la Sélune (en haut débits mesurés en bas débits spécifiques normalisés par l'aire drainée)

3.4.1. Cas de la Sélune à Saint-Aubin-de-Terregatte [Signy]

Pour évaluer un possible impact de l'arasement du barrage de Vezins, les variations en débit d'étiage avant et après travaux peuvent être comparées. Sur l'illustration 19, le seuil minimum de la période 2000-2017 est représenté ainsi que la date considérée de retour à un débit naturel de la Sélune à Vezins (Mai 2019). Le barrage de la Roche-qui-Boit était encore présent (arasement ayant débuté en mai 2022). On observe que les débits minimums de 2000-2016 ont été atteints ou dépassés 3 ans sur 4 depuis arasement du barrage de Vezins. L'amplitude entre hautes eaux et basses eaux semble aussi plus marquée sur la fin de la chronique. Si une part de ces différences avant/après travaux peut être imputée aux travaux, une large partie

peut être imputée aux variations climatiques car ceci peut être observé sur les chroniques non influencées, telles que celles de la Sélune à Notre-Dame-du-Touchet (Section 3.5.2).

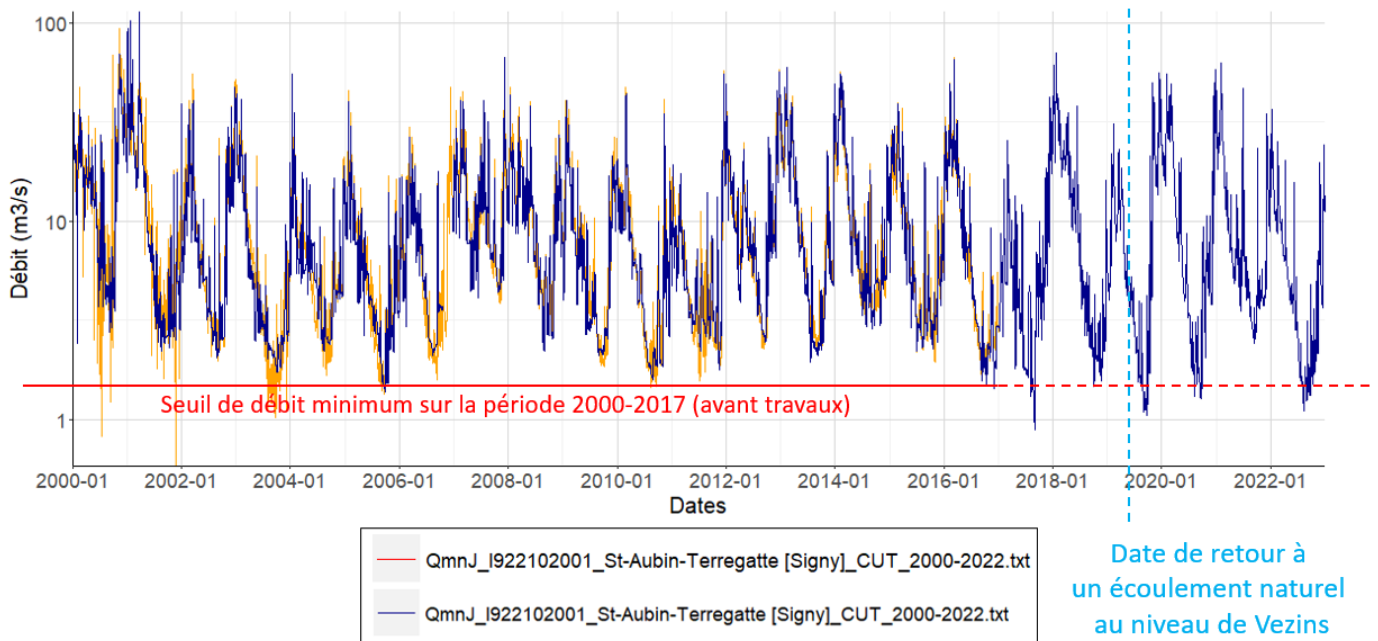


Illustration 19 : Evolution des étiages à la station de Saint-Aubin-de-Terregatte

3.4.2. Cas de la Sélune à Notre-Dame-du-Touchet

La Sélune à Notre-Dame-du-Touchet n'a pas été impactée par l'arasement du barrage de Veziens. Toutefois comme pour la station de Veziens, 3 des 4 dernières années sont parmi les débits les plus faibles, indiquant donc le fort impact du climat et un impact moindre de l'arasement du barrage.

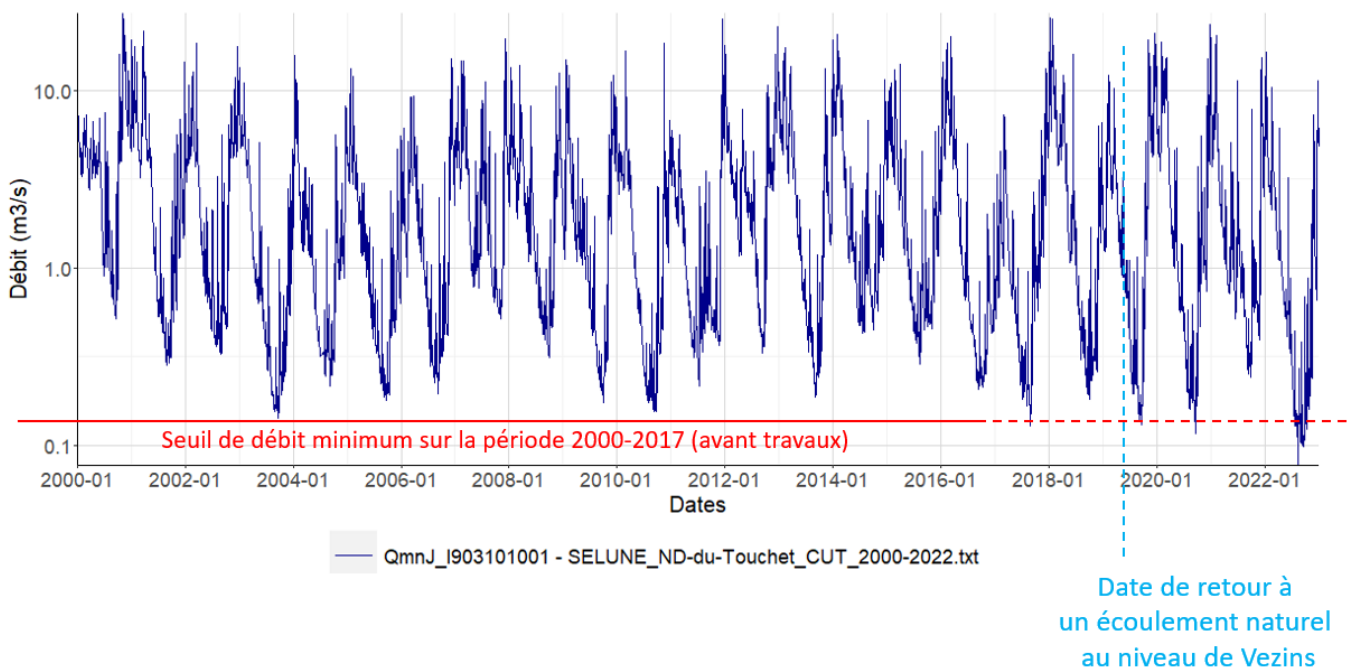


Illustration 20 : Evolution des étiages à la station de Notre-Dame-du-Touchet

3.4.3. Cas du Beuvron

Le Beuvron, pourtant considéré comme plus résilient, présente notamment en 2010, 2011, 2017 et 2019 (Illustration 18) des débits particulièrement faibles. Ces années correspondent aux minimas observés sur les niveaux piézométriques à Louvigné-du-Désert (Illustration 13). Une comparaison des débits du Beuvron (échelle logarithmique) et les niveaux piézométriques de Louvigné-du-Desert (échelle linéaire) est fournie Illustration 21. La similitude des dynamiques et la présence de cycles illustrent le lien entre eaux de surface et eaux souterraines.

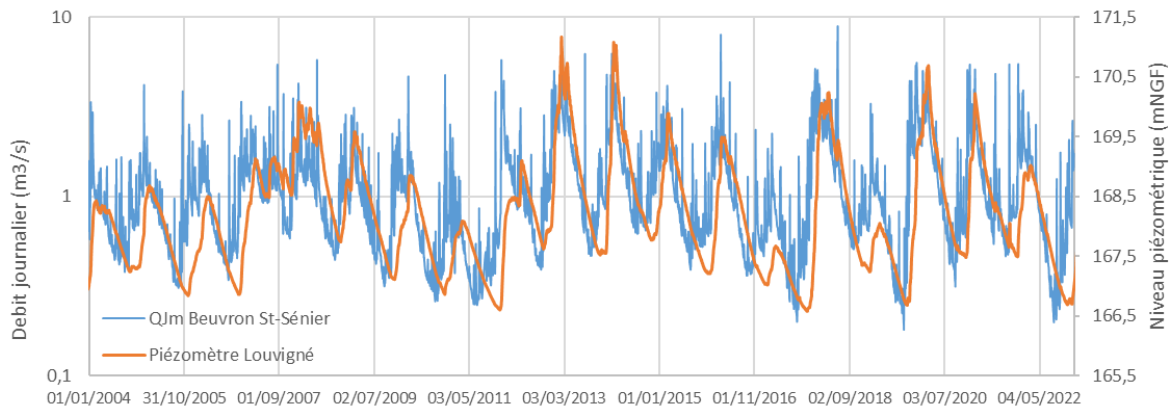


Illustration 21 : Comparaison des débits du Beuvron (échelle logarithmique) et des niveaux piézométriques de Louvigné-du-Desert (échelle linéaire).

3.5. COMPORTEMENT DEPUIS L'ARASEMENT DU BARRAGE DE VEZINS – IMPACT POUR LES PRISES D'EAU POTABLE

L'arasement des barrages peut avoir un impact sur les prises d'eau potable situées en aval de celui-ci. L'étude BRGM (David et al., 2021, BRGM/RP-71398-FR) sur l'évolution des risques de pénurie d'eau face au changement climatique notait les éléments suivants :

Pour les prises d'eau de la Sélune Amont et Cance, le respect du débit réservé sur la Sélune amont fait apparaître des pénuries sur 17 des 27 années étudiées (1994-2020) soit 62% avec une pénurie médiane à 65 jours. De plus ces pénuries sont majoritairement concentrées sur les dernières années de la série (2009-2020). Les projections d'évolution de la Sélune à Notre-Dame –du-Touchet indiquaient que même si le débit moyen devrait augmenter on assisterait à une plus grande variabilité des débits avec des débits de pointe plus importants et des débits d'étiages plus faibles (-14 à 17% du QMN5 à l'horizon 2050). Le nombre de jours moyen où le débit est inférieur au 10^{ème} du module s'accroîtrait pour atteindre 30 jours en moyenne à l'horizon 2085 avec le modèle le plus pessimiste.

Ces stations situées en amont du barrage ne sont pas influencées par l'arasement. Cependant avec l'effacement de celui-ci, cette situation pourrait plus facilement se propager en aval. L'étude ayant été terminée peu avant l'arasement, les données post-arasement n'étaient pas disponibles. En aval, les captages de Pont-Bateau (la Sélune), de la Houssaye (le Beuvron) et Montmorel (La Sélune - cette dernière ayant été arrêtée en 2001) peuvent être impactés. Les deux prises d'eau actives sont gérées par le SDEAU50 (Syndicat départemental de l'eau de la Manche) et aucune ne dispose de débits réservés. Pour ces stations situées dans des zones à plus forte contribution des eaux souterraines (Sélune à l'aval de la confluence avec le Beuvron), la situation estimée est moins pessimiste. Comme pour la Sélune à Notre-Dame-du-Touchet, le débit moyen devrait augmenter (de 3 à 10%), mais la variabilité des débits devrait s'accroître. Les modèles utilisés ont des estimations divergentes de l'évolution des débits d'étiage avec des projections de baisse, de stabilité ou d'augmentation en fonction des modèles et scénarios. Cependant, le nombre de jours pour

lesquels le débit est naturellement en-dessous du 10^{ème} du module, devrait rester quasi nul. Des projections similaires sont observées pour le Beuvron à Saint-Sénier et pour l'Airon à Landivy avec une faible probabilité de dépassement de ce seuil.

Lors de l'étude BRGM, le 10^{ème} du module a été retenu à partir de la station fictive de Ducey. Pour cette station, l'étude BRGM montre que le débit réservé est respecté sur quasiment toute la période, à l'exception de l'année 1997, montrant une faible vulnérabilité pour les prises d'eau. Cependant, comme le mentionne le rapport BRGM/RP-71398-FR : « la station de la Sélune à Signy retrouvera une signification hydrologique qui permettra de faire une analyse plus fiable pour ces prélèvements ». Profitant à la fois des nouvelles données et de la sécheresse de 2022, situation propice à une pénurie, les calculs précédents ont été complétés en considérant la valeur du 10^{ème} du module sur la station de Signy pour évaluer la capacité naturelle de la rivière à maintenir ce débit depuis l'arasement et particulièrement en période de sécheresse. La comparaison entre ce seuil et les débits mesurés depuis l'arasement du barrage de Vezins sont présentés Illustration 22 (le barrage de la Roche-qui-Boit était toujours présent). Cette figure montre que l'on n'observe pas de nouveaux dépassements du 10^{ème} du module. Les apports par le Beuvron et plus généralement par les hauts de versants plus résilients permettent de maintenir un débit d'étiage suffisant. Cependant, comme le montrent les observations en section 3.4.3, une succession de sécheresses pourrait avoir un effet important sur la capacité de maintien de ces débits d'étiages. Les successions de sécheresses hivernales ont été relativement peu observées par le passé, cependant avec des projections de sécheresses en augmentation, cette situation pourrait devenir plus fréquente.

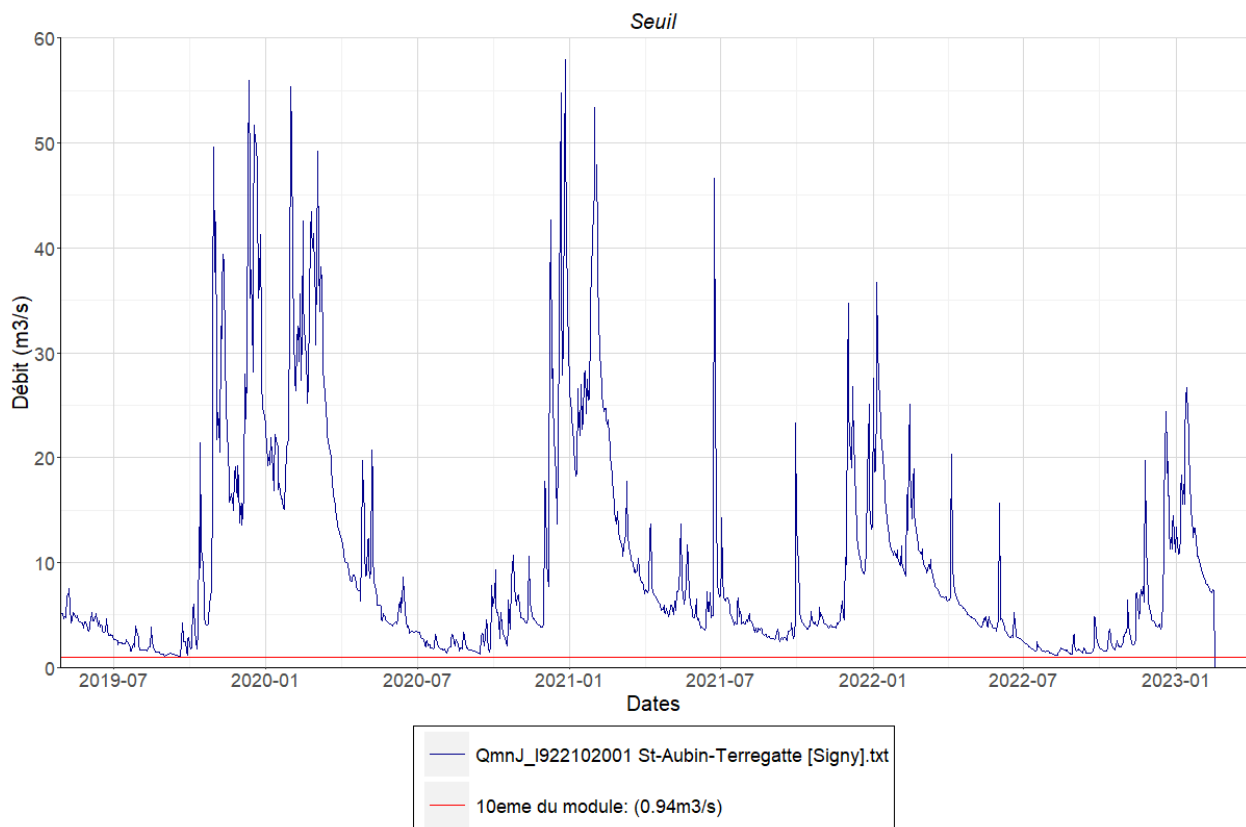


Illustration 22 : Respect du seuil du 10^{ème} du module à la station de Saint-Aubin-de-Terregatte suite à l'arasement du barrage de Vezins (Barrage de la Roche-qui-Boit présent jusqu'en avril 2023).

3.6. MODELISATION ET ESTIMATION DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES

Afin d'identifier la part de la dynamique des écoulements contrôlée par le milieu souterrain, des modélisations numériques ont été réalisées. Ces modélisations permettent de filtrer le rôle de la géomorphologie et du

climat dans les chroniques hydrologiques pour en extraire les propriétés du milieu. Les modélisations ont été réalisées en utilisant le modèle HS1D (Courtois, 2019; Marçais et al., 2017) pour déterminer les paramètres hydrodynamiques équivalents sur trois des sous-bassins versants non influencés. Ce travail a pour but de quantifier le rôle des aquifères dans les différences observées sur les chroniques pour permettre à terme, des modélisations du bassin sur la base de modèles physiques. Les modèles ont été réalisés selon l'approche développée par (Cornette, 2022; Cornette et al., 2022) avec une représentation de chaque bassin versant en deux versants équivalents. Les modélisations ont été réalisées sur trois sous-bassins versants, la Sélune à Notre-Dame-du-Touchet, l'Oir à Ducey et le Beuvron à Saint-Sénier de Beuvron (Illustration 23). La sélection des stations a été réalisée pour permettre de définir des comportements par zone du bassin versant. Les stations reconstituées de Vezins et de la Sélune à Ducey (aval Beuvron), tout comme la station de la Sélune à Ducey [Signy], influencée par le barrage n'ont pas été modélisées.

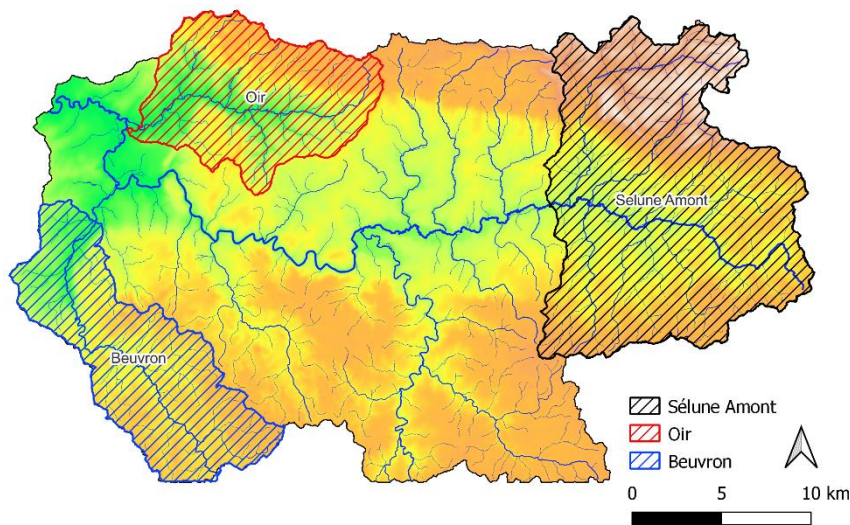


Illustration 23: Sous-bassins modélisés

3.6.1. Fonctionnement et principes du modèle

Le modèle HS1D a pour but de modéliser à travers une approche physique les débits des cours d'eau, tout en conservant la description physique des écoulements souterrains à l'échelle du versant. Les modèles (1D) sont représentés le long d'une droite discrétisée représentant un profil topographique en fonction d'une distance au réseau hydrographique (présenté en annexes). Une représentation schématique du concept de versant équivalent est fournie à l'illustration 24, accompagnée d'une description de l'approche utilisée et des processus d'écoulement modélisés par HS1D. Les détails de la procédure de modélisation sont fournis dans (Cornette et al., 2022). L'approche de modélisation permet par la représentation des processus physiques et la prise en compte de la topographie, de filtrer l'influence géomorphologique et du climat dans les chroniques de débits de cours d'eau pour en extraire les propriétés hydrodynamiques du milieu. Cette décomposition du signal hydrologique n'est pas possible avec une approche de type BFI et est donc complémentaire de l'analyse du signal précédemment effectuée.

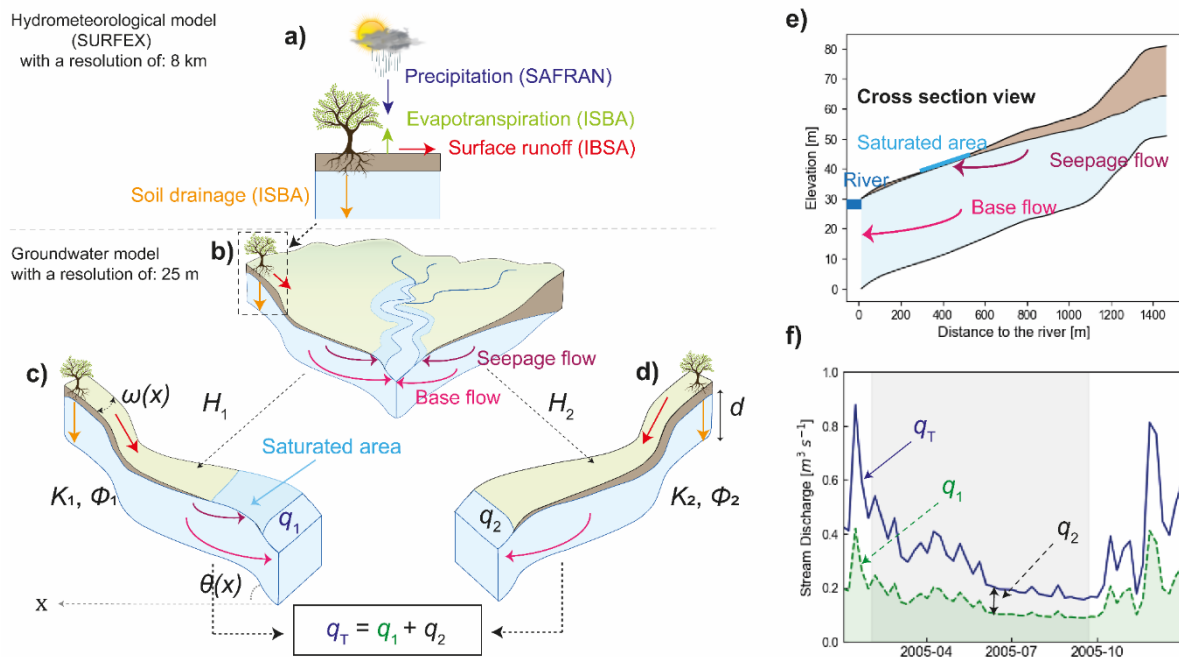


Illustration 24 : Représentation conceptuelle du schéma de modélisation hydrologique. a) Le modèle hydrométéorologique SURFEX répartit les précipitations provenant de la réanalyse SAFRAN en ruissellement de surface et infiltration à une résolution de 8 km. b) Le modèle des eaux souterraines simule l'évolution de la nappe phréatique et les processus hydrologiques sous-maille à une résolution de 25 m en utilisant l'infiltration comme donnée d'entrée. Lorsque la nappe phréatique atteint la surface, le débit d'infiltration généré est ajouté au débit de base lent et au ruissellement de surface rapide acheminé directement vers la rivière pour donner le débit de la rivière. c, d) La pente équivalente est dupliquée en deux pentes équivalentes ayant la même morphologie et les mêmes données hydroclimatiques, mais des propriétés hydrauliques effectives différentes pour représenter les variations spatiales et temporelles du débit d'infiltration et de l'écoulement de base. Les deux versants esquissent, respectivement, un versant H1 (c) à faible conductivité conduisant à une réponse rapide avec des flux d'infiltration élevés et un débit de base lent (débit H1 q_1) et un versant H2 (d) à conductivité plus élevée avec une contribution prolongée après les périodes de recharge (débit H2 q_2). e) Profil d'élévation du versant équivalent en fonction de la distance à la rivière à laquelle les processus sont modélisés. f) Les contributions des versants sont additionnées pour obtenir le débit à l'échelle du bassin hydrographique. (Cornette et al., 2022)

La caractérisation des paramètres hydrodynamiques du milieu a été réalisée au travers d'une procédure d'exploration de paramètres pour la perméabilité et la lame d'eau (porosité x épaisseur de l'aquifère) sur la gamme présentée sur l'illustration 25 avec 50 valeurs de paramètres pour chacun des cas. L'épaisseur d'aquifère est considérée comme valeur constante de 30 m dans cette analyse.

	Unités	Min	Max	Nb de valeurs
Perméabilité	m/s	2,78E-08	2,78E-03	50
Porosité	-	0,01	0,5	50

Illustration 25 : Gamme de valeurs utilisées pour l'exploration de paramètres

L'exploration de l'espace des paramètres a été optimisée en effectuant dans un premier temps les simulations en tenant compte d'une seule pente équivalente, ce qui donne 2500 (50^2) simulations agrégées. Ensuite, les simulations sont de nouveau agrégées avec leurs doubles pour le modèle à deux versants équivalents, ce qui donne 6 250 000 (2500^2) simulations. L'étalonnage est effectué à l'aide de deux critères de sélection décrits ci-dessous :

- Le premier critère est la présence d'une zone saturée se développant en amont du cours d'eau pendant la période humide, tel qu'observé pour les aquifères cristallins du massif armoricain

(Dewandel et al., 2021). Les conditions relativement humides du massif armoricain induisent des niveaux de nappe relativement hauts et étendent la zone saturée sur le côté de la rivière pendant la période de recharge. L'hypothèse que la zone saturée n'est pas limitée à la rivière est un point critique de l'approche de modélisation pour assurer la représentation à la fois de l'infiltration et des débits de base. Tout modèle qui ne respecterait pas ce critère est exclu. C'est notamment le cas des modèles hautement diffusifs pour lesquels la nappe phréatique de l'aquifère resterait toute l'année bien en dessous de la surface en tous points.

– Le deuxième critère de sélection du modèle est lié à la qualité de l'estimation du débit du bassin versant. L'indice d'efficacité de Nash Sutcliffe (NSE) est utilisé comme critère d'optimisation (Nash and Sutcliffe, 1970). Il est calculé sur le logarithme des données de débit pour équilibrer l'importance relative des débits faibles et élevés dans le processus de calibrage. Les modèles peuvent être considérés comme acceptables pour des valeurs de NSE supérieures à 0,65 et bons lorsqu'elles sont supérieures à 0,8 (Ritter and Muñoz-Carpena, 2013). Les simulations ont été sélectionnées pour les représentations des débits lorsque leur valeur NSE correspondante était au moins égale à 97,5% des valeurs NSE maximales obtenues sur l'ensemble de l'espace d'exploration des paramètres.

3.6.2. Résultats

Les cartes de NSE produites, représentent le domaine d'optimisation des paramètres et permettent une bonne représentation du milieu. Un exemple explicatif de carte est fourni sur l'illustration 26. Ces cartes représentent les résultats de NSE de 2500² simulations. Chaque pixel représente les résultats d'un modèle. La couleur représente la qualité de l'ajustement (en rouge bonne corrélation entre les modélisations et les chroniques observées; en bleu faible corrélation entre modèles et chroniques observées). Les modélisations ne permettent pas de déterminer un jeu de paramètres unique mais l'ensemble des solutions permettant une représentation des données. L'ensemble des modèles présente deux branches (couleurs orange à rouge) d'ajustement potentiel des paramètres.

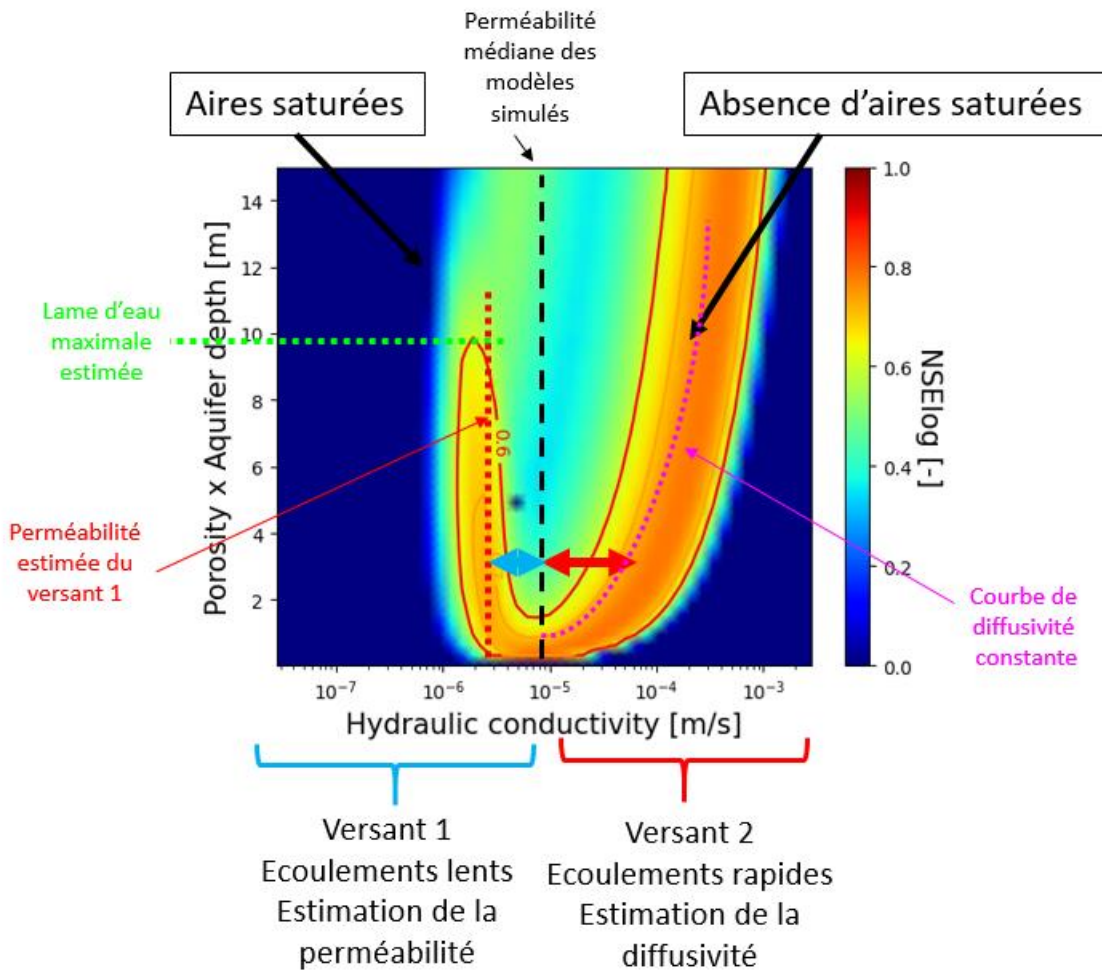


Illustration 26: Schéma de principe de la lecture des cartes d'exploration de paramètres avec deux branches de paramètres optimaux (teintes orangées/rouges) représentant le milieu. Sur la gauche, le versant 1 permettant de déterminer la perméabilité de l'aquifère régulant les écoulements les plus lents et permettant de générer les aires saturées. Sur la droite, le versant 2 permet de déterminer la diffusivité (Transmissivité/Coefficient d'emmagasinement) régulant les écoulements rapides.

Sur ce type de représentation, plus la branche de paramètres optimaux (couleurs orange à rouge) du versant 1 est écartée vers la gauche, moins le milieu est perméable (faible capacité à recharger et constituer un stock) et inversement, plus il tend vers le centre, plus la perméabilité est élevée. Pour la branche de droite (représentant le versant 2), plus cette branche est orientée vers la droite, plus les écoulements sont rapides (faible maintien du stock). Ainsi, plus les branches de paramètres optimaux sont écartées du centre moins le milieu aura la capacité à constituer un stock, plus elles sont resserrées vers le centre, plus la capacité à constituer un stock sera importante. Cette capacité de stockage est un élément majeur de la résilience des milieux aux sécheresses (Cornette, 2022). La lame d'eau maximale peut aussi être estimée à partir de la hauteur de la branche de gauche. Les détails de la procédure d'interprétation de ces modèles est disponible dans Cornette et al., 2022.

Les cartes d'optimisation sont fournies Illustration 27 pour les trois bassins modélisés (la Sélune, l'Oir et le Beuvron).

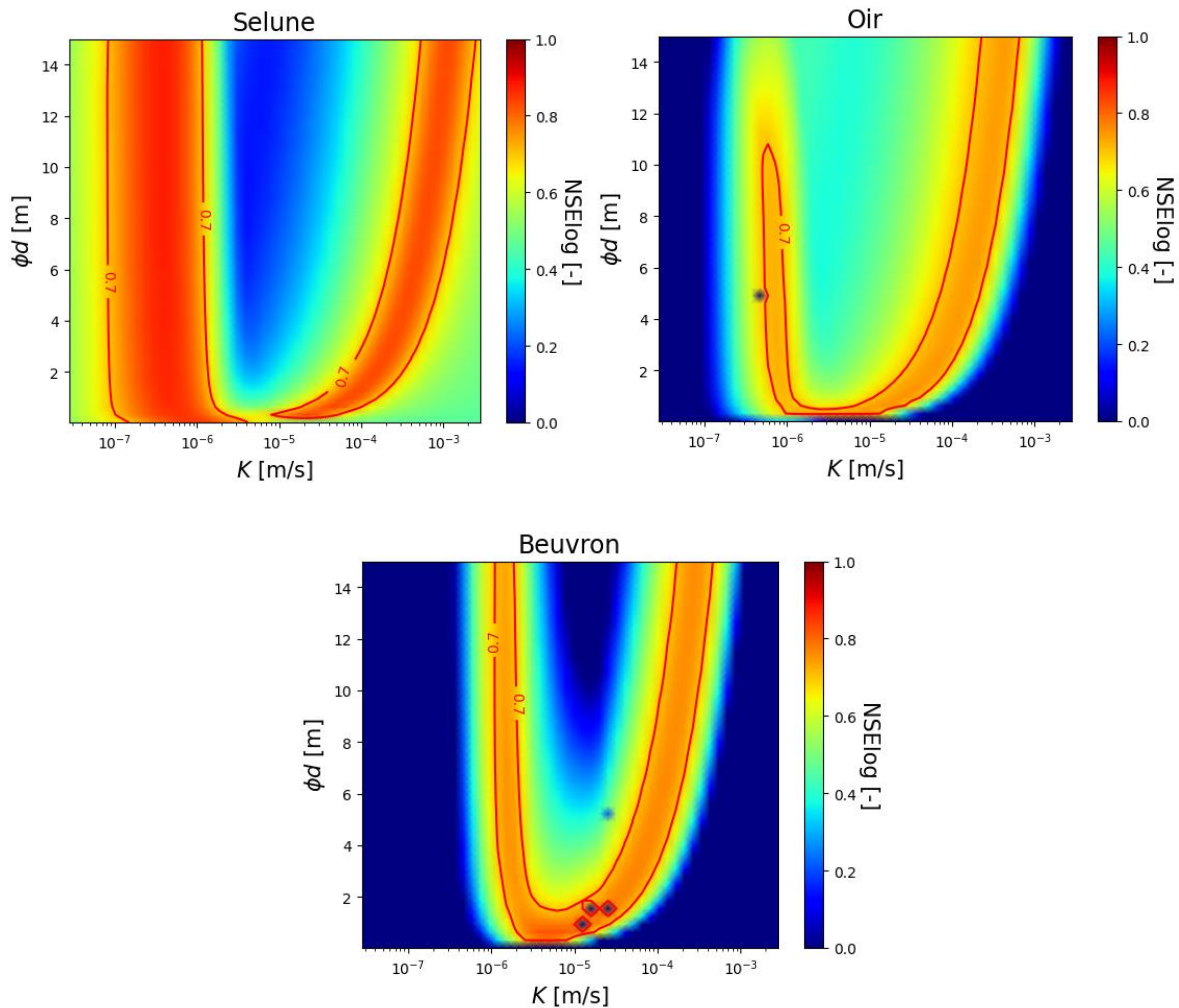


Illustration 27: Cartes NSE pour les stations modélisées (Sélune à Notre-Dame-du-Touchet; Oir à Ducey et Beuvron à Saint-Sénier-de-Beuvron)

Les cartes de NSE montrent des résultats différents sur les trois bassins. La Sélune à Notre-Dame-du-Touchet présente des branches de paramètres optimaux très écartées indiquant un milieu peu perméable avec de faibles capacités de stock. Les écoulements rapides lors de phases de crues sont représentés dans le modèle par un second versant avec une diffusivité importante. A l’opposé, le Beuvron a des branches de paramètres optimaux resserrées induisant une bonne capacité (pour un aquifère de socle) à constituer un stock.

L’estimation de la lame d’eau maximale n’est pas possible sur la Sélune et le Beuvron. Cette impossibilité d’estimation est due, pour le Beuvron, à l’absence d’assecs dans la chronique et, pour la Sélune, à une perméabilité faible (et donc un apport de la nappe à la rivière très faible et lent) ne permettant pas la détection d’une limite dans les chroniques. La valeur de la lame d’eau maximale peut être définie pour l’Oir. Cependant, cette valeur importante ici (emmagasinement de ~30%) doit être considérée comme une valeur maximale permettant les modélisations. La valeur réelle du milieu est très certainement inférieure à cette limite haute. Les limites sur la détermination des lames d’eau maximales par cette approche sont présentées dans (Cornette et al., 2022).

Les paramètres optimaux retenus pour chacun des modèles sont fournis dans le tableau suivant :

	Sélune			Oir			Beuvron		
	<i>min</i>	<i>moyenne</i>	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>moyenne</i>	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>moyenne</i>	<i>max</i>
Log K_1	-7,6	-6,4	-5,8	-7,6	-6,2	-5,5	-6,3	-5,7	-5,4
$\phi_1 d$ [m]	0,9	8,0	15,0	0,9	8,6	15,0	0,9	7,6	15,0
Log K_2	-7,6	-3,4	-2,6	-7,6	-3,5	-2,6	-6,2	-3,5	-2,8
$\phi_2 d$ [m]	0,0	7,1	15,0	0,0	7,3	15,0	0,3	7,1	15,0
$D (T/S)$	-5,8	-0,6	1,9	-5,8	-1,4	1,9	-4,5	-1,5	-0,9
Log K_2/K_1	1,7	3,2	4,6	2,0	2,8	3,9	0,8	2,1	2,8

Illustration 28 : Paramètres d'optimisation des modèles

Les modélisations réalisées pour les trois sous-bassins ont de très bonnes corrélations avec les débits observés. Elles permettent à la fois une bonne représentation des débits de crue et d'étiage mais aussi retranscrivent les cycles pluriannuels observés dans les chroniques. Un exemple pour le Beuvron est fourni Illustration 29. L'ensemble des chroniques pour les autres bassins est présenté en annexe 2.

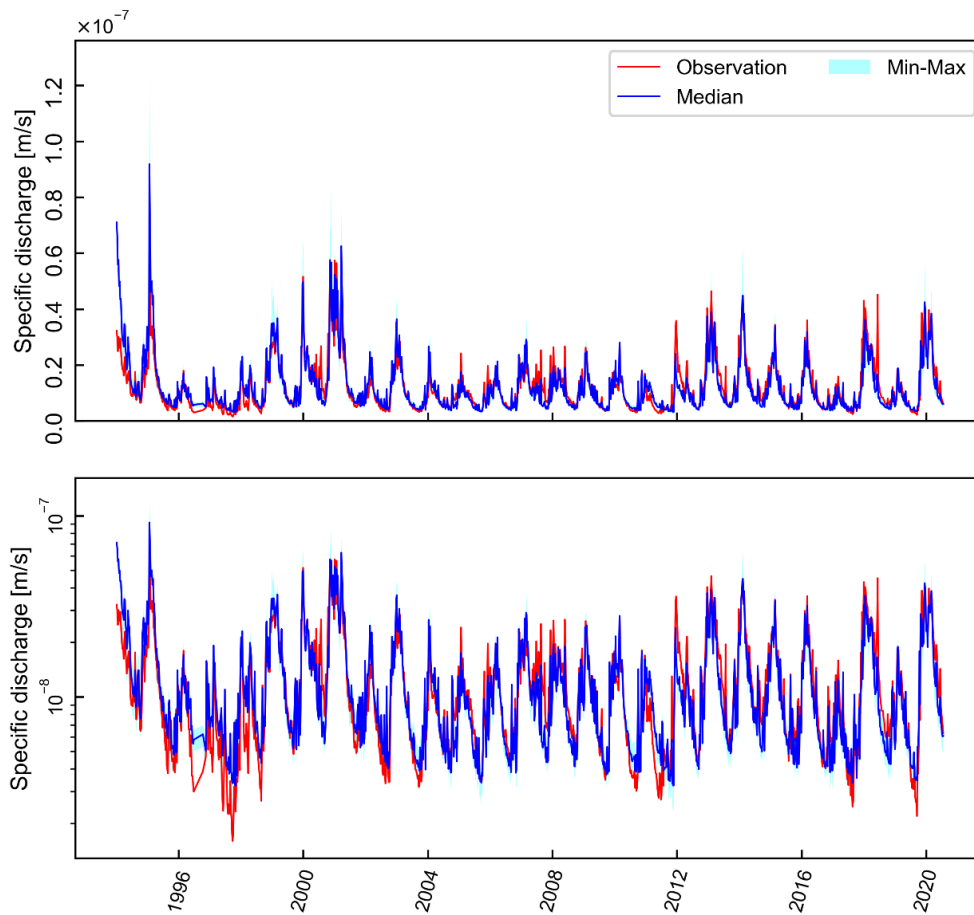


Illustration 29 : Comparaison des données (en rouge) et médiane des modèles (en bleu) sur le Beuvron. En haut représentation en échelle linéaire en bas en échelle logarithmique

Pour une analyse globale plus aisée, les variations saisonnières de débits spécifiques sont représentées Illustration 30 avec la médiane des observations sur l'ensemble de la période ainsi que la médiane des modèles en ne conservant qu'un versant et les modèles à deux versants. La comparaison des trois bassins montre une baisse rapide des débits spécifiques sur la Sélune reflétant la forte variabilité des flux. A l'opposé, le Beuvron a des variations plus faibles et donc des débits plus constants dans le temps. Le comportement du bassin est bien représenté dans chacun des cas.

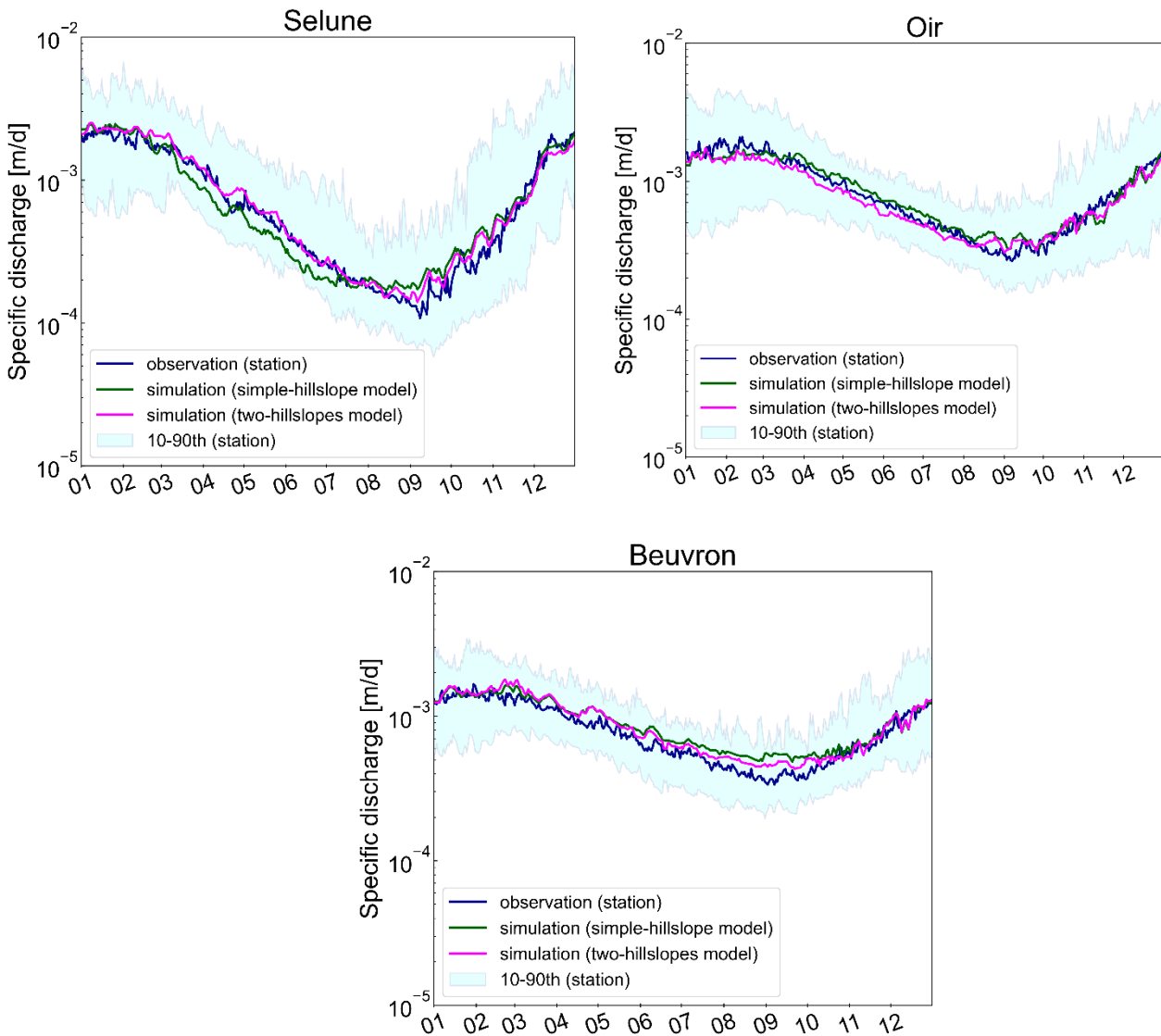


Illustration 30 : Variations saisonnières de débit spécifique (médiane) et comparaison des modèles à un et deux versants. Les plages colorées représentent les premiers et derniers déciles.

La dynamique entre le signal d'entrée du modèle (recharge par les précipitations) est comparée au débit spécifique des cours d'eau. Les modélisations permettent aussi d'estimer le taux de saturation et la contribution relative des deux versants modélisés au cours du temps. Ces décompositions sont présentées pour la Sélune et le Beuvron Illustration 31 et en annexe pour l'Oir.

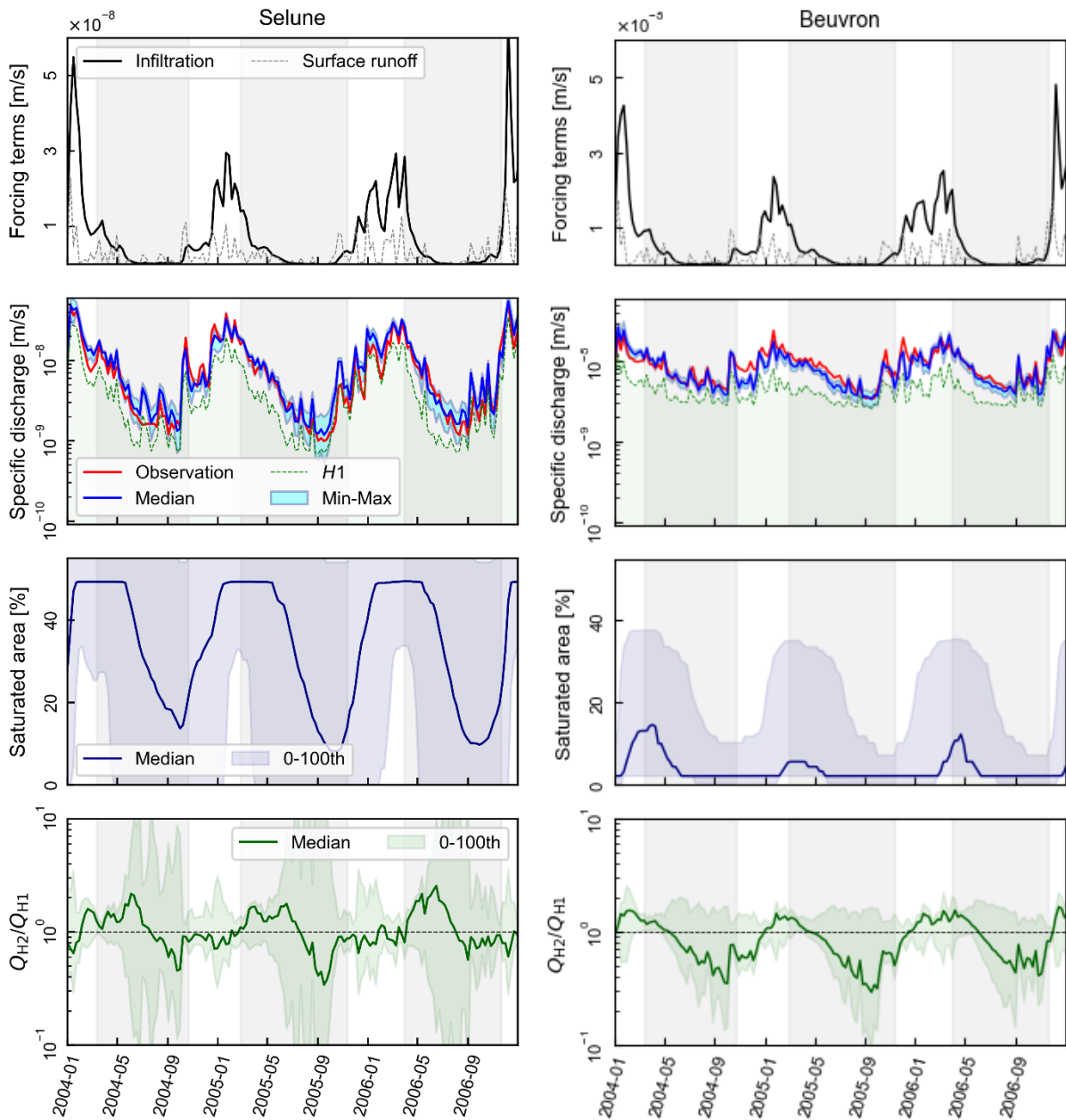


Illustration 31 : Résultats des modèles calibrés pour la période 2004-2006. Les résultats sur l'ensemble de la période de calibration sont présentés en annexes. Les colonnes de gauche et de droite représentent respectivement les résultats pour les bassins versants de la Sélune à Notre-Dame-du-Touchet et du Beuvron à Saint-Sénier. Les bandes grises et blanches successives soulignent la période globale de récession d'avril à octobre et la période de recharge de novembre à mars. a) et b) montrent les séries temporelles d'infiltration et le ruissellement de surface données par le modèle hydrométéorologique SURFEX. c) et d) montrent les séries temporelles du débit spécifique observé (rouge) et modélisé (bleu et vert). Les courbes vertes représentent le débit médian des modèles de versant H1 sélectionnés, c'est-à-dire le versant présentant la conductivité hydraulique la plus faible. Les lignes bleues et les zones cyan représentent le cumul des débits modélisés et leur variabilité pour les deux versants équivalents H1 et H2. La différence entre les courbes bleues et vertes illustre la contribution du versant H2 moins saturé. e) et f) montrent l'évolution de la surface saturée médiane du bassin versant entre les modèles (ligne bleu marine) et sa variabilité (zone bleu marine). g) et h) montrent le rapport de débit entre les deux versants Q_{H2}/Q_{H1} . La ligne horizontale en pointillés souligne la valeur de 1 au-dessus de laquelle le débit est contrôlé de manière dominante par le versant H2 et au-dessous de laquelle il est dominé par le versant H1.

Cette décomposition des différents éléments du modèle montre que malgré un forçage climatique similaire (Ligne 1 - Illustration 31), la dynamique des crues et récessions (Ligne 2 - Illustration 31) est très différente pour les deux bassins avec de fortes variations de débit spécifique pour la Sélune et une plus faible variabilité pour le Beuvron. Le taux estimé de saturation du milieu au cours du temps (Ligne 3 - Illustration 31) est aussi différent avec pour la Sélune une forte saturation du milieu en raison d'un faible perméabilité et emmagasinement (induisant des refus d'infiltration et du ruissellement) alors que la saturation pour le Beuvron est plus limitée aux zones proches de la rivière en raison d'une meilleure perméabilité et infiltration sur le reste du territoire. Ces différences de comportement peuvent être rattachées aux différentes géologies avec un substratum granitique pour le Beuvron et schisteux pour la Sélune à Notre-Dame-du-Touchet. Le ratio de débit provenant de chacun des versants est présenté (Ligne 4 - Illustration 31) et indique deux comportements différents entre les bassins. Pour la Sélune, la contribution de l'un ou l'autre des versants équivalents présente une alternance tout au long de l'année. La contribution des versants équivalents produisant principalement des écoulements rapides semble contrôlée à l'échelle des événements pluvieux. A l'inverse, pour le Beuvron, la contribution relative de chaque versant est répartie de manière saisonnière avec un versant H1 dominant en période de récession et un versant H2 dominant en période de recharge.

Cette modélisation propose une approche complémentaire à celle réalisée par l'analyse de chroniques et apporte de nouvelles informations sur le milieu. Si selon le BFI, l'Oir est plus contributif au cours d'eau que le Beuvron, l'analyse par modélisation indique que le milieu souterrain semble plus perméable dans cette zone et que la forte contribution de l'Oir provient aussi d'autres critères que géologique, comme par exemple la géomorphologie du bassin.

3.7. HISTORIQUE DE L'EVOLUTION DES RESSOURCES - REPRESENTATIVITE DE LA STATION DEBITMETRIQUE DE VEZINS SUR LES TENDANCES LONG TERME

3.7.1. Méthodologie

L'analyse de la dynamique long terme entre climat et ressources a été effectuée au travers de l'analyse d'anomalies normalisées. La procédure utilisée est proche de celle présentée par (Boutt, 2018; Weider and Boutt, 2010). Ces anomalies sont calculées suivant l'équation suivante :

$$A_i = \frac{m_i - \bar{m}}{\sigma_m} \quad \text{Equation 2}$$

Avec m_i la valeur mensuelle, \bar{m} la moyenne pour un mois sur l'ensemble de la série et σ_m l'écart type pour le mois sur l'ensemble de la série temporelle. Une moyenne mobile sur 12 mois est ensuite appliquée sur les anomalies mensuelles A_i . Cette technique atténue les fluctuations court terme et accentue les fluctuations long terme. Cette méthodologie permet de comparer entre elles les données d'un type différent, afin de comparer leurs tendances relatives et leurs grandes tendances d'évolution.

Les analyses sont réalisées à partir de données journalières (niveaux piézométriques, données climatiques). Un exemple de calcul d'anomalie est présenté Illustration 32 pour la Sélune à Saint-Aubin-de-Terregatte. Sur cette illustration, le signal brut est présenté en haut en noir. En dessous, sont représentées les anomalies mensuelles (en noir) et les anomalies mensuelles lissées (en rouge). Les moyennes des différentes données (anomalies lissées) sont ensuite comparées qualitativement pour les sites.

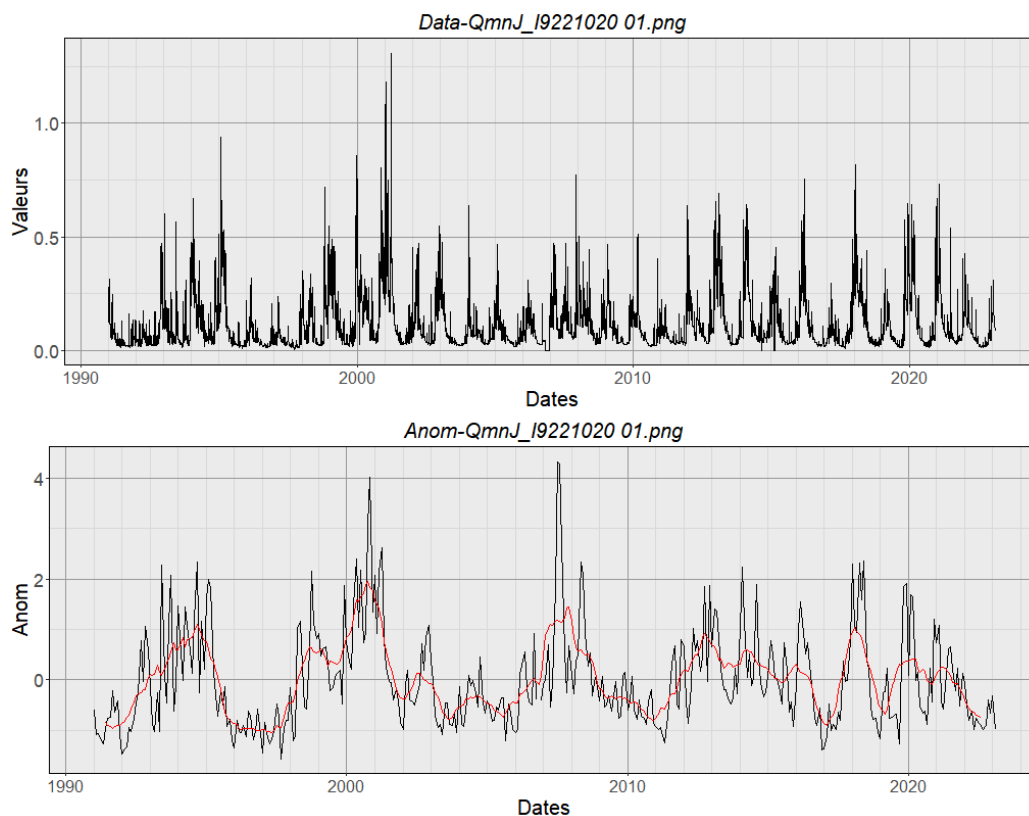


Illustration 32 : Décomposition des chroniques de débit de la Sélune à Saint Aubin de Terregatte (1922102001) avec en haut les données brutes journalières (en m³/s) et en bas les anomalies mensuelles (en noir) et anomalies lissées sur 12 mois (en rouge).

3.7.2. Résultats

Les chroniques de débit journalier des cours d'eau ont été analysées selon la méthode présentée en section 3.7.1 afin d'évaluer les différences d'évolutions pluriannuelles entre les différents cours d'eau et éventuellement un impact du barrage. Les chroniques d'écart aux normales sont présentées Illustration 33. Les chroniques ont été normalisées sur une période identique (2000-2022) pour éviter les biais.

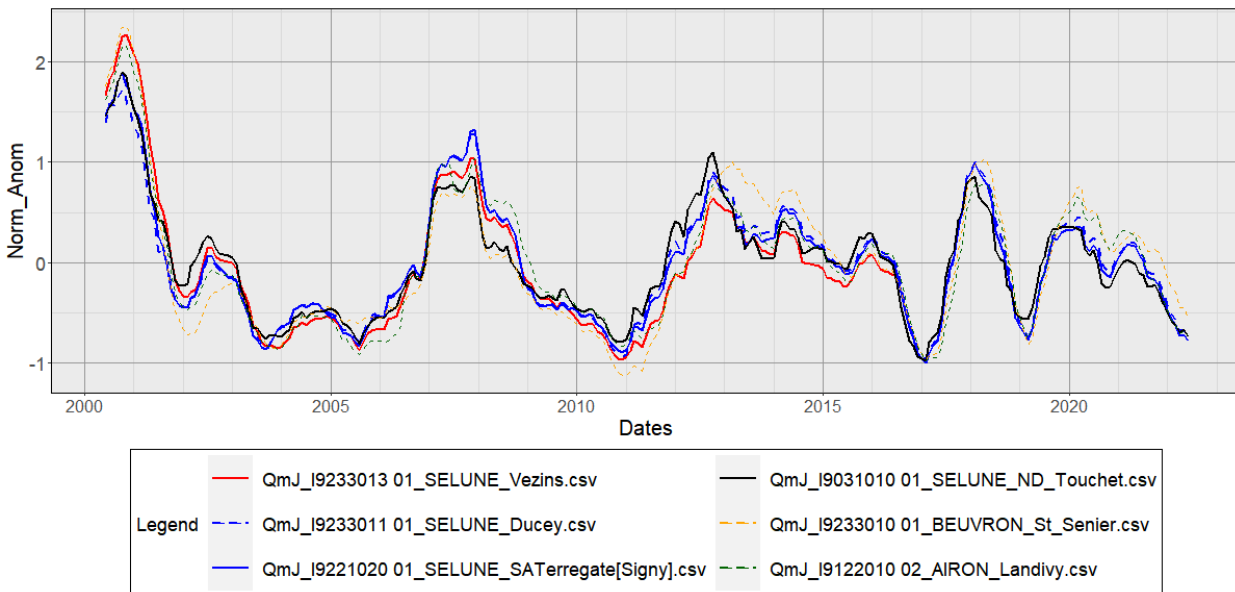


Illustration 33 : Evolution des écarts aux normales mensuelles lissées des différentes stations hydrométriques

La comparaison montre que l'ensemble des chroniques a une dynamique globalement similaire. Un léger retard est observable pour l'Airon et le Beuvron par rapport à la Sélune. La station de Vezins bien que n'étant pas une donnée brute mais issue d'une reconstruction a un comportement similaire et donc représentatif de la zone d'étude sur cette échelle de temps. Cette chronique semble permettre de reconstruire un historique pertinent de l'évolution des ressources sur une longue période.

Ceci a été réalisé Illustration 34. Sur cette seconde figure, les chroniques ont été normalisées sur des périodes différentes. De ce fait, les faibles variations d'intensité entre les différentes chroniques ne sont pas interprétables. Toutefois, on observe une bonne corrélation entre les chroniques sur les périodes de dates communes. Il semble donc possible de reconstruire une dynamique générale des ressources depuis 1934 avec une bonne confiance depuis 1975 en raison de la similarité avec l'Airon malgré des différences d'amplitude notables entre les deux chroniques. Les niveaux bas observés entre 2017 et 2022 l'ont déjà été par le passé avec notamment la sécheresse intense de 1976 mais aussi une période de fort déficit entre 1940 et 1960 (minimums en 1949 et 1956). Les événements marquants récents ne sont donc pas des extrêmes historiques. Des événements de sécheresse plus intenses sont donc à prévoir.

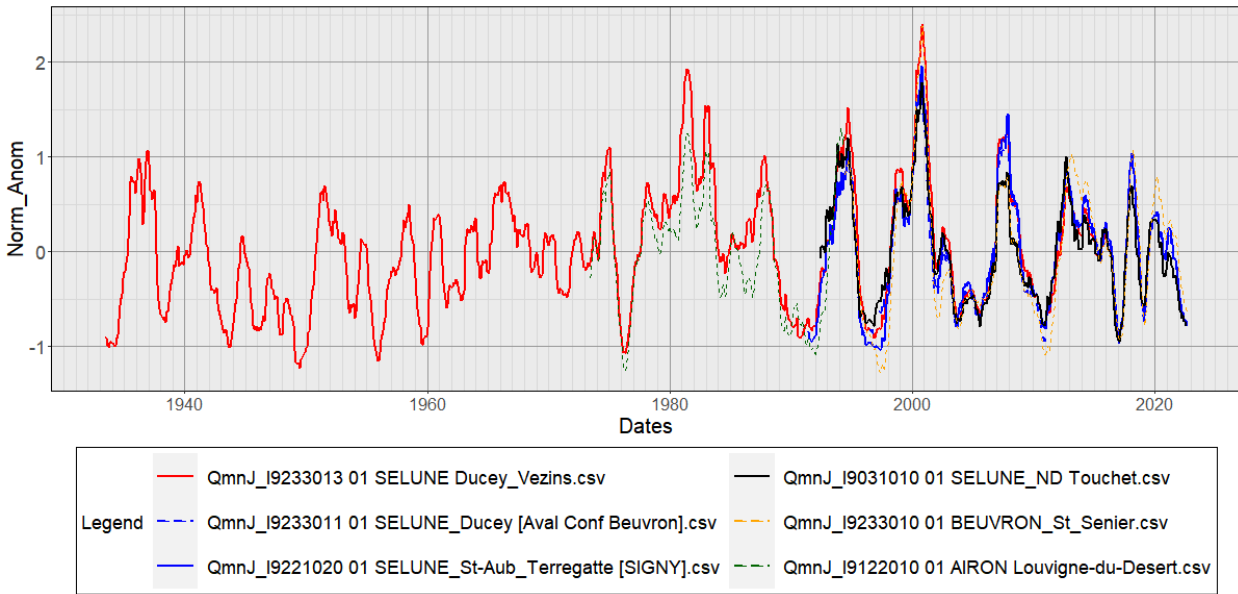


Illustration 34: Ecart aux normales mensuelles lissées des débits journaliers aux stations de Ducey/Vezins (en rouge) et comparaison avec les autres stations disponibles.

3.8. DELAIS ENTRE LES DIFFERENTS COMPARTIMENTS HYDROLOGIQUES

La comparaison des écarts aux normales peut permettre d'évaluer les temps représentatifs entre les compartiments. L'illustration 35 illustre les décalages temporels avec en noir les précipitations (station de Louvigné-du-Désert), en bleu deux stations de débits de la Sélune et en orange et vert les piézomètres à Saint-Laurent-de-Terregatte et Louvigné-du-Désert respectivement. Les anomalies positives représentent des périodes de hautes eaux (supérieures aux normales) et négatives les valeurs inférieures aux normales (période de sécheresses). Cette figure quantifie le transfert des grandes variations climatiques, telles que les précipitations vers les compartiments hydrologiques de surface et souterrains.

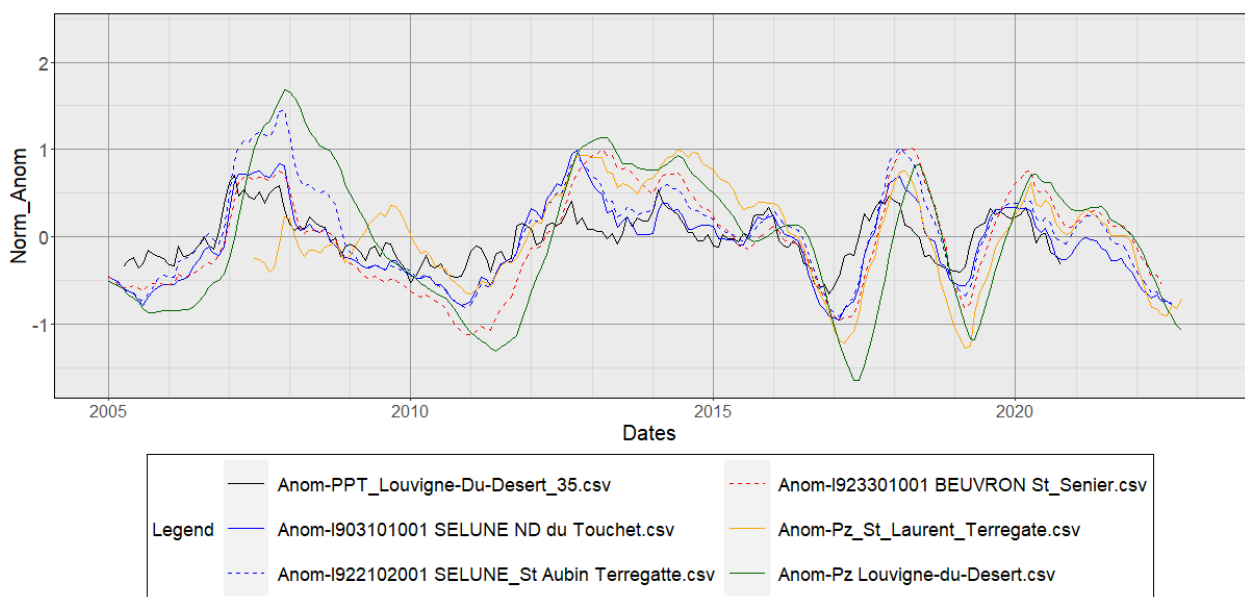


Illustration 35 : Ecart aux normales mensuelles lissées des précipitations, débit de cours d'eau et piézomètres.

Les délais entre les anomalies de précipitations, les cours d'eau et les piézomètres ont été quantifiés par corrélations croisées. Ceci permet de quantifier les effets mémoire des différents piézomètres (hauts et bas de versants). Un exemple de corrélogramme entre les anomalies de précipitations et de niveaux piézométriques à Saint-Laurent-de-Terregatte et est fourni Illustration 36. Ce corrélogramme indique une corrélation optimale pour un décalage temporel de 4 mois (point rouge sur la figure). La chronique intégrant ce décalage temporel est présentée Illustration 37.

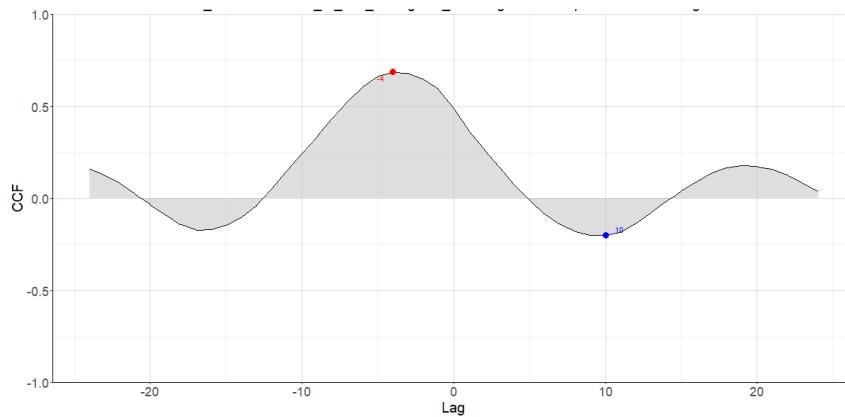


Illustration 36: Corrélogramme croisé entre anomalie de précipitations et anomalies de niveaux piézométriques à Saint-Laurent-de-Terregatte

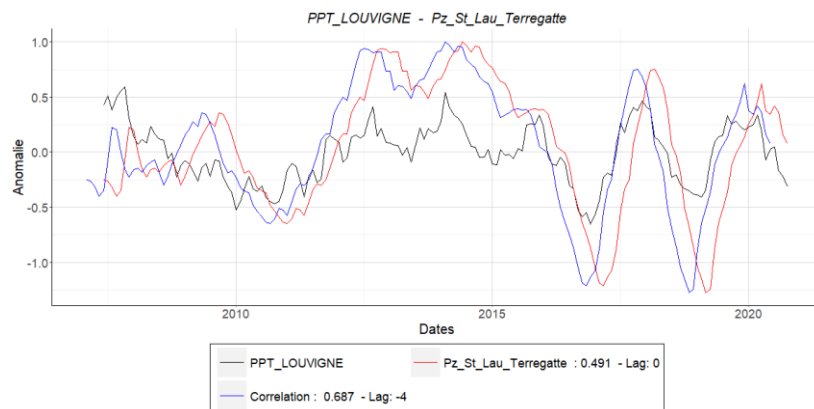


Illustration 37 : Chroniques d'anomalies de précipitations (en noir), d'anomalie de niveau piézométrique (en rouge) et d'anomalie piézométrique avec ajustement temporel (en bleu – Décalage temporel de 4 mois)

Les décalages temporels suivants ont été estimés. Du fait de l'analyse sur des anomalies mensuelles la résolution des décalages est aussi mensuelle.

Synthèse des corrélations par rapport aux précipitations	Coefficient de corrélation (Après ajustement temporel)	Delai (mois)
Qjm_SELUNE_Notre-Dame-Du-Touchet	0,874	1
Qjm_SELUNE_Saint-Aubin-de-Terregate [Signy]	0,868	2
QjM_BEUVRON_Saint-Senier-de-Beuvron	0,818	3
Pz_Saint-Laurent-de-Terregatte	0,687	4
Pz-Louvigné-du-Desert	0,861	6

Illustration 38 : Récapitulatifs des écarts entre anomalies de précipitations et les autres compartiments du cycle hydrologique (La Station de Signy est influencée par la présence des barrages).

On observe ainsi le décalage dans le temps de l'effet des précipitations. Les évènements passés gardent un impact durant environ 1 mois en amont du cours d'eau (Sélune à Notre-Dame-du-Touchet). A l'autre extrémité, le piézomètre de Louvigné-du-Desert présente un décalage de 6 mois. Entre ces deux extrêmes, le cours d'eau au fur et à mesure de son cheminement et de la contribution relative des eaux souterraines présente des délais de 2 à 3 mois. L'estimation du délai à la station de la Sélune à Saint-Aubin-de-Terregatte a été réalisée sur des débits influencés par les barrages qui ont pu impacter l'estimation.

4. Conclusions

La présente étude a permis de caractériser la dynamique des ressources en eau à l'échelle du bassin versant de la Sélune. Elle a permis de mettre en avant les différences de comportements entre les hauts et bas altimétriques de versants qui correspondent aussi à des variations de lithologies. Elle montre que la Sélune amont est particulièrement vulnérable aux variations climatiques en raison de faibles capacités de stockage mais que les hauts de versants, plus résilients à un évènement de sécheresse, ont un effet mémoire pouvant atteindre 6 mois qui peut s'amplifier en cas de succession d'évènements secs.

L'effet de l'arasement des barrages ne semble pas devoir perturber les grandes dynamiques pluriannuelles des écoulements. Les variations seront principalement visibles en période d'étiage. La sécheresse de 2022, compte tenu de son caractère exceptionnel ne permet pas une comparaison fine de la dynamique des cours d'eau avec les années précédentes avant arasement des barrages. Cependant, les mesures de la station de la Sélune à Signy montrent que, malgré cet évènement exceptionnel, les débits d'étiages sont restés suffisamment importants pour maintenir naturellement un débit au-dessus du 10^{ème} du module. Toutefois, les travaux sur le barrage de la Roche-qui-boit n'ayant pas été totalement finalisés, l'impact de ce barrage est encore possible sur la période d'analyse. Par ailleurs, cette sécheresse exceptionnelle a eu lieu alors que les niveaux dans les aquifères qui permettent ce soutien d'étiage étaient proches des moyennes. Or, les analyses menées montrent un effet mémoire des évènements passés sur les stocks. Dans des conditions similaires mais avec un stock initialement bas en raison de faibles recharges (ex : sécheresses hivernales) sur des années précédentes, les mêmes conditions météorologiques pourraient avoir des effets sur les débits plus importants.

Les modélisations réalisées permettent d'extraire les propriétés hydrodynamiques du milieu à partir de chroniques de cours d'eau initialement co-influencées par des éléments géomorphologiques et climatiques. Ce filtrage des éléments géomorphologiques et climatiques n'était pas possible avec les approches d'analyses de chroniques précédentes et montre la complémentarité des approches. De même, cette décomposition n'est pas possible avec les modèles à réservoir couramment utilisées. Cette modélisation est donc complémentaire de l'étude BRGM (David et al., 2022). Les estimations des propriétés hydrodynamiques par les modélisations par versant équivalent illustrent les différences de dynamiques à l'échelle du bassin versant et fournissent des informations sur les perméabilités équivalentes de versant et des estimations de leur emmagasinement. En comparaison des analyses similaires réalisées en Bretagne (Cornette et al., 2022), sur un large panel de bassins versants (80), ce bassin, en raison des capacités des hauts de versant, présente une bonne résilience par sa capacité à constituer du stock en comparaison d'une majorité des bassins versants bretons. La comparaison avec l'analyse de chroniques permet une validation de l'intérêt de la méthode pour l'analyse des aquifères de socle.

La présente étude a aussi permis d'évaluer la représentativité de la série temporelle de la station fictive de la Sélune à Vezins¹. Cette série montre notamment que, malgré un stock relativement important pour une zone de socle (en grande partie sur les zones plutoniques, sources du Beuvron), la reconstruction réalisée des grandes variations pluriannuelles montre que des évènements plus critiques que la situation de 2022 ont déjà eu lieu et pourraient à nouveau subvenir.

La présente étude montre que, si les barrages, par le stock d'eau qu'ils permettraient de constituer pouvaient être des éléments majeurs de la résilience du territoire face aux sécheresses, la disparition de ceux-ci, malgré les avantages environnementaux que cet arasement apporte, induit aussi potentiellement une augmentation

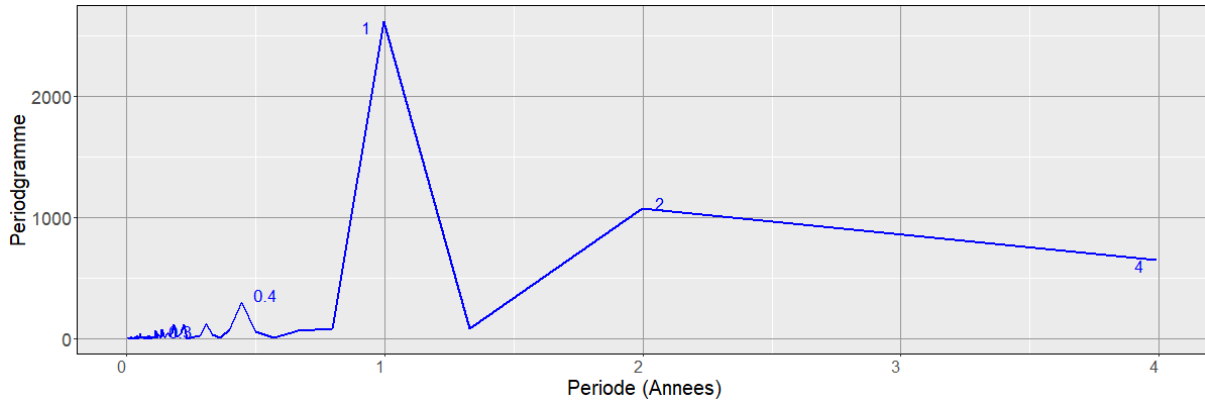
¹ Pour rappel, il s'agit d'une station fictive, produite par EDF, des débits de sortie du barrage de Vezins et correspondant aux apports naturels reconstitués (ANR) c'est-à-dire au débit qui coulerait si le barrage n'existait pas (cf. méthodologie présentée dans le rapport section 2.1.2)

de la vulnérabilité de la Sélune face aux sécheresses. La résilience du territoire sera dorénavant liée au ressources souterraines (principalement les hauts de versants) dont la connaissance devra être approfondie par des suivis notamment pour une anticipation des risques.

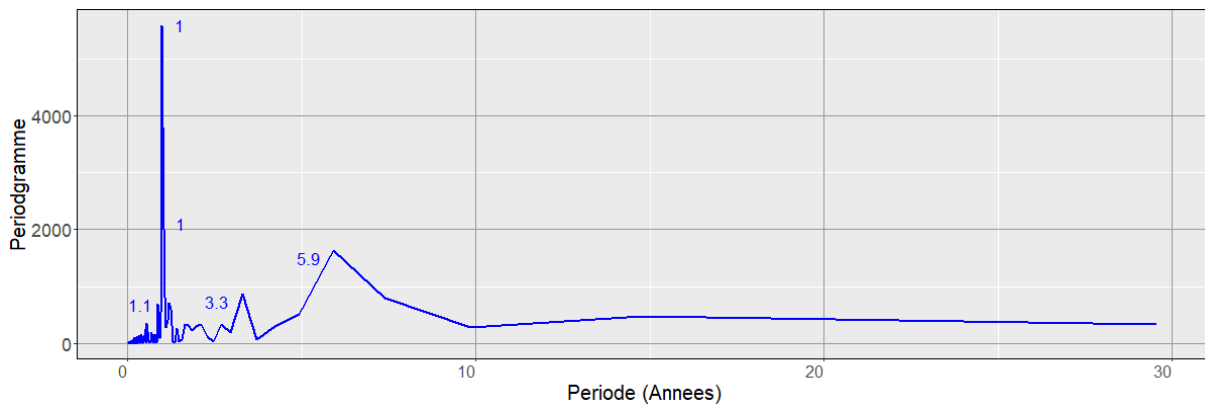
5. Références

- Boutt, D.F., 2018. Assessing hydrogeologic controls on dynamic groundwater storage using long-term instrumental records of water table levels. *Hydrological Processes* 31, 1479–1497. <https://doi.org/10.1002/hyp.11119>
- Cornette, N., 2022. Impact du changement climatique sur les ressources en eau de subsurface à l'horizon 2050-2100 dans un contexte de milieux de socle cristallin (These en préparation). Rennes 1.
- Cornette, N., Roques, C., Boisson, A., Courtois, Q., Marçais, J., Launay, J., Pajot, G., Habets, F., de Dreuzy, J.-R., 2022. Hillslope-scale exploration of the relative contribution of base flow, seepage flow and overland flow to streamflow dynamics. *Journal of Hydrology* 610, 127992. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127992>
- Courtois, Q., 2019. Ressources en eau et transferts de solutés dans les zones altérées superficielles des régions de socle (Thèse de Doctorat). Univ.rennes 1, Rennes.
- David, P.-Y., Lanini, S., Compère, F., 2022. Prédiction de l'évolution des débits des ressources en eau du Sud Manche à l'horizon 2050 (No. BRGM/RP-71398-FR). BRGM.
- Gustard, A., Demuth, S., 2008. Manual on Low-flow Estimation and Prediction. WMO.
- Marçais, J., de Dreuzy, J.-R., Erhel, J., 2017. Dynamic coupling of subsurface and seepage flows solved within a regularized partition formulation. *Advances in Water Resources* 109, 94–105. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.09.008>
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Ritter, A., Muñoz-Carpena, R., 2013. Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology* 480, 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.004>
- Schroëtter, J.-M., Boisson, A., Lucassou, F., Bader, A.-G., Beccaletto, L., Ouergui, Y., Tournlière, B., 2020. ANAFORE: Analyse multicritère des données de forages les plus productifs de Bretagne - Rapport Final (No. BRGM/RP-70280-FR). BRGM.
- Seguin, J.-J., Allier, D., Croiset, N., Klinka, T., Manceau, J.-C., 2018. ESTHER. Etude de Séries Temporelles en Hydrogéologie avec le logiciel R. Guide d'utilisation. (No. BRGM/RP-67518-FR). BRGM.
- Tallaksen, L.M., Lanen, H.A.J. van, 2004. *Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. Elsevier.
- Weider, K., Boutt, D.F., 2010. Heterogeneous water table response to climate revealed by 60 years of ground water data. *Geophysical Research Letters* 37. <https://doi.org/10.1029/2010GL045561>

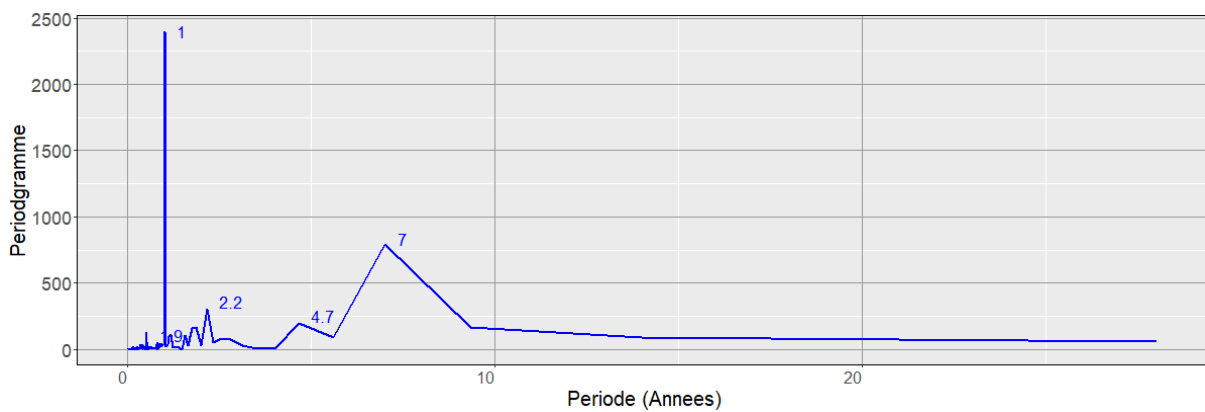
Annexe 1 Périodogrammes des cours d'eau



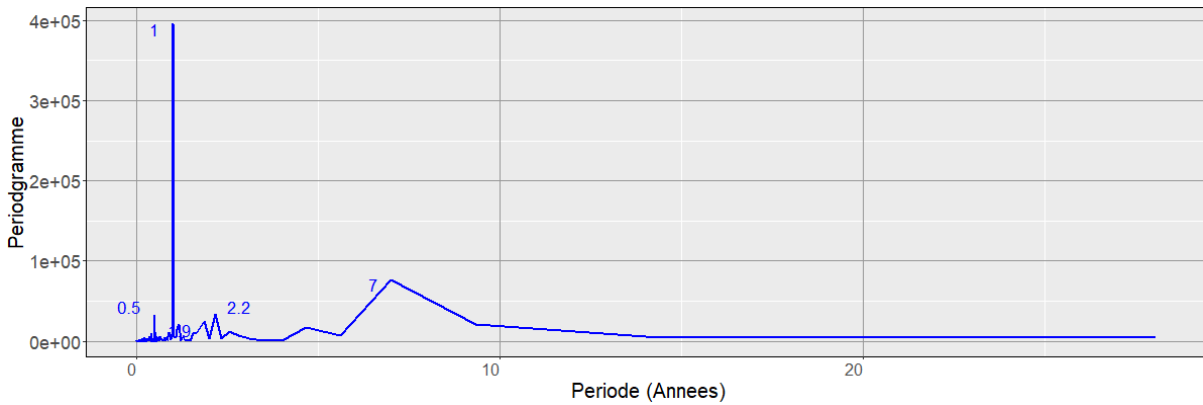
Airon à Landivy



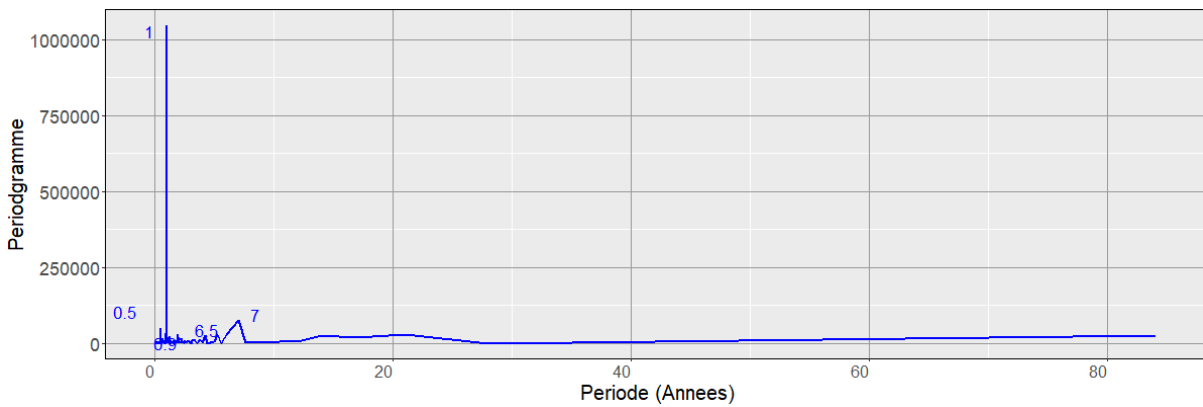
Airon à Louvigné-du-Desert



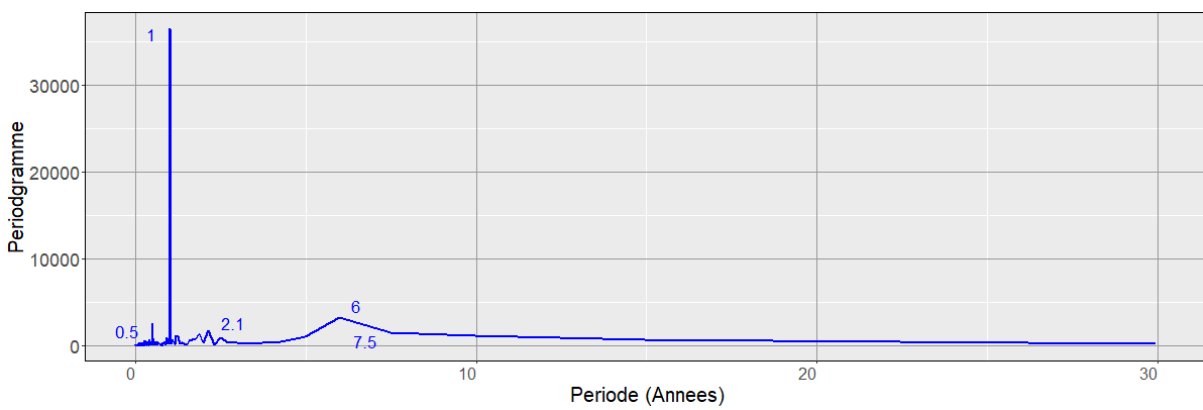
Beuvron à Saint-Sénier



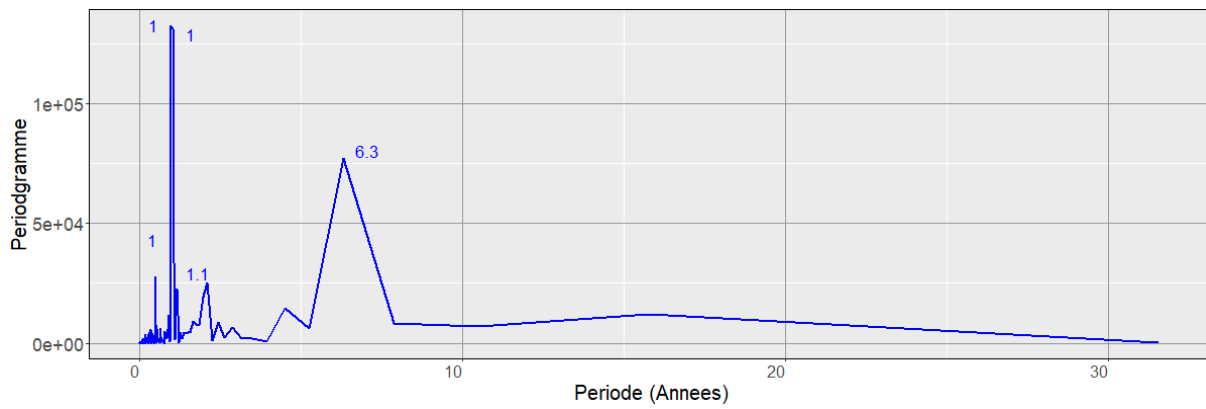
Sélune à Ducey (Aval confluence Beuvron)



Sélune à Vezins



Sélune à Notre-Dame-Du-Touchet



Sélune à Saint-Aubin-de-Terregatte [Signy]

Annexe 2 Résultats complémentaires de modélisation

Bassin de la Sélune Amont

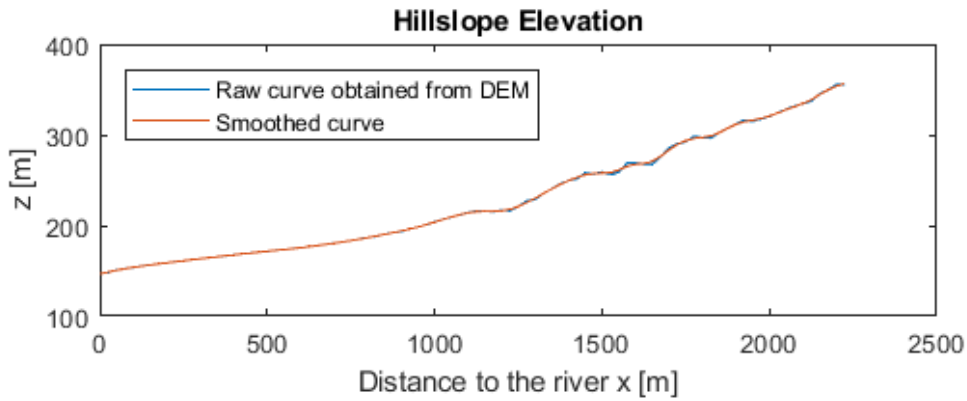


Illustration : Morphologie 1D utilisée dans le modèle.

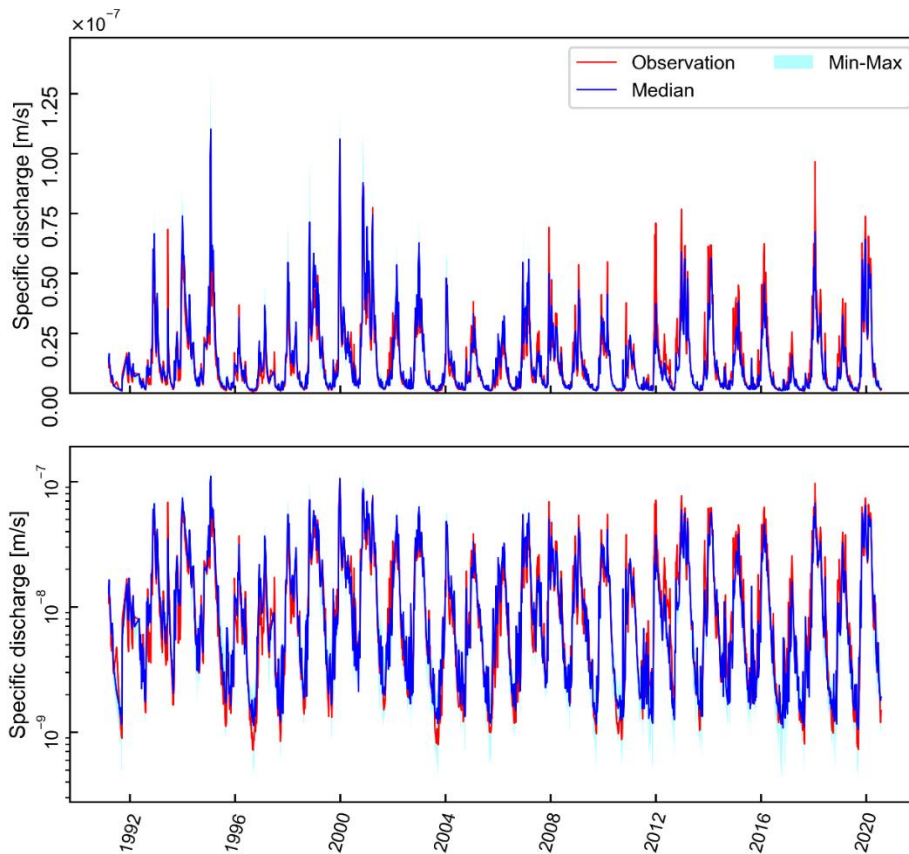


Illustration : Comparaison des données (en rouge) et médiane des modèles (en bleu). En haut représentation en échelle linéaire en bas en échelle logarithmique

Bassin de l'Oir

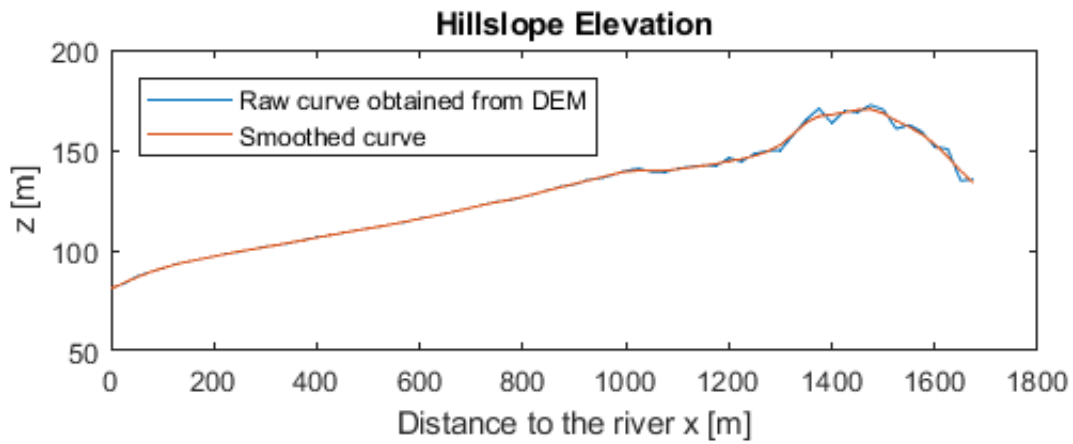


Illustration : Morphologie 1D utilisée dans le modèle.

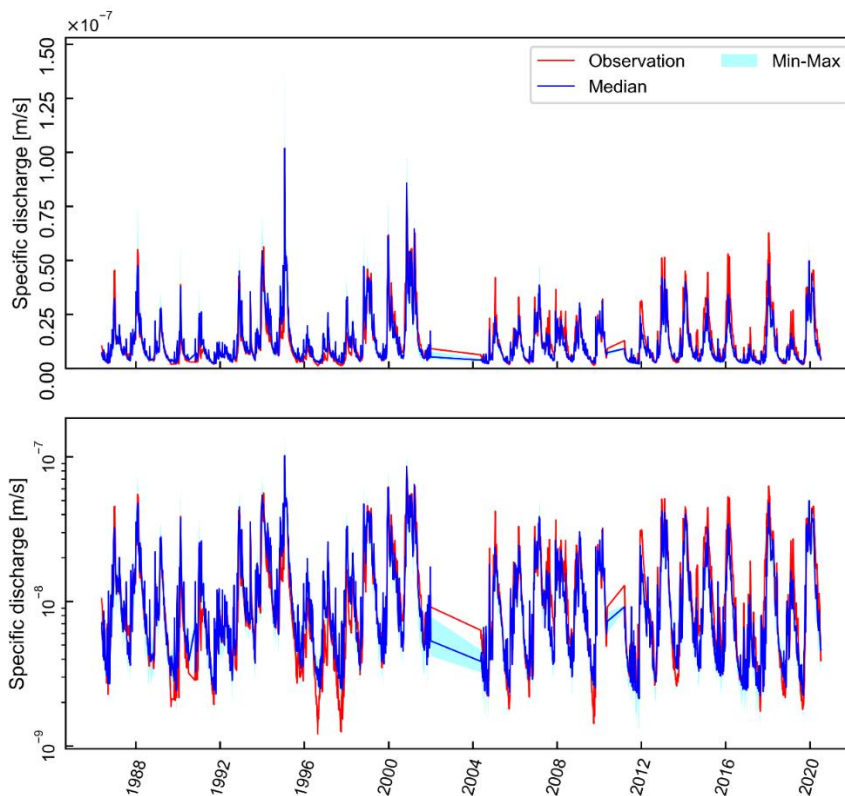


Illustration : Comparaison des données (en rouge) et médiane des modèles (en bleu). En haut représentation en échelle linéaire en bas en échelle logarithmique

Bassin du Beuvron

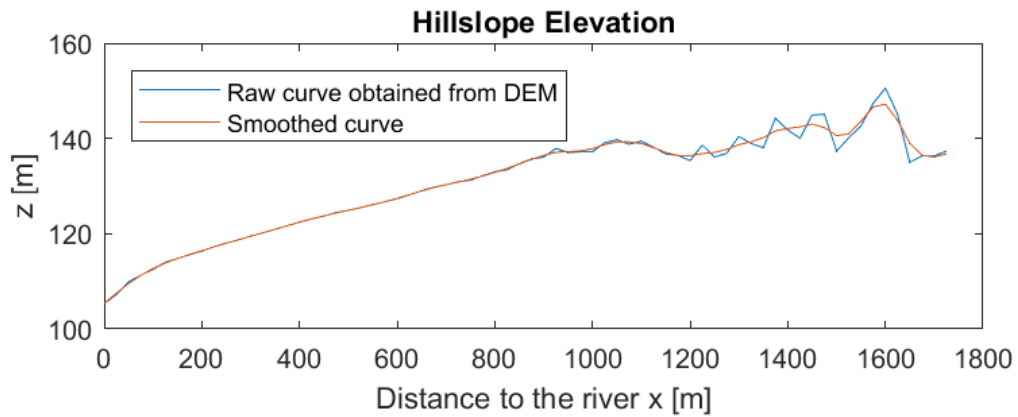


Illustration : Morphologie 1D utilisée dans le modèle.

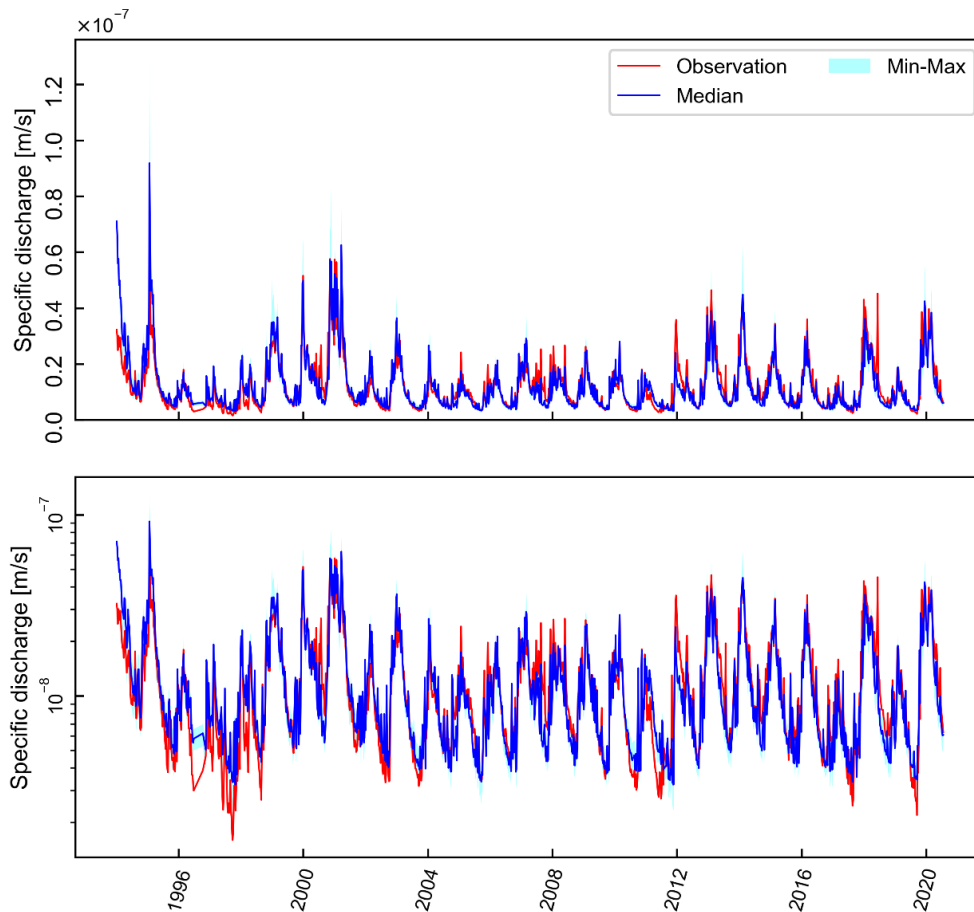
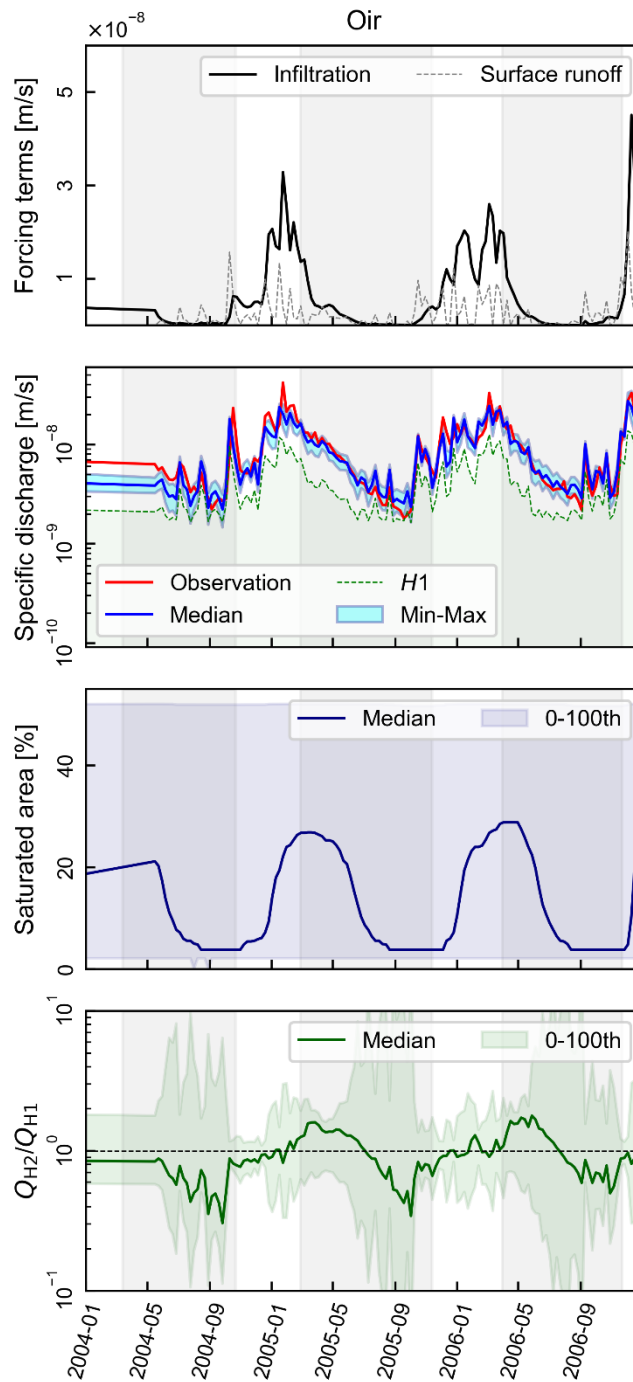


Illustration : Comparaison des données (en rouge) et médiane des modèles (en bleu). En haut représentation en échelle linéaire en bas en échelle logarithmique

Annexe 3 Résultats des modèles calibrés pour la période 2004-2006 pour l'Oir





**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

Direction régionale Bretagne

Adresse 2 rue de Jouanet
3500 Rennes – France
Tél. : 02 99 84 26 70

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm