



HAL
open science

Dynamique Fluviale : Flux hydriques, sédimentaires et chimiques - rapport bilan 2022-2023

Francois Meric, Ophélie Fovet, Alain Crave, Laurent Jeanneau, Anne-Julia Rollet

► **To cite this version:**

Francois Meric, Ophélie Fovet, Alain Crave, Laurent Jeanneau, Anne-Julia Rollet. Dynamique Fluviale : Flux hydriques, sédimentaires et chimiques - rapport bilan 2022-2023. INRAE. 2023. hal-04839983

HAL Id: hal-04839983

<https://hal.inrae.fr/hal-04839983v1>

Submitted on 16 Dec 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.



**eau
seine
NORMANDIE**

INRAE

la science pour la vie, l'humain, la terre



Programme Sélune

Phase « Post-Travaux d'arasement »

Rapport bilan 2022-2023

Dynamique fluviale

Volet 1

Flux hydriques, sédimentaires et chimiques

Auteurs

**François MERIC¹, Ophélie FOVET¹, Alain CRAVE², Laurent
JEANNEAU², Anne-Julia ROLLET³**

1 : UMR SAS INRAE-Agro campus Ouest, Sol Agro hydro système Spatialisation (SAS)

2 : UMR CNRS-Université de Rennes 1, Géosciences Rennes

3 : UMR LETG, Université de Rennes 2

Décembre 2023

Table des figures

Figure 1 Localisation des stations de suivi multi-paramètres, des anciens barrages et de la station météo sur le bassin versant de la Sélune.	3
Figure 2 Gauche : station INRAE du Pont de Signy (aval) ; droite : préleveur automatique ISCO 5800 à cette même station.	4
Figure 3 Station INRAE-EDF du pont de Virey (amont) ; gauche : support des sondes multi-paramètres ; droite : installation électrique avec la centrale d'acquisition, les différents capteurs et les batteries.	5
Figure 4 Ensemble des analyses réalisées sur un échantillon d'eau prélevé.	7
Figure 5 Localisation des pièges à sables, des galets équipés de traceurs et des mouilles sur Virey et en aval du barrage de la Roche-Qui-Boit.	8
Figure 6 Gauche : relation Turbidité-MES de la station amont de Virey intégrant les données de 2015 à 2023 ; Droite : relation Turbidité-MES de la station aval de Signy intégrant les données de 2022-2023. La zone grisée représente l'intervalle de confiance à 95%.	10
Figure 7 Localisation des points de prélèvements sur les affluents suivis et leurs bassins versants associés.	12
Figure 8 Illustration d'un dépôt sédimentaire suite à la vidange de la retenue de la RQB. Le 8 juin 2022 au niveau du pont du bateau.	13
Figure 9 Localisation des points de mesures des dépôts sédimentaires lors des campagnes de novembre 2022 et septembre 2023.	14
Figure 10 Vues aérienne (à gauche) et latérale (à droite) de la stratégie d'échantillonnage mise en place.	14
Figure 11 Localisation des échantillons de source de matière organique particulaire (S _{Ag} : sol agricole, Fo : litière et sol forestier, Sed : sédiment, MES : matières en suspension).	16
Figure 12 Débit spécifique en fonction des précipitations sur l'ensemble des années suivies pour les stations amont et aval.	17
Figure 13 Précipitations cumulées sur l'année 2022-2023 et sur deux autres années humides du suivi : 2017-2018 et 2018-2019.	18
Figure 14 Boxplots des concentrations de MES en crue et hors crue aux deux stations.	18
Figure 15 Récapitulatif des flux spécifiques de MES aux stations amont et aval depuis le début du suivi.	19
Figure 16 Flux de MES spécifique en fonction du débit spécifique pour chacune des années suivies (bleu = Virey, orange = Signy). Les droites de régression affichées ne prennent pas en compte la vidange et l'année 2022-2023 (R^2 Virey = 0,93, R^2 Signy = 0,81). Les incertitudes associées aux mesures sont représentées.	20
Figure 17 Boxplots des concentrations en phosphore total (à gauche) et en orthophosphates (à droite) à Virey et Signy.	21
Figure 18 Boxplots des concentrations en sulfates, chlorures, nitrates et silice à Virey et Signy.	21
Figure 19 Chroniques des concentrations en Silice dissoute et nitrates depuis le 1 ^{er} septembre 2015 jusqu'au 1 ^{er} septembre 2023 à Virey (noir) et Signy (rouge), ainsi que la chronique des débits horaires (en bas) (Fovet et al. 2023).	22
Figure 20 Boxplots des rapports Carbone/Azote à Virey et Signy.	23
Figure 21 Concentrations en Nickel et Cadmium dans les sédiments de berge échantillonnés à Signy depuis la vidange de la retenue de la Roche-Qui-Boit. Les seuils S1 et Bruit proviennent de l'étude IDRA de 2011 sur la gestion des sédiments contaminés.	24

Figure 22 Boxplots des proportions de marqueurs microbiens dans les empreintes chimiques (% microbien) dans les échantillons de sources et de MES prélevées à Virey, Signy et La Roche-Qui-Boit.	25
Figure 23 Projection des échantillons de sources et de MES dans le plan formé par les deux principales composantes de l'analyse en composante principale effectuée en utilisant comme variables le carbone organique total et les ratios moléculaires C/V, VEG ratio et HPM AG ratio.	26
Figure 24 Distribution des tailles de particules des MES aux stations de Virey (noir) et Signy (rouge) avant que les barrages soient arasés.	27
Figure 25 Evolution granulométrique des particules en suspension à Virey et la RQB depuis mai 2022.	28
Figure 26 Température horaire à Virey (noir) et Signy (rouge), ainsi que la différence Virey-Signy (gris) ; en haut : pour la période avant arasement (2015-2017) ; et en bas : après arasement (2021-2023).....	29
Figure 27 Tableau des coefficients de Pearson calculés 2 à 2 entre les variables chimiques de l'eau et les % d'occupation des sols de chaque affluents. Seuls les coefficients significatifs et > ou < à 0,5 ont été affichés.	31
Figure 28 Concentrations des affluents en éléments dissous et particulaires lors des différentes campagnes effectuées.....	32
Figure 29 Débit spécifique en fonction des précipitations sur différents affluents de la Sélune, ainsi que sur les 3 stations de la Sélune elle-même. La Braize est le seul affluent représenté qui n'est pas un de la Sélune. Les données proviennent de l'Hydro Portail (DREAL Normandie).	33

Table des tableaux

Tableau 1 Liste des paramètres suivis sur chaque station et leurs fréquences d'acquisition.	5
Tableau 2 Liste des paramètres mesurés sur chacun des affluents.....	12
Tableau 3 Identification et caractéristiques des 4 sites choisis.	15
Tableau 4 Concentrations en Carbone, Azote et Phosphore, ainsi que le rapport Carbone/Azote associé, dans les sédiments de berge échantillonnés à Signy suite à la vidange de la retenue de la RQB.....	23
Tableau 5 Noms des points de prélèvements de l'amont (P1) à l'aval (Signy), et les surfaces de bassins versants correspondants.....	30
Tableau 6 Flux de MES, Phosphore total, Orthophosphates et Nitrates estimés pour l'Airon avec la méthode DWC. Les valeurs de flux de ces paramètres à Signy ont été ajoutées.	34
Tableau 7 Différences d'aire, de hauteur, de volume et de volume spécifique entre la campagne 2 et la campagne 1, ainsi que les incertitudes associées.	35

Glossaire :

UMR SAS : Unité Mixte de Recherche Sol Agro hydro systèmes Spatialisation

Année hydrologique : L'année hydrologique est définie comme une période de 12 mois débutant après le mois habituel des plus basses eaux, lorsque la quantité d'eau stockée dans le bassin versant est minimale. Elle correspond ici à la période du 1^{er} septembre de l'année passée au 31 août de l'année en cours. Par exemple l'année hydrologique 2022 correspond à la période du 1^{er} septembre 2021 au 31 août 2022

MES : Matières en Suspension. Ce sont l'ensemble des particules solides, minérales ou organique, en suspension dans une eau et dont la taille est supérieure à 0,45µm.

FNU (Formazin Nephelometric Unit) ou NTU (Nephelometric Turbidity Unit) : Unités de mesure de la lumière diffusée dans l'échantillon à un angle de 90 degrés par rapport à la lumière incidente. La FNU se réfère à la méthode de turbidité ISO 7027 (européenne). La NTU fait référence à la méthode 180.1 de l'EPA (américaine) ou aux méthodes normalisées pour l'examen de l'eau et des eaux usées.

RQB : Roche-Qui-Boit (nom du lieu-dit souvent utilisé pour désigner le barrage du même nom)

Remerciements :

Que ce soit pour l'acquisition, l'analyse et le traitement des données de cette année 2022-2023, le présent document rapporte les résultats d'un travail collectif ayant impliqué plusieurs personnes :

Yannick Fauvel, Céline Bouillis, Mathilde Rochoir et Alban Vallet pour les analyses de laboratoire (UMR SAS) ; Mikael Faucheux et Yannick Hamon pour la résolution de problèmes techniques sur les stations (UMR SAS), Alain Crave, Anne-Julia Rollet, Ophélie Fovet et François Méric pour le dimensionnement du projet et des protocoles, leur mise en œuvre et l'interprétation des résultats ainsi que la rédaction du rapport ; Laura Soissons pour la coordination avec les partenaires AESN, DDTM50, DREAL et EDF (UMR DECOD) ; Alban Thomas et son successeur Manuel Chevé pour l'avancement du Système d'information (UMR DECOD) ; les équipes EDF de Toulouse et Grenoble pour le partage de données et pour l'aide lors de la cession de leurs stations de Virey et la Roche-Qui-Boit ; et Gwen Glaziou (DREAL) pour le partage de données hydrométriques et la reprise des jaugeages à Virey.

Table des matières

Table des figures.....	2
Table des tableaux.....	3
Introduction.....	1
1) Contexte et objectifs	1
2) Chronologie du suivi dans la thématique « Dynamique fluviale ».....	1
3) Réalisations 2022-2023 et contenu du rapport	2
Matériels & Méthodes	3
1) Dispositifs de suivi	3
a) Localisation des stations.....	3
b) Equipement des stations.....	4
c) Protocole de prélèvement et analyses.....	6
d) Pièges à sédiments et échantillonnage granulométrique	7
e) Suivi de la mobilité de la charge de fond	8
2) Traitements des données	8
3) Méthodes de calcul des flux sédimentaires et chimiques	9
a) Calculs des flux sédimentaires fins.....	9
b) Calcul des flux annuels de nutriments et estimation de l'incertitude associée.....	10
4) Suivis complémentaires.....	11
a) Campagnes affluents de la Sélune	11
b) Evolution des dépôts sédimentaires en aval du barrage de la Roche-Qui-Boit.....	13
c) Identification des sources de MES sur le bassin versant de la Sélune	15
Résultats.....	16
1) Flux hydrologiques	16
2) Qualité sédimentaire.....	18
a) Flux sédimentaires.....	18
b) Flux sédimentaire 2022-2023 à la Roche-Qui-Boit.....	20
3) Qualité chimique	20
a) Flux chimiques.....	20
b) Teneurs en CNP des dépôts de MES.....	23
c) Teneurs des sédiments en éléments métalliques	23
d) Origines des matières en suspension	25
4) Transport des sables.....	26
a) Flux de sables (Fovet <i>et al.</i> , 2023)	26
b) Evolution de la granulométrie en aval des barrages.....	27
6) Déplacement des particules grossières.....	28

5) Température de l'eau (Fovet <i>et al.</i> , 2023)	29
7) Contribution des affluents aux flux de la Sélune.....	30
a) Variabilité chimique des affluents.....	30
b) Lien entre occupation du sol et chimie de l'eau	31
c) Estimation de la contribution des affluents aux flux de Signy	33
8) Cartographie des dépôts sédiments en aval de la retenue de la Roche-Qui-Boit	34
Conclusions.....	35
Perspectives.....	35
Références.....	37
Annexes	39

Introduction

1) Contexte et objectifs

Ce rapport s'inscrit dans le [programme scientifique « Sélune »](#) qui suit l'arasement des barrages sur ce fleuve. Ce programme a débuté en 2012 et est financé par l'agence de l'Eau Seine-Normandie. Une convention entre l'INRAE, l'AESN, l'OFB, la FNPF, l'Etat et EDF donne un cadrage pour ces travaux jusqu'en 2027. Il s'organise en 3 grandes thématiques :

- La dynamique du territoire et ses trajectoires (évolution des paysages et de l'agriculture, usages et représentations des acteurs sur le territoire, gouvernance du projet d'arasement)
- La dynamique fluviale et la qualité de l'eau (évolution des flux d'eau, de sédiments fins et des éléments chimiques transportés par la Sélune, évolution de la géomorphologie du fleuve)
- Les biocénoses, leurs fonctionnement et évolution (processus biologiques de restauration des écosystèmes, dynamique spatio-temporelle de recolonisation, communautés aquatiques et rivulaires, des microorganismes aux poissons).

Afin de suivre l'opération de remise en continuité écologique et sédimentaire de la Sélune, les équipes scientifiques de ce programme ont mis en place un observatoire de données environnementales (Observatoire Sélune). Il vise à mesurer la dynamique selon laquelle vont évoluer les flux durant cette période, qu'ils soient **hydriques, sédimentaires, chimiques ou biologiques**.

Ce présent rapport concerne l'avancement de l'observatoire des **flux hydrologiques, sédimentaires fins et grossiers, et chimiques** qui implique 3 Unités Mixtes de Recherche : SAS (Rennes), Géosciences Rennes, et LETG (Rennes).

2) Chronologie du suivi dans la thématique « Dynamique fluviale »

L'observatoire de la dynamique fluviale de la Sélune vise à observer et caractériser trois phases :

- La phase de pré-arasement (2012-2017) : C'est lors de cette phase que le protocole et les stations de suivi ont été mis en place et que l'état initial de la Sélune a pu être dressé
- La phase de travaux (2017-2023) : C'est la période de transition où la gestion sédimentaire et le démantèlement des barrages ont été effectués, et où le remaniement des sédiments a été important (dragage, vidange)
- La phase de post-arasement (2023-2027) : C'est durant cette phase que la restauration des milieux et leur retour à l'équilibre sont suivis. Et où les impacts de cette opération sur la géomorphologie et les exports de sédiments fins et d'éléments majeurs sont analysés

La première année du programme (2013) a été essentiellement consacrée à l'acquisition de matériels, à l'installation des dispositifs de mesures, ainsi qu'à quelques observations préliminaires au niveau du pont de Signy, en aval des deux barrages (Martignac *et al.*, 2014). L'année 2014 a permis de recueillir les premiers résultats de la phase de suivi pré-arasement du programme (Le Gonidec *et al.*, 2015). Suite à ces premiers résultats, il a été décidé de compléter les suivis à effectuer sur la station amont dite de « Virey ». L'année 2015 a permis de poursuivre les travaux engagés en complétant les campagnes débutées en 2013 et 2014 (Le Gonidec *et al.*, 2016). Entre 2016 et 2017, le suivi a été mis en veille car non financé cette année-là compte tenu d'une situation locale complexe et d'une certaine incertitude quant au devenir des barrages. Un niveau de suivi minimal a été maintenu par l'UMR SAS sur ses ressources propres dans la limite de ses possibilités. Depuis 2017, le suivi a repris sur son dimensionnement initial. Le rapport de 2017 (Ndom *et al.*, 2018) donne un bilan rétrospectif des résultats sur les flux hydriques, sédimentaires et chimiques sur la période 2014-2017. Les travaux de vidange et de gestion sédimentaire associée ont débuté en mars/avril 2017. En 2018, une opération

d'inter-comparaison des capteurs de turbidité des différentes stations en collaboration avec l'équipe d'EDF a aussi été menée (Ndom *et al.*, 2019). L'année hydrologique 2019 est caractérisée par la déconstruction du barrage de Vezins et la libre circulation des eaux en amont de ce barrage. Son effacement s'est terminé en novembre 2019. Suite à son démantèlement, les travaux de gestion sédimentaire ont démarré en septembre 2020 sur le barrage de la Roche-Qui-Boit (RQB) situé plus en aval (Stubbe *et al.*, 2022). Initialement prévus au printemps 2021, la vidange et le démantèlement de la RQB ont débuté en mai 2022 en raison de la crise sanitaire et de difficultés dans la gestion sédimentaire. L'année 2021-2022 est caractérisée par la vidange du réservoir de la RQB et un largage important de sédiments à l'aval (Meric *et al.*, 2022). Les travaux se sont terminés au printemps 2023 et EDF a officiellement quitté le site le 28 juin 2023. La gestion des 2 stations d'EDF (Virey et La-Roche-Qui-Boit) a été cédée à l'UMR SAS.

3) Réalisations 2022-2023 et contenu du rapport

Le financement de l'observatoire des flux hydrologiques, sédimentaires fins et grossiers, et chimiques permet actuellement :

- L'embauche d'un ingénieur d'étude, F. Méric, qui a remplacé V. Stubbe en mars 2022 (avec un tuilage de 1 mois) à temps plein pour la collecte, l'analyse et le traitement des données, et qui assure aussi la gestion des stations de suivis multi-paramètres sur la Sélune. Il participe enfin à des campagnes de terrain diverses (échantillonnage de sédiments, prélèvements synoptiques des affluents, suivi granulométrie...)
- La maintenance et les éventuelles réparations ou renouvellements des instruments équipant les stations (centrale NetDL, modem) ou utilisés pour du traçage (pit-tags). La reprise des 2 stations de suivi EDF représente un coût supplémentaire de matériels et d'entretien estimé aux alentours de 21 000€ pour la période 2023-2027
- Les frais d'électricité, de télécommunication, et de missions de terrain associés à la gestion des stations
- Les analyses d'échantillons en laboratoire

De plus, plusieurs productions et communications ont été réalisées à partir des données acquises par cet observatoire :

- 1 article scientifique publié dans *Frontiers Environnement* : des données de l'observatoire (débit, température, éléments dissous, sédiments fin et grossiers) ont été analysées entre 2015 et 2023 pour évaluer l'effet de l'arasement des barrages sur ces flux « Early assessment of effects of dam removal on abiotic fluxes of the Selune River » (Fovet *et al.*, 2023)
- 1 article scientifique publié dans *Data in Brief* : un jeu de données sur des variables physico-chimiques de la zone hyporhéique de la Sélune « A dataset on physico-chemical hyporheic variables in the Selune River: Towards understanding the impact of dam removal on riverbed clogging processes » (Ba *et al.*, 2023)
- 1 article en cours de révision dans *Catena* : les sédiments de différents observatoires du réseau OZCAR (et ceux de la Sélune) ont été utilisés pour inter-comparer différents capteurs de turbidité « Intercomparison of optical scattering turbidity sensors for a wide range of suspended sediment sources and concentrations » (Bakker *et al.* In rev)
- Participation aux journées pédagogiques organisées par la DDTM 50 le 29 septembre 2022 : animation d'un stand pour les scolaires avec un jeu sur les sédiments de la Sélune
- Participation aux journées scientifiques organisées par l'INRAE le 11 avril 2023 : communication des résultats scientifiques du programme aux acteurs et décideurs locaux

- Participation aux Journées de la Mesure et Métrologie à Sète du 2 au 5 octobre 2023 : présentation sous forme d'un poster scientifique des résultats du suivi sédimentaire sur la Sélune

Le présent rapport propose un bilan comparatif des résultats des 8 années hydrologiques (période 2015-2023) pour le volet flux hydriques, sédimentaires et chimiques. Ces résultats comparent les paramètres amont et aval acquis respectivement sur les stations de Virey et Signy pendant les périodes de pré-travaux (2015-2017), travaux (2017-2023) et post-travaux (depuis 2023). Cette année 2022-2023 a été marquée par le retrait d'EDF en juin 2023, qui marque officiellement la fin de la période de travaux et le début de la restauration du fleuve.

Matériels & Méthodes

1) Dispositifs de suivi

a) Localisation des stations

L'observatoire des flux hydrologiques, chimiques et sédimentaires est composé de plusieurs stations, réparties le long du linéaire de la Sélune entre les communes de Saint-Hilaire-du-Harcouët et Ducey (Figure 1).



Figure 1 Localisation des stations de suivi multi-paramètres, des anciens barrages et de la station météo sur le bassin versant de la Sélune.

La station de Virey est située en amont de la zone impactée par les barrages, sur la rive gauche de la Sélune, au niveau du pont de Virey (RD 581). Elle est située à 4,6 km en amont du pont de la République

et 1,3 km en aval de la confluence avec l'Airon. Cet emplacement intègre une surface de bassin versant de 629 km². Elle est co-instrumentée par EDF et INRAE depuis février 2015 et appartient complètement à l'INRAE depuis le 28 juin 2023. La fréquence de visite est hebdomadaire ce qui permet un entretien fréquent et assure la qualité des données.

La station de Signy est installée à l'aval des 2 barrages, en rive droite de la Sélune, au niveau du pont de Signy (RD 178). Elle est localisée 4 km en aval du barrage de la RQB et comprend une surface de bassin versant de 777 km². Elle est co-localisée avec une station de mesure de débit de la DREAL Basse-Normandie (code I9221020 : La Sélune à Saint-Aubin de Terregatte) où le débit est mesuré depuis le 15/01/1990. L'acquisition des données par l'INRAE y est effective depuis fin avril 2014.

EDF avait également installé une station de mesure à l'aval immédiat de chaque barrage : la station de la Dorière en aval du barrage de Vezins (Hors service depuis octobre 2020 suite à l'arasement du premier barrage) et la station de la Roche-Qui-boit en aval du barrage du même nom qui intègre un bassin versant de 750 km². Cette 2^{ème} station appartient depuis le 28 juin 2023 à l'INRAE qui en assure l'entretien.

b) Equipement des stations

Station du Pont de Signy

La station INRAE en aval des barrages (Figure 2 ; Tableau 1) est équipée depuis avril 2014 d'un turbidimètre (Solitax ts-line sc, HACH), d'un capteur de niveau d'eau (PLS, OTT HydroMet), d'un préleveur automatique réfrigéré (ISCO 5800, IJINUS) servant à l'échantillonnage des crues pour le suivi de la chimie et depuis février 2015 d'une sonde de conductivité et température (C4E, Aqualabo). Une sonde optique permettant la mesure en continue de la chlorophylle a et la concentration de cyanobactéries (AlgaeTorch, BBE) est également présente depuis juin 2016 mais elle n'a pas fonctionné entre octobre 2021 et avril 2023 suite à des problèmes techniques. Une centrale d'acquisition (NetDL 1000, OTT HydroMet) et un modem GSM permettent le stockage et le rapatriement des données à distance depuis le laboratoire. Le pas de temps d'acquisition pour l'ensemble de ces paramètres est de 6 minutes sauf pour les concentrations en chlorophylle a et en cyanobactéries qui sont mesurées toutes les 30 min. Le débit est obtenu via la mesure de niveau d'eau et une courbe de tarage fournie par la DREAL (mise à jour le 19 décembre 2020). L'entretien des sondes est effectué lors de visites hebdomadaires afin de garantir la qualité des données.



Figure 2 Gauche : station INRAE du Pont de Signy (aval) ; droite : préleveur automatique ISCO 5800 à cette même station.

Stations de Virey, la Dorière et La Roche-Qui-Boit

Les trois stations sont équipées chacune d'un turbidimètre (VISIOTURB 700IQ, WTW), d'une sonde de conductivité et température (TétraCON 700IQ, WTW), d'une sonde d'oxygène dissous (FDO 700IQ, WTW), d'une sonde pH (Sensolyt 700IQ, WTW) et d'un capteur de niveau d'eau (PTX 1830, DRUCK). Le débit est calculé grâce aux jaugages réalisés par EDF et la DREAL. Sur la station de Virey, un préleveur automatique non-réfrigéré (ISCO 3700, IJINUS) est également installé depuis février 2015 pour échantillonner en période de crue (Figure 3 ; Tableau 1).



Figure 3 Station INRAE-EDF du pont de Virey (amont) ; gauche : support des sondes multi-paramètres ; droite : installation électrique avec la centrale d'acquisition, les différents capteurs et les batteries.

EDF transmettait les données à un pas de temps horaire depuis février 2015 à l'INRAE via un serveur FTP. Depuis le 28 juin 2023, les données des stations de Virey et la RQB sont rapatriées directement à l'INRAE grâce à un modem, à un pas de temps de 6 minutes. La station de la Dorière est hors-service depuis octobre 2020 suite à l'arasement du barrage de Vezins. L'entretien des sondes des stations EDF était assuré par un bureau d'étude privé, à raison de deux passages mensuels durant l'été et d'un seul passage les autres mois de l'année. Depuis le 28 juin 2023, les stations de Virey et de la RQB sont entretenues hebdomadairement par l'INRAE.

Paramètres mesurés	Stations de mesure			
	Pont de Virey	Dorière (jusqu'à octobre 2020)	Roche-Qui-Boit	Pont de Signy
Conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	X	X	X	X
Oxygène dissous (mg/L)	X	X	X	
Température ($^{\circ}\text{C}$)	X	X	X	X
pH	X	X	X	
Turbidité (FNU)	X	X	X	X
Niveau d'eau (m)	X	X	X	X
Débit (m^3/s)	X		X	X
Chlorophylle totale ($\mu\text{g}/\text{L}$)				X
Cyanobactéries ($\mu\text{g}/\text{L}$)				X
Fréquence de mesure	1h (6 min depuis le 28/06/23)	1h	1h (6 min depuis le 28/06/23)	6 min

Tableau 1 Liste des paramètres suivis sur chaque station et leurs fréquences d'acquisition.

c) Protocole de prélèvement et analyses

Pour suivre et quantifier les flux chimiques et sédimentaires de la Sélune, des prélèvements réguliers d'échantillons d'eau sont nécessaires pour couvrir l'ensemble des conditions hydrologiques (crue et hors crue). Un prélèvement manuel systématique est réalisé toutes les semaines, lors d'une visite in situ sur les stations de Signy et Virey. Une grande partie de ces prélèvements correspondent à des conditions d'écoulement de base (hors crue). Généralement, les flux hydriques, sédimentaires et chimiques subissent des fluctuations importantes lors des crues, ici définies comme les événements hydrologiques en réponse à une pluie, d'intensité faible à forte. Pour l'échantillonnage en crue, un préleveur automatique asservi au niveau d'eau a été installé sur les deux stations. Le préleveur est programmé pour se déclencher automatiquement si le seuil de niveau d'eau fixé par l'utilisateur est dépassé à Signy (seuil réajusté à chaque visite) et si la montée du niveau d'eau dépasse 4 cm en une heure à Virey. Il prélève alors 24 échantillons avec un pas de temps fixe au cours de la crue : toutes les 2h pour la station amont et toutes les 3h pour la station aval.

Depuis avril 2022, des prélèvements manuels sont aussi réalisés en aval immédiat du barrage de la RQB. Entre avril et août, les aspects sédimentaires et chimiques étaient étudiés et la fréquence d'échantillonnage était hebdomadaire pour bien documenter la période de vidange. Elle est aujourd'hui bimensuelle et se concentre seulement sur les mesures en MES. Ces mesures permettent de calibrer une relation MES-Turbidité pour cette station.

L'échantillonnage a débuté en mai 2014 pour la station INRAE de Signy et en février 2015 pour la station INRAE-EDF de Virey. Les échantillons sont analysés au laboratoire analytique de l'UMR SAS selon les normes en vigueur pour les différents paramètres. Au total, ce sont 11 paramètres qui sont analysés (Figure 4) sur la phase dissoute (PO_4 , NO_3 , NO_2 , NH_4 , Cl, SO_4 , Si) et sur la phase particulaire (MES, C, N, P). La concentration en NH_4 est mesurée seulement depuis fin septembre 2015 en amont et en aval des barrages. Les anions majeurs (NO_3 , NO_2 , SO_4 et Cl) sont mesurés par chromatographie ionique (ISO 10334-1:2007) ; le phosphore PO_4 , P total (ISO 15681-2:2018), l'ammonium NH_4 (ISO 11732:2005), et la silice dissoute Si (NFT 90 007) par colorimétrie ; les matières en suspension MES par filtration et pesée (NF EN 872:2005) ; les teneurs en C et N sur la phase particulaire sont dosées par analyseur élémentaire (NF ISO 10694). La phase dissoute est mesurée sur des échantillons filtrés à 0,45 μm ; la phase particulaire sur des résidus de filtration à ce même seuil de filtration, et le phosphore total sur l'eau brute. Le laboratoire de l'UMR SAS fait partie du réseau d'inter-comparaison analytique (BIPEA, WMO/GAW), un contrôle des analyses est effectué trois fois par an avec des échantillons témoins.

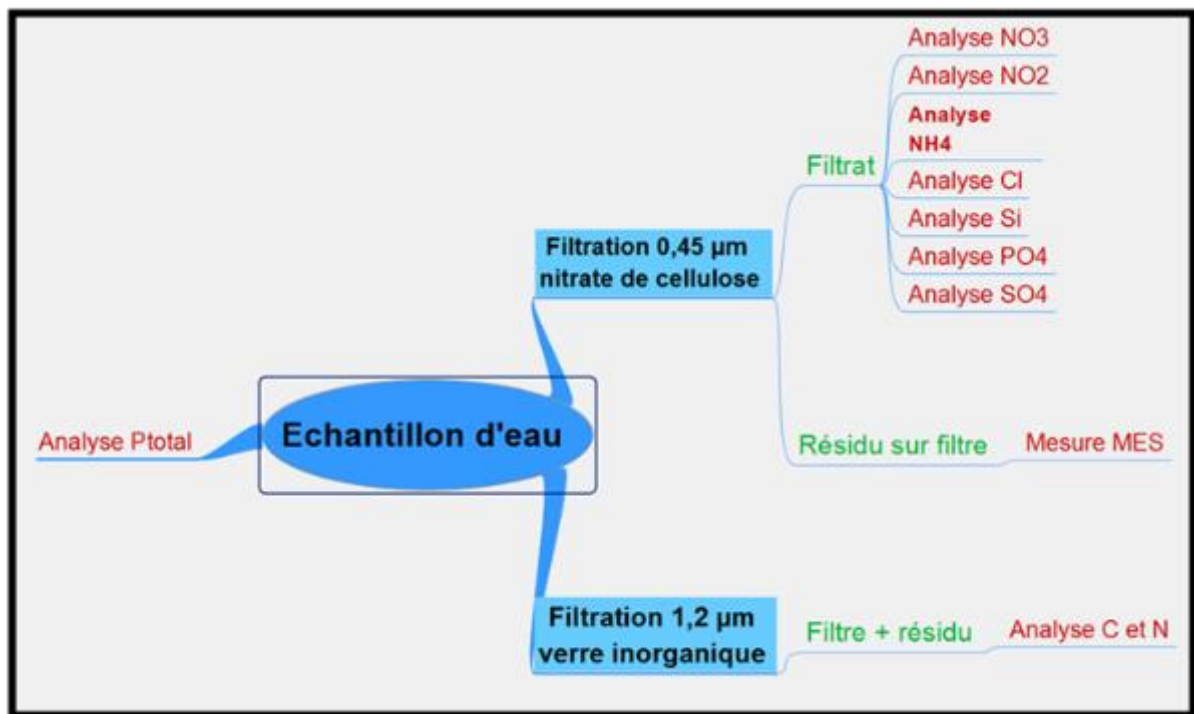


Figure 4 Ensemble des analyses réalisées sur un échantillon d'eau prélevé.

Courant mai 2022, l'ouverture complète du barrage de la RQB a engendré le déplacement d'un volume important de sédiments fins qui était contenu dans la retenue. Ces sédiments se sont déposés massivement entre la RQB et le moulin de Quincampoix principalement sous forme de banquettes de sédiments le long des berges de la rivière. Afin de contrôler la composition, des prélèvements d'eau et de sédiments de berge ont été collectés au pont de Signy pour y suivre les concentrations en métaux lourds (Cuivre, Zinc, Cadmium, Nickel et Chrome). La fréquence de prélèvement était de 1 fois par semaine en juin, puis 2 fois par mois en juillet et août, et enfin mensuel à partir de septembre. L'objectif était de suivre l'évolution des concentrations en métaux dans les dépôts successifs sur cette période. Toutes ces analyses ont été confiées au laboratoire LABOCEA de Brest.

d) Pièges à sédiments et échantillonnage granulométrique

Des pièges à sédiments expérimentaux ont été mis en place au mois d'août 2021. Leur fabrication et leur pose ont été décrites dans le rapport de 2021. Pour rappel, l'objectif de ces pièges est de suivre l'évolution de la granulométrie charriée à l'aval du barrage de la RQB et, en particulier, le transit des sables stockés dans la retenue. Il s'agit de mesurer cette progression vers l'aval et du piégeage éventuel des sables dans les principales mouilles situées à l'aval de la RQB. Ce dispositif ne permet pas de quantifier les flux de sables avec plus de précision.

Pour rappel, quatre pièges ont été fabriqués et posés. Le premier est situé à 200m en aval de la station amont de Virey comme témoin des conditions amont. Les trois autres pièges ont été placés en aval de la RQB : immédiatement après le barrage, 100m en amont du pont du bateau et 200m en aval de la station de Signy (Figure 5). Ces pièges ont été placés entre les mouilles profondes dans l'idée que ces dernières pourraient accueillir des dépôts de sédiments une fois le barrage détruit.

Une fois collectés, les pièges sont vidés et leur contenu est brûlé à haute température dans un four à mouffles (550°C) pour éliminer la matière organique. Le produit est ensuite passé dans une série de 5 tamis (2 mm, 1 mm, 500 µm, 200 µm et 50 µm) et chaque fraction est pesée. Cette partie du protocole a été allégée en août 2023 en remplaçant l'étape de combustion à haute température par un séchage

à 100°C à l'étuve. Un tamis supplémentaire à 3,15 mm est alors utilisé en amont du tamisage pour éliminer les feuilles et branches. Des tests ont montré que l'absence de combustion des échantillons ne modifiait pas la répartition des fractions granulométriques et augmentée les masses mesurées d'environ 10%.

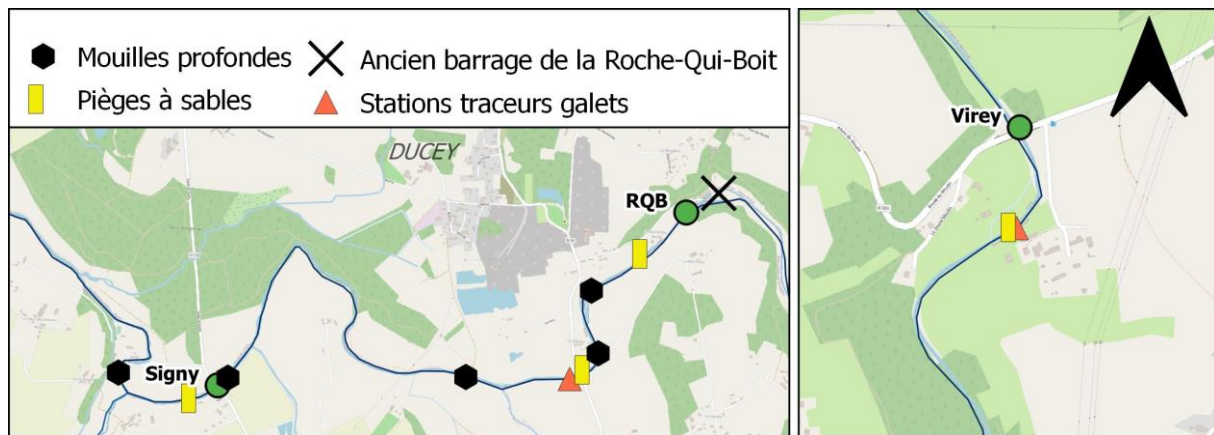


Figure 5 Localisation des pièges à sables, des galets équipés de traceurs et des mouilles sur Virey et en aval du barrage de la Roche-qui-Boit.

Ces dispositifs ont été testés en août 2021 puis officiellement mis en place en mai 2022. Entre mai et septembre 2022, les pièges étaient relevés toutes les 2 semaines, sauf en crue où ils étaient ramassés au bout d'une semaine. Et entre septembre et décembre 2022, les relevés se faisaient toutes les 3 semaines. En 2023, les pièges n'ont été remis qu'en juillet car les débits étaient trop importants avant. Ce suivi est arrêté en hiver car la hausse des débits rend impossible la collecte des pièges.

e) Suivi de la mobilité de la charge de fond

Depuis 2015 des mesures de la mobilité de la charge de fond sont effectuées à partir de transpondeurs RFID placés dans des sédiments grossiers collectés sur le fond de la Sélune. 150 traceurs ont été ainsi déployés : en amont des anciennes retenues au niveau de seuil de Virey (50 traceurs – site 1), et à l'aval des barrages en aval du pont de Bateau (2 transects avec 50 traceurs chacun, sites 2 et 3). Un relevé annuel de la position des sédiments équipés de traceur est effectué depuis 2015 entre août et fin septembre. L'objectif est ainsi triple : caractériser la mobilité des sédiments composant le fond du lit, estimer les capacités de transport d'une charge de fond et évaluer l'effet de la suppression des barrages sur ces mobilités. Les années de suivis antérieures à 2019 nous permettent ainsi d'approcher les dynamiques sous l'influence des ouvrages.

2) Traitements des données

Les données acquises par les sondes des différentes stations de mesure sont traitées à l'aide du logiciel HYDRAS 3 (version 2.91.0). Ce traitement consiste à repérer et corriger si possible les dérives et discontinuités des capteurs (données manquantes ou aberrantes) avec les outils d'interpolation d'HYDRAS. Les débits sont calculés à partir de courbes de tarage tenues à jour par la DREAL (pour la station de Signy) et par EDF (pour les stations de Virey, la RQB et la Dorière). Depuis le départ d'EDF le 28 juin 2023, la mise à jour de la courbe de tarage de Virey a été reprise par la DREAL mais pas celle de la RQB. Pour cette station, il a été décidé d'utiliser les débits de Signy et de les corriger par le rapport des aires entre ces 2 stations ($Aire_{RQB} / Aire_{Signy}$). Les données issues des analyses en laboratoires sont compilées dans un fichier Excel et les valeurs sont contrôlées régulièrement au fil de l'acquisition. Les données inférieures à la limite de détection de l'appareil ont été remplacées par NA. L'ensemble des données produites est archivé sur le serveur de l'UMR SAS.

Certaines analyses font également appel à des données complémentaires sur la pluviométrie : les données de pluie de la station Météo France de Saint-Hilaire-du-Harcouët (n° 50484002) nous sont transmises au pas de temps horaire, par Météo France dans le cadre de la convention Météo France – INRAE.

NB : Le système d'information du programme Sélune est actuellement en cours de construction. Sa version bêta est accessible à l'adresse suivante : <https://programme-selune.com/siselune>.

3) Méthodes de calcul des flux sédimentaires et chimiques

a) Calculs des flux sédimentaires fins

Les flux de sédiments fins sont calculés à partir des mesures haute fréquence de turbidité combinées aux mesures ponctuelles de concentrations en MES (mesurées en écoulement de base et en crue). Pour rappel, la turbidité est la mesure du caractère trouble de l'eau dû aux matières en suspension. Elle est essentiellement liée à la concentration de MES présentes, mais elle dépend aussi d'autres facteurs comme la granulométrie, la couleur ou la nature des particules. En effet, le capteur de turbidité est plus sensible à la quantité de particules dans l'eau, alors que la mesure de concentrations en MES est surtout liée à la masse des particules.

Depuis le début du suivi, une régression linéaire simple est établie entre ces 2 paramètres ($MES = a * Turbidité + b$) pour convertir la chronique haute fréquence de turbidité en chronique haute fréquence de MES. Ces régressions sont établies par station et mises à jour tous les ans avec les données les plus récentes. Pour Signy, comme les flux sont directement impactés par les différentes phases de l'arasement, la régression est établie avec les données d'une même période (Pré-travaux, Travaux ou Post-travaux). Cette année, l'équation à Signy n'a été établie qu'avec les données de 2022-2023 car c'est la première année de la période « Post-travaux ». Mais l'ordonnée à l'origine de cette nouvelle équation était de -12,6, ce qui signifie que pour une turbidité de 0, on obtient une concentration en MES de -12,6 mg/L. Pour résoudre ce problème, un nouveau modèle a été déterminé où le paramètre b est forcé à 0 ($MES = a * Turbidité$). En plus d'améliorer la cohérence des résultats en éliminant les valeurs négatives, l'incertitude associée au modèle était plus faible que pour le modèle linéaire « classique ». Il a donc été décidé d'étendre ce type de modèle aux autres périodes et à Virey (Annexe 1).

Pour encore améliorer la significativité des modèles, seuls les événements pertinents ont été sélectionnés : pour chaque crue exploitée de manière individuelle, la droite de régression linéaire permet de sélectionner la crue si le R^2 (coefficient de détermination) est supérieur à 0,6. Pour la station de Virey, 75 crues ont été échantillonnées sur la période 2015-2023. Parmi elles, 46 ont été sélectionnées pour établir la relation d'étalonnage Turbidité/MES. Cela représente 658 couples de points. Pour la station de Signy, l'équation de cette 1^{ère} année de « Post-travaux » a été établie à partir des données de 4 crues (avec un $R^2 > 0,6$) et des données en écoulement de base. Cela représente 93 couples de points (Figure 6).

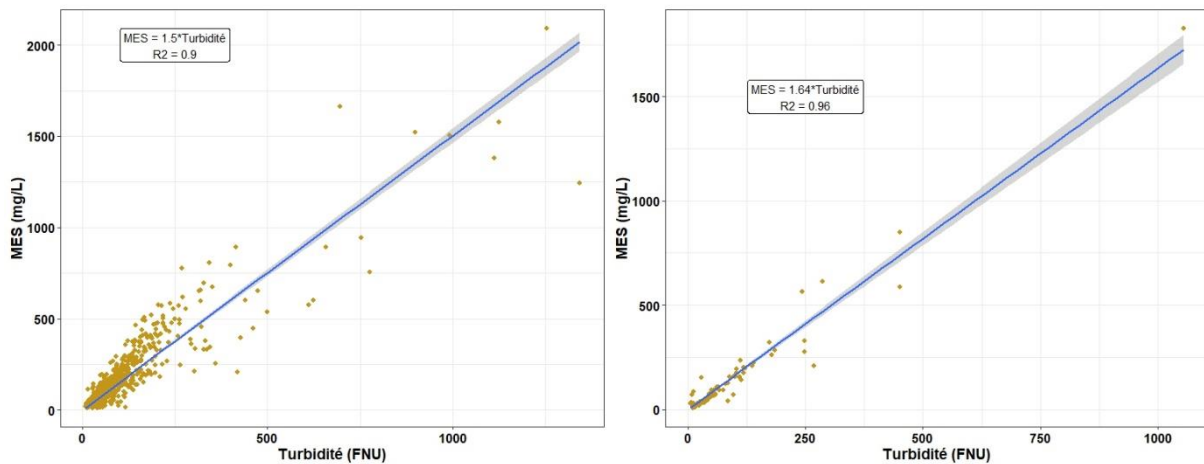


Figure 6 Gauche : relation Turbidité-MES de la station amont de Virey intégrant les données de 2015 à 2023 ; Droite : relation Turbidité-MES de la station aval de Signy intégrant les données de 2022-2023. La zone grisée représente l'intervalle de confiance à 95%.

Les incertitudes de toutes ces équations de calibration ont été calculées avec un intervalle de confiance de 95%. Les régressions et les calculs des incertitudes ont été conduits à l'aide du package R « Stats » (R, 2023).

Cette mise à jour des calculs des flux ne concerne pas la période du 15 mai au 1^{er} septembre 2022 qui a déjà fait l'objet d'une méthodologie particulière décrite dans le précédent rapport (Meric *et al.*, 2022).

b) Calcul des flux annuels de nutriments et estimation de l'incertitude associée

Calculs des flux

Le rapport de l'année 2018-2019 a permis de comparer trois méthodes de calcul de flux de nutriments : la méthode des concentrations moyennes pondérées par le débit (DWC pour Discharge Weighted mean Concentration), et deux méthodes régressives : simple (IRC pour Integral Rating Curve) ou segmentée (SRC₅₀ pour Segmented Rated Curve Q50).

Ces méthodes ont permis d'estimer les flux d'éléments dissous (NO₃, Cl, SO₄, Si et NO₂) sur les stations à l'amont et à l'aval des barrages. Alors que les flux étaient surestimés avec la méthode SRC₅₀, les méthodes IRC et DWC ont permis d'avoir des résultats convergents. La méthode DWC a été retenue car elle permet en plus d'estimer les incertitudes associées aux flux.

La méthode DWC (Littlewood, 1995; Moatar and Meybeck, 2007) est basée sur le calcul de la concentration moyenne pondérée par les débits qui est ensuite multipliée par le débit moyen journalier :

$$Flux = K \times \frac{\sum_{i=1}^n C_i Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \times \bar{Q}$$

Avec C_i la concentration (mg/L) des n échantillons réguliers (ici hebdomadaires), Q_i le débit instantané associé au prélèvement de l'échantillon (m³/s), \bar{Q} le débit moyen journalier sur l'année (m³/s), et K (31,536) un facteur de conversion tenant compte des unités utilisées et de la période sur laquelle le flux est calculé (ici un an). Les données de concentrations utilisées pour le calcul sont celles provenant des prélèvements hebdomadaires réguliers.

Incertitudes sur les flux (méthode DWC)

Les incertitudes et biais associés au calcul de flux sont réduits lorsque la fréquence d'échantillonnage augmente (Moatar *et al.*, 2008) : plus l'échantillonnage est fin, plus l'estimation du flux sera précise. Le lien entre les incertitudes interannuelles (biais et imprécisions) générées par la méthode des concentrations moyennes pondérées (DWC) et les différents indicateurs de variabilité des flux de matières ($M_{2\%}$), des flux d'eau ($W_{2\%}$) et hydrochimique (b_{50sup}) permet de déterminer l'impact de ces indicateurs sur les incertitudes (Raymond *et al.*, 2013). Un abaque développé par Moatar *et al.* (Moatar *et al.*, 2013) a été exploité pour déterminer les incertitudes sur les flux calculés par la méthode DWC à partir de l'indice $M_{2\%}$ et la fréquence d'échantillonnage associée.

L'indicateur des flux de matière $M_{2\%}$ est la part du flux délivré en 2% du temps, qui n'est calculable qu'à partir d'un suivi au moins journalier. Une relation entre le $M_{2\%}$, le $W_{2\%}$ et le b_{50sup} (Moatar *et al.*, 2013) permet aussi de l'estimer à partir d'un suivi discret supra-journalier des concentrations :

$$M_{2\%} - W_{2\%} = 26,7 \times b_{50sup}$$

Les biais (quantile 50) et les imprécisions interannuelles (quantile 90 – quantile 10) peuvent alors être déterminés :

$$\begin{cases} e_{50} = o(d)M_{2\%}^2 + q(d)M_{2\%} \\ e_{10} = r(d)M_{2\%}^2 + s(d)M_{2\%} \\ e_{90} = u(d)M_{2\%}^2 + v(d)M_{2\%} \end{cases}$$

Où les coefficients $o(d)$, $q(d)$, $r(d)$, $s(d)$, $u(d)$ et $v(d)$ sont déterminés à partir de l'abaque décrit précédemment pour tous les flux de nutriments avec la fréquence d'échantillonnage qui est de $d=7$ jours.

4) Suivis complémentaires

a) Campagnes affluents de la Sélune

Pour évaluer la contribution des affluents sur le cours principal de la Sélune entre nos deux stations amont/aval (Virey et Signy), des campagnes de prélèvements sont réalisées depuis 2019 en hautes eaux (printemps) et basses eaux (automne). Le suivi en continu des flux sur chacun des affluents serait difficile étant donné l'énergie et le coût d'une station. Des études récentes ont montré néanmoins une stabilité dans la hiérarchie spatiale de la qualité de l'eau montrant qu'un simple prélèvement sur plusieurs stations, cours d'eau ou rivières différents permettait de capturer en moyenne 88% de la variabilité spatiale pour différents paramètres chimiques et dans les différents contextes pédoclimatiques nationaux (Dupas *et al.*, 2019). L'objectif de ces campagnes est d'explorer la variabilité spatiale de la chimie des affluents et la comparer à celle de la Sélune. Cette chimie est-elle semblable ou différente à celle du fleuve ? Des facteurs comme l'usage des sols, la surface ou la pente peuvent-ils l'expliquer ? Les apports de ces affluents sont-ils négligeables par rapport aux flux de la station de Signy ?

Au total, 15 points de prélèvements ont été définis sur les affluents (Figure 7). 13 d'entre eux se situent entre les stations amont et aval. Cet échantillonnage permet de couvrir 81% de la surface de bassin versant entre les stations de Virey et Signy. L'Airon est l'affluent le plus important du bassin d'étude puisque son bassin couvre à lui seul 274 km² soit plus du tiers du bassin de la Sélune à Signy. De par son importance et de la présence d'une STEP 2 km en amont de la station de Virey, c'est le seul cours d'eau échantillonné qui se situe en amont de cette station.

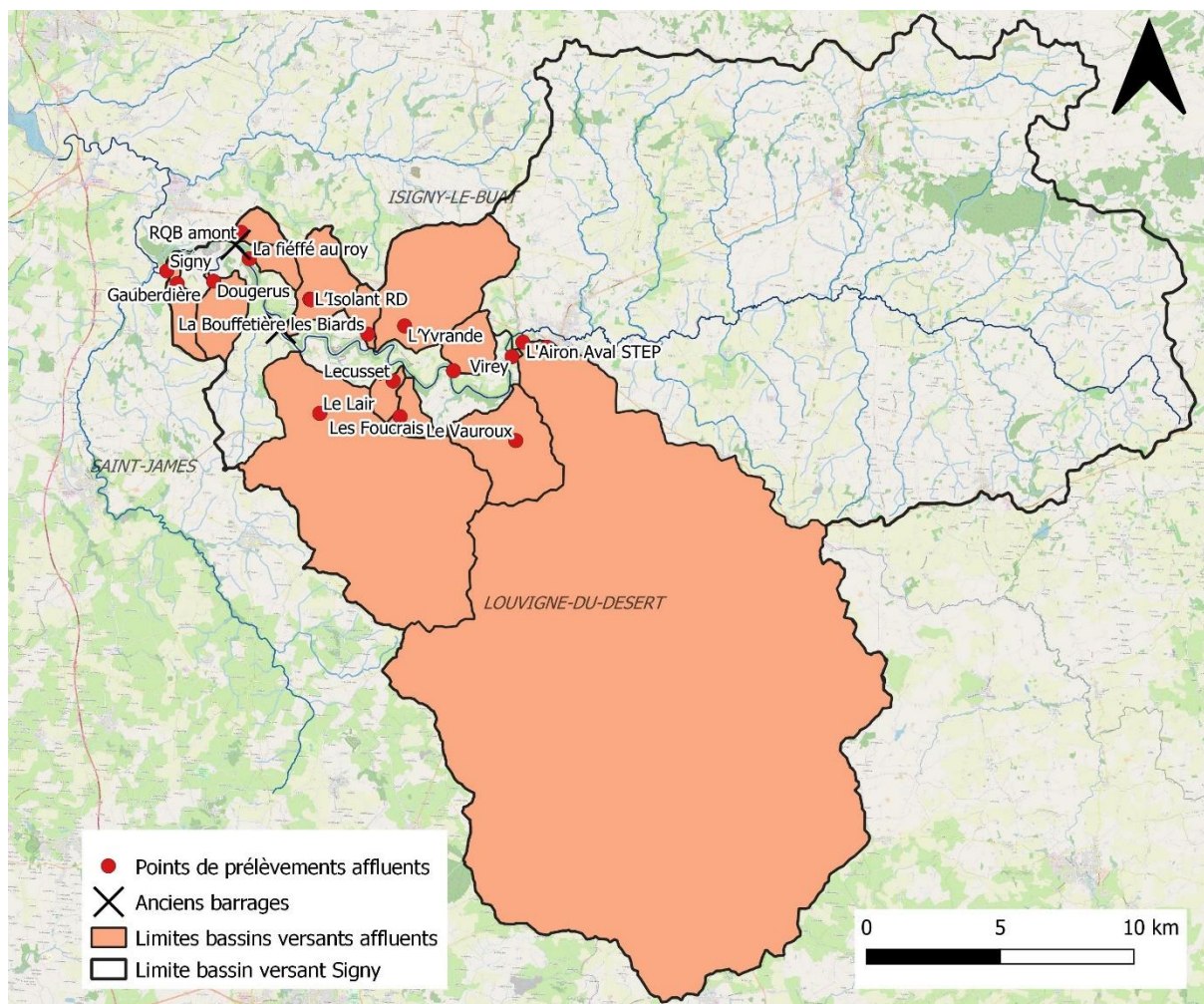


Figure 7 Localisation des points de prélèvements sur les affluents suivis et leurs bassins versants associés.

Les paramètres chimiques mesurés sont les mêmes qu’aux stations de Virey et de Signy et sont traités selon les mêmes protocoles. Lors des prélèvements plusieurs paramètres in situ sont également relevés (Tableau 2). Lors de 4 campagnes affluents, une sonde EXO 2 a été utilisée ce qui a permis de mesurer des paramètres supplémentaires comme la concentration en chlorophylle ou le pH.

Mesures d'éléments en laboratoire	Mesures de paramètres in situ
Phosphates (mg/L)	Conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Phosphore Total (mg/L)	Température (en °C)
Nitrites (mg/L)	Oxygène dissous (mg/L)
Nitrates (mg/L)	Turbidité (FNU)
Ammonium (mg/L)	
Chlorure (mg/L)	
Sulfates (mg/L)	
Silice (mg/L)	
MES (mg/L)	

Tableau 2 Liste des paramètres mesurés sur chacun des affluents.

Les bassins versants correspondant à ces stations de prélèvements et les pentes moyennes associées ont été délimités à partir d’un MNT de résolution 50m (cf. Rapport bilan 2019-2021 Programme

Sélune). Les surfaces d'occupation du sol dominantes ont été mises à jour d'après les données OSO 2021 (<https://www.theia-land.fr/product/carte-occupation-des-sols-de-la-france-metropolitaine/>). Les données chimiques utilisées pour le calcul des flux sur l'Airon ont été extraites de la base de données Naiades (DREAL).

b) Evolution des dépôts sédimentaires en aval du barrage de la Roche-Qui-Boit

Suite à la vidange de la retenue de la RQB entre mai et juin 2022, de grandes quantités de sédiments fins (principalement limons, argiles) se sont déposées en aval sous la forme de banquettes le long des berges (Figure 8). Afin de suivre l'évolution de ce stock, certains dépôts ont été cartographiés avant et après l'hiver 2022-2023. Les formes des banquettes et les volumes de sédiments ont été estimés à partir de mesures de largeur et d'épaisseur des dépôts sédimentaire localisées au DGPS.



Figure 8 Illustration d'un dépôt sédimentaire suite à la vidange de la retenue de la RQB. Le 8 juin 2022 au niveau du pont du bateau.

Les mesures ont été réalisées sur 4 sites en aval de la retenue afin d'observer s'il y avait une logique amont-aval dans la répartition ou taille de ces accumulations : en aval immédiat du barrage de la RQB, en amont du Pont du bateau, aux méandres du bois d'Ardennes et en aval du Pont de Signy (Figure 9). Ces sites, aux caractéristiques différentes répartis entre la RQB et le seuil de Montmorel, ont été sélectionnés afin d'être le plus représentatifs possible de la variabilité des configurations observables sur ce tronçon : ligne droite/méandre, mouille/rapide, banquette végétalisée/non-végétalisée. Ces sites ont été choisis selon plusieurs critères : accessibilité, praticabilité (peu d'arbres qui gênent la progression sur la banquette), présence des banquettes bien délimitées.

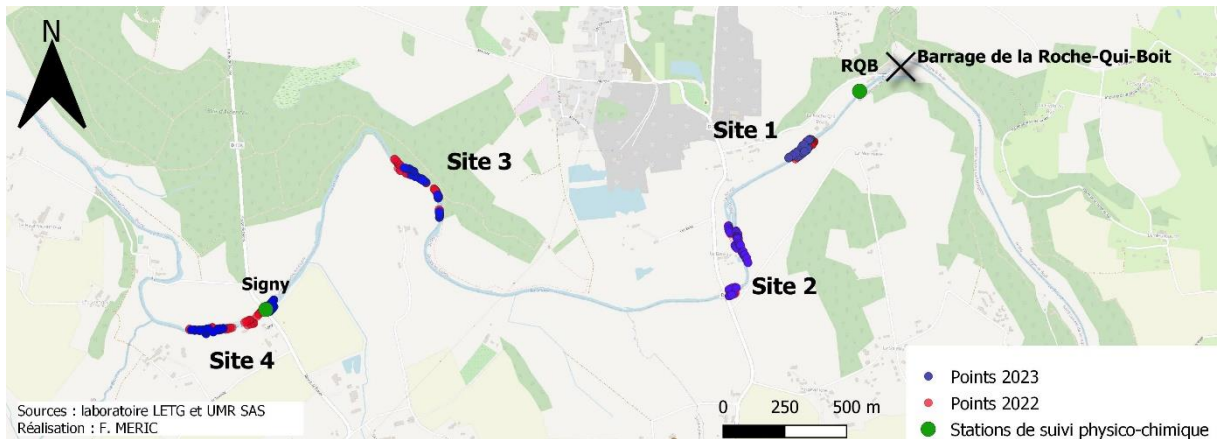


Figure 9 Localisation des points de mesures des dépôts sédimentaires lors des campagnes de novembre 2022 et septembre 2023.

Sur ces sites, toutes les banquettes visibles et accessibles ont été systématiquement relevées sauf celles qui semblaient être dues à la présence d'obstacles naturels (blocs, souches). Sur chaque banquette les mesures de largeur et d'épaisseur ont été réalisées le long de transect (2 à 4 points par transect selon la largeur de la banquette) systématiquement en amont, au centre et en aval de chaque forme (Figure 10). Des transects intermédiaires ont été ajoutés lorsque la banquette était particulièrement longue et variable en forme. Etant donné la densité de la végétation et les difficultés d'accès aux banquettes, nous avons mesuré les épaisseurs au moyen d'un fer à béton inséré dans les sédiments jusqu'à ce qu'il atteigne le toit des sédiments grossiers constituant le fond du lit. Les largeurs ont été mesurées à l'aide d'une mire déposée sur les banquettes. Chaque transect et chaque point de mesure d'épaisseur le long de ces transects a été géoréférencé au DGPS.

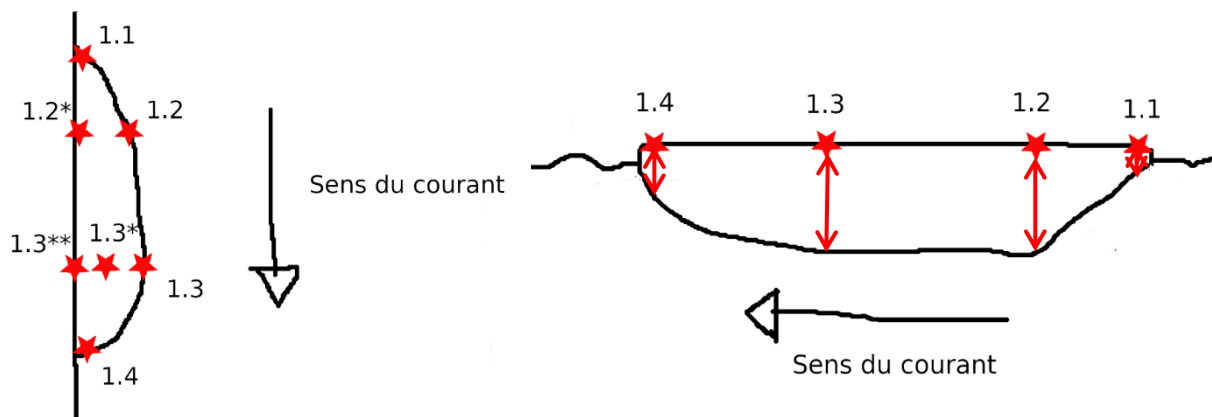


Figure 10 Vues aérienne (à gauche) et latérale (à droite) de la stratégie d'échantillonnage mise en place.

Les campagnes de mesure ont été effectuées en période de basses eaux pour que les parties émergées des banquettes soient les plus grandes. Comme l'été 2022 a été exceptionnellement sec, il n'a pas été possible de retrouver exactement les mêmes débits pour la 2^{ème} campagne. Ils étaient compris entre 2,1 et 2,7 m³/s en novembre 2022 et entre 2,9 et 3,4 m³/s en septembre 2023. La limite eau/sédiments émergés est donc très légèrement différente entre ces 2 campagnes ce qui amène un léger biais dans les résultats. Finalement, 28 banquettes ont été cartographiées en 2022 et 21 en 2023. Onze banquettes ont disparu entre les 2 dates et 4 nouvelles banquettes ont été échantillonnées en 2023 (Tableau 3).

Site	Nom	Pente (%)	Indice de sinuosité	Longueur du site (m)	Nb de banquettes campagne 1	Nb de banquettes campagne 2
1	Roche-Qui-Boit (RQB)	0,4	1	127	8	5 (+2 suppl.)
2	Pont Du Bateau (PDB)	0,3	1,2	340	7	7
3	Bois d'Ardennes	0,2	1,1	340	7	3 (+2 suppl.)
4	Signy	0,3	1	383	6	2

Tableau 3 Identification et caractéristiques des 4 sites choisis.

Du fait de l'importance de la canopée sur certains sites, la précision de certains points DGPS n'était pas bonne et un repositionnement à partir de photos aériennes a parfois été nécessaire. Cette étape de correction a été faite sur QGIS 3.16 puis les données ont été exploitées sur QGIS et Excel. L'aire totale (m²) et la hauteur moyenne (m) de chaque banquette ont été calculées, puis multipliées pour obtenir le volume total moyen de sédiments par banquette (m³). Le volume spécifique (m³/m) a aussi été calculé en divisant le volume total par la longueur du site afin de permettre une inter-comparaison des sites indépendamment de leur longueur.

Ce travail a fait l'objet d'un stage de découverte de licence 3 de 2 mois durant lequel les résultats de la première campagne ont été analysés.

c) Identification des sources de MES sur le bassin versant de la Sélune

Des outils de la géochimie organique ont été utilisés pour étudier les sources de MES transportées par la Sélune. Ces outils sont basés sur l'analyse moléculaire de la matière organique particulaire qui est une fraction des matières en suspension. Ces matières organiques (MO) sont héritées des organismes vivants dans le bassin versant et peuvent être d'origine autochtone (organismes vivants dans la rivière) ou allochtone (organismes terrestres). L'utilisation de ces outils est basée sur la différence de composition moléculaire entre les différents organismes permettant ainsi de discriminer des apports d'origine microbienne et végétale. De plus la distribution des molécules change d'une source à une autre en fonction des précurseurs végétaux, de l'état de biodégradation des molécules et des communautés de micro-organismes. Il est ainsi possible d'utiliser cet outil pour étudier les sources de MES dans un bassin versant. Ce travail est soumis à trois hypothèses : (i) une différence de composition entre les sources, (ii) un échantillonnage exhaustif des sources et (iii) un transfert conservatif des MO depuis les sources jusqu'aux points de prélèvement. Les résultats présentés concernent les sources potentielles et les MES prélevées à Virey, la Roche-Qui-Boit et Signy entre le 17/02/2022 et le 13/06/2022.

Les sources échantillonnées sont 5 litières et 5 sols forestiers prélevés aux mêmes endroits, 5 sols agricoles et 3 sédiments de rivière prélevés dans le lit de La Sélune en amont de la zone d'influence des barrages. Ces échantillons ont été prélevés le 9 juin 2022. Les sédiments de barrage (n = 3) ont été prélevés le 5 juin 2018 au niveau du Pont de La République dans les berges incisées (Sed 6) et dans les casiers ayant servi au stockage des sédiments (Sed 4 et 5) (Figure 11).

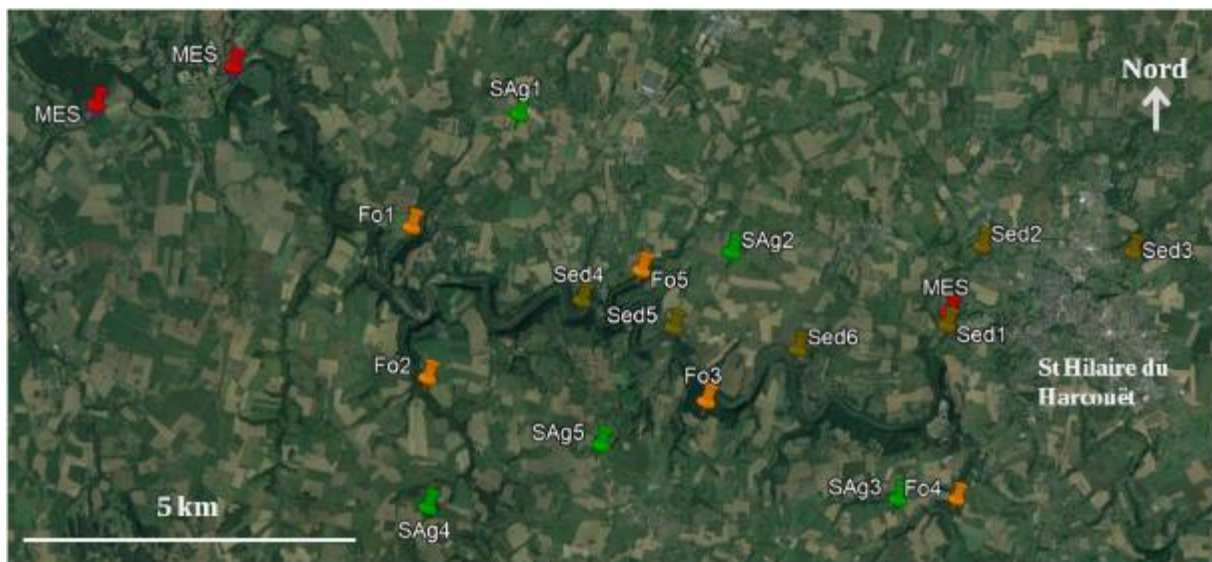


Figure 11 Localisation des échantillons de source de matière organique particulaire (SAg : sol agricole, Fo : litière et sol forestier, Sed : sédiment, MES : matières en suspension).

Une fois prélevés, les échantillons ont été lyophilisés et broyés au mortier. Ils ont ensuite été analysés par thermochimie couplée à la chromatographie en phase gazeuse et à la spectrométrie de masse (THM-CPG-SM). Les signaux de chaque molécule cible ont été quantifiés via l'intégration de leurs aires. Plus la molécule est présente plus son aire est importante. La distribution relative des molécules cibles pour un échantillon donné représente son empreinte chimique. Cette empreinte change en fonction des précurseurs biologiques à l'origine de la matière organique comprise dans l'échantillon analysé.

Résultats

1) Flux hydrologiques

Les précipitations sur l'année 2022-2023 ont été de 1025 mm à la station Météo France de Saint-Hilaire-Du-Harcouët (50600). C'est une année humide en comparaison avec la moyenne annuelle sur cette station depuis 2015 qui est de 860 mm/an. Les précipitations sont reliées linéairement au débit spécifique pour les stations de Virey et Signy (Figure 12). Mais l'année 2022-2023 se distingue avec un débit spécifique plus faible que celui attendu pour ce niveau de pluie. Et ce constat s'observe pour d'autres sites sur la Sélune suivis par la DREAL Normandie (cf. « Estimation de la contribution des affluents aux flux de Signy », Figure 29).

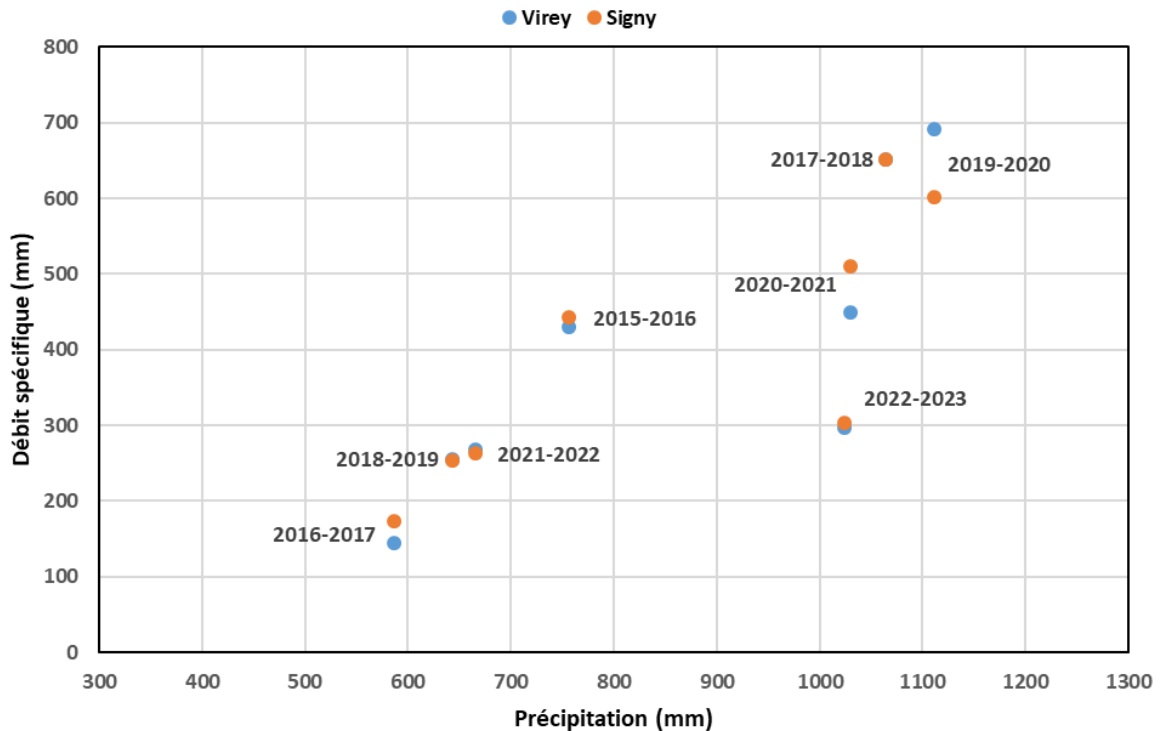


Figure 12 Débit spécifique en fonction des précipitations sur l'ensemble des années suivies pour les stations amont et aval.

Pour expliquer cette observation, on peut s'intéresser à la répartition des pluies cette année-là. 2022-2023 a été caractérisée par un hiver plutôt sec et un été humide. En effet, quand on compare le cumul des précipitations de cette année avec ceux de deux autres années humides (2017-2018 et 2019-2020), on remarque des différences importantes (Figure 13). A la sortie de l'hiver (1^{er} mars), 59% de la pluie annuelle était déjà tombée pour 2017-2018, 74% pour 2019-2020 et seulement 48% pour 2022-2023. Au 1^{er} juillet, 90% des précipitations annuelles étaient déjà dépassées pour les années 2017-2018 et 2019-2020 alors qu'elles n'étaient qu'à 80% pour 2022-2023. L'été 2023 a donc concentré 20% des pluies tombées sur l'année.

A l'échelle annuelle, 2022-2023 ressort donc comme une année humide, dépassant les 1000 mm/an (avec 2017-2018, 2019-2020, 2020-2021). Mais la répartition saisonnière de cette pluie révèle un hiver sec et un été humide. Cette distribution « inverse » (sec en hiver et humide en été) pourrait expliquer le faible débit spécifique observé. En effet, la grande majorité de la pluie est tombée pendant des périodes où l'évapotranspiration était forte ce qui a consommé une grande partie de l'eau. Le recouvrement du sol par les couverts végétaux a aussi limité les écoulements rapides vers le lit de la rivière. Il faut également se rappeler que l'année précédente a été très sèche et les stocks d'eau à la sortie de l'été 2022 étaient faibles.

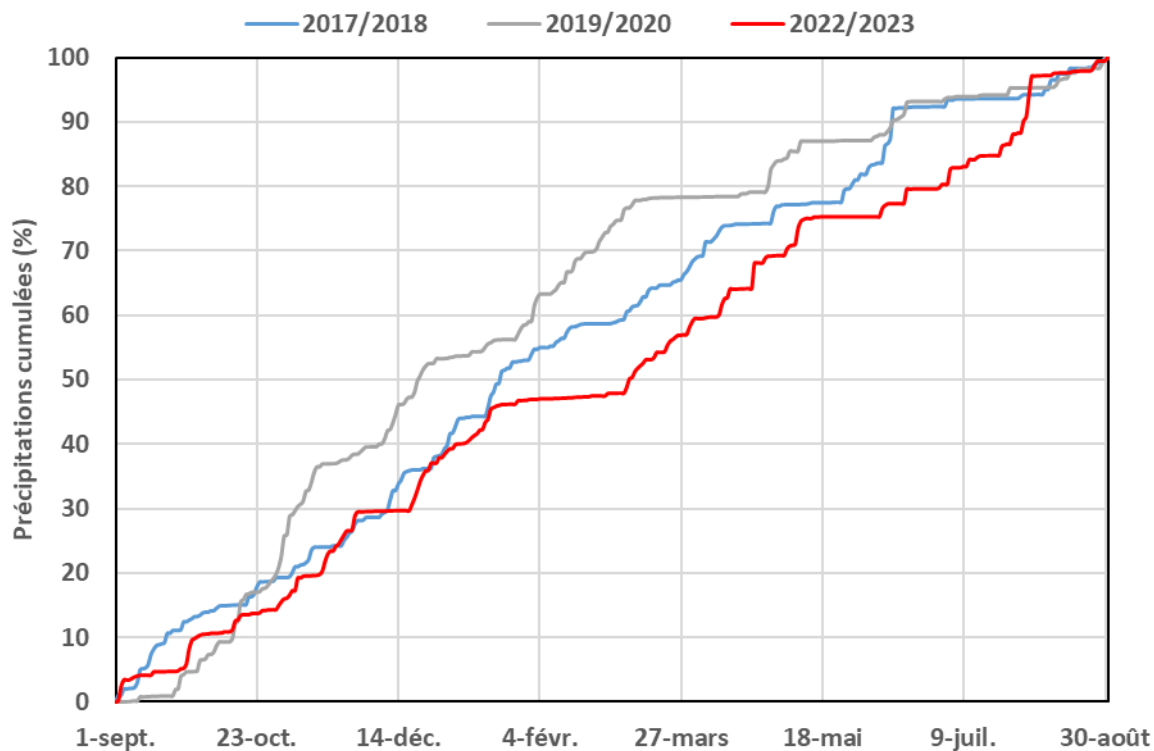


Figure 13 Précipitations cumulées sur l'année 2022-2023 et sur deux autres années humides du suivi : 2017-2018 et 2018-2019.

2) Qualité sédimentaire

a) Flux sédimentaires

Les concentrations en MES à l'aval ont augmenté progressivement depuis le début des travaux et ont dépassé celles de l'amont 2022-2023 (Figure 14). Cette augmentation s'observe quel que soit les conditions hydrologiques mais est plus marquée en crue. Cette année, la concentration moyenne de MES à Virey est de 22,5 mg/L en hors-crue et 120,7 mg/L en crue. Pour Signy, elle atteint 35,1 mg/L en écoulement de base et 236,5 mg/L en crue.

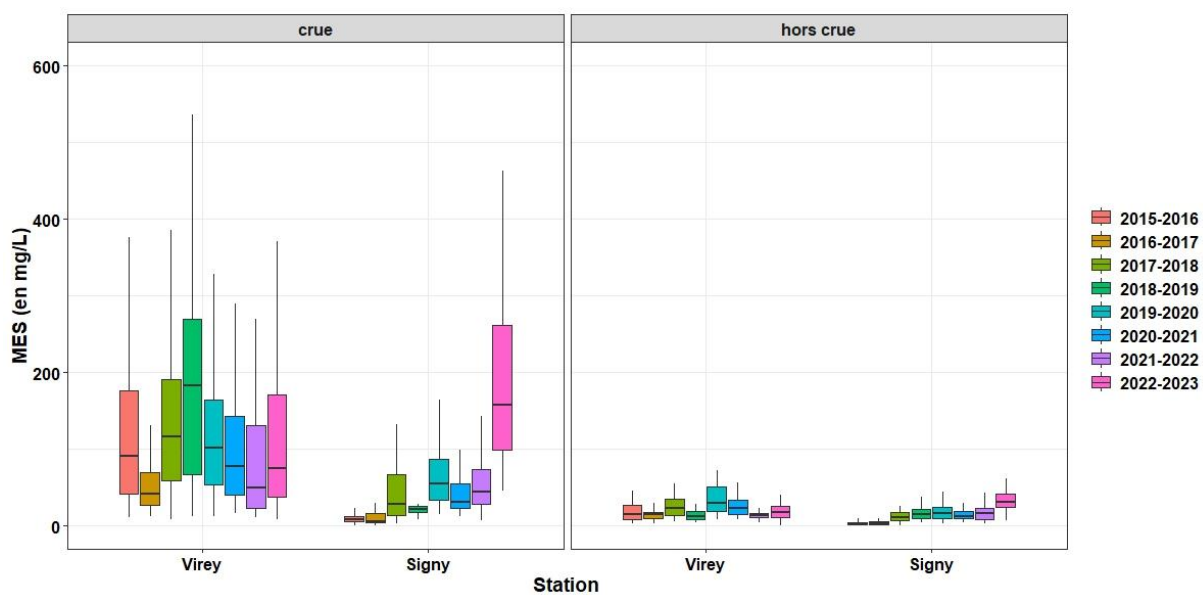


Figure 14 Boxplots des concentrations de MES en crue et hors crue aux deux stations.

Les flux spécifiques de MES ont été calculés pour les stations amont et aval (Figure 15). Les flux totaux ont aussi été calculés (Annexe 2). Ces valeurs diffèrent des rapports précédents car la méthode de calculs a été modifiée cette année (cf. « Calculs des flux sédimentaires fins »), mais les ordres de grandeur restent les mêmes. On observe une relation forte avec la pluviométrie, où les années les plus humides correspondent aux flux de MES les plus importants (2017-2018 et 2019-2020) ou inversement avec les années les plus sèches (2016-2017 et 2018-2019). Jusqu'à 2021-2022, et la remise en continuité de la rivière, les flux amonts étaient supérieurs aux flux avals avec des taux d'abattement allant de 58% à 90%. L'année dernière, les flux de MES avals ont été pour la première fois supérieurs aux flux amonts, notamment à partir de la vidange du barrage de la RQB le 15 mai 2022 (cf. Rapport bilan 2021-2022 Programme Sélune). L'année 2022-2023 confirme ce phénomène avec des flux avals 3 fois plus importants que les flux amonts (10,0 T_{MES}/km²/an pour Virey contre 30,5 T_{MES}/km²/an pour Signy).

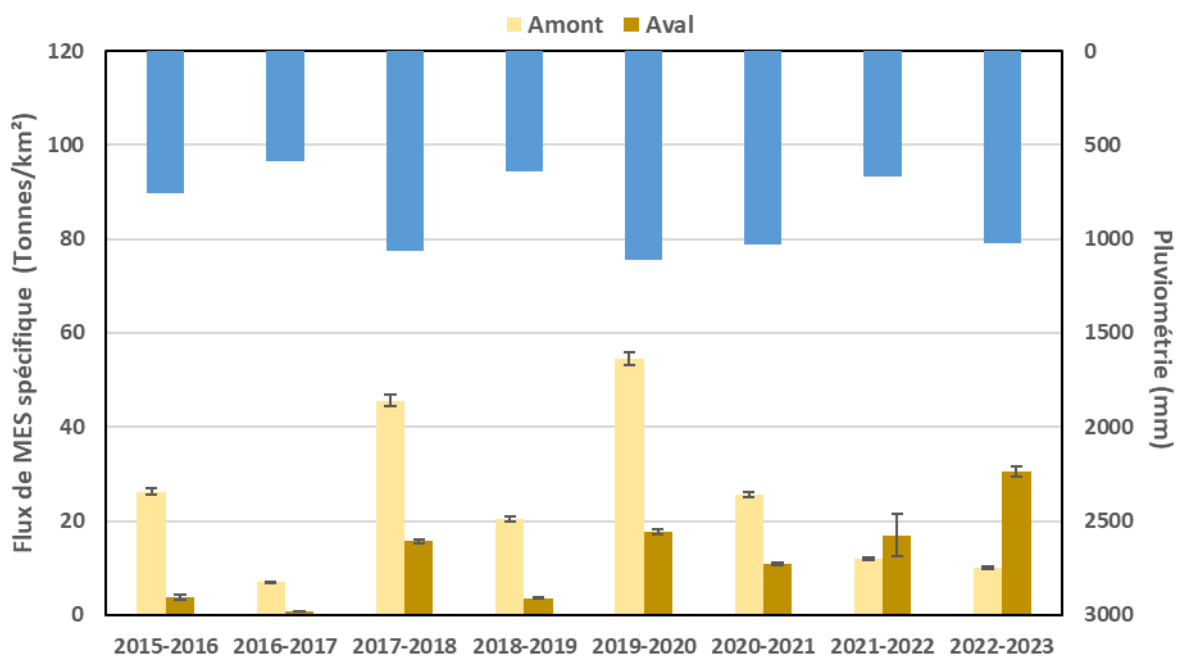


Figure 15 Récapitulatif des flux spécifiques de MES aux stations amont et aval depuis le début du suivi.

Les précédents rapports ont décrit la relation linéaire entre le flux spécifique annuel de MES et la lame d'eau annuelle écoulee (exprimée par la pluviométrie). Comme l'année 2022-2023 a été particulière avec une forte pluviométrie mais un débit spécifique faible (cf. « Flux hydrologiques »), il a plutôt été choisi de comparer le flux spécifique de MES avec le débit spécifique, qui représente vraiment ce qui s'écoule dans la rivière (Figure 16).

Entre 2015 et le 15 mai 2022, la pente de la relation pour Signy est beaucoup plus faible que celle de Virey à cause de l'effet d'abattement des barrages sur le flux de particules. L'hypothèse est qu'une fois la continuité hydro-sédimentaire rétablie, après une période de transition, les 2 stations devraient suivre des tendances similaires, avec un transport sédimentaire spécifique équivalent.

Les flux pendant la période de vidange (15 mai-1 sept 2022) et en 2022-2023 se différencient avec des valeurs avals plus importantes que celles amonts. Ces 2 points s'éloignent autant de la tendance observée à Signy que de celle observée à Virey, ce qui indique des dynamiques aux deux stations toujours pas équivalentes. En revanche, les années « Travaux » ne se distinguent pas sur ce graphique ce qui témoigne d'une fonction de sédimentation des particules amonts efficacement maintenu par le

seul barrage de la RQB, similaire à celle qui avait lieu lorsque les deux barrages étaient encore en fonction.

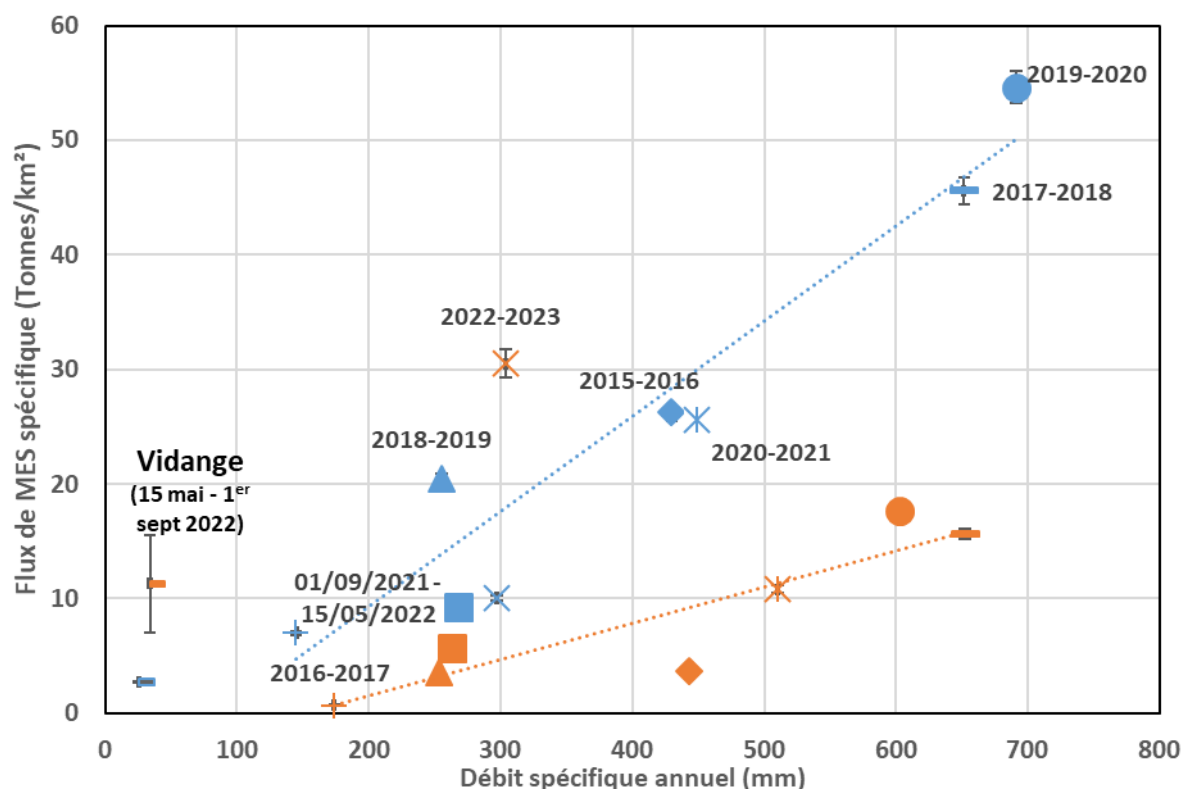


Figure 16 Flux de MES spécifique en fonction du débit spécifique pour chacune des années suivies (bleu = Virey, orange = Signy). Les droites de régression affichées ne prennent pas en compte la vidange et l'année 2022-2023 (R^2 Virey = 0,93, R^2 Signy = 0,81). Les incertitudes associées aux mesures sont représentées.

b) Flux sédimentaire 2022-2023 à la Roche-Qui-Boit

Sur l'année 2022-2023, 20 prélèvements d'eau ont été effectués sur la station de la RQB, dont 6 réalisés en crue. Les valeurs de MES variaient de 13 à 204 mg/l et une concentration de 1440 mg/l a été mesurée le 21 mars 2023. Mais elle n'a pas été prise en compte dans les analyses car elle était beaucoup trop élevée par rapport aux autres. A partir de ces données, un modèle linéaire passant par 0 a été déterminé. Le flux de sédiments spécifique estimé pour cette année est de 26,0 (+/- 2) T_{MES}/km^2 . Ce résultat est dans le même ordre de grandeur que celui calculé à Signy (30,5 (+/- 2,4) T_{MES}/km^2).

Cette valeur est potentiellement sous-estimée car peu de prélèvements ont été faits en crue et donc le modèle manque de représentativité pour toutes les conditions hydrologiques. Il y a également 37 jours de données de turbidité manquantes sur l'année, dû à un étiage prolongé à la fin de l'été 2022 qui a maintenu la sonde hors de l'eau.

3) Qualité chimique

a) Flux chimiques

Les précédents rapports ont mis en évidence une augmentation de certains éléments depuis le début des travaux, comme le phosphore total et les orthophosphates qui sont liés aux particules en suspension et suivent une dynamique similaire aux MES. Cette observation se confirme depuis l'effacement du dernier barrage avec, dorénavant des concentrations équivalentes à l'amont et à l'aval (Figure 17). Le phosphore total est même supérieur à Signy avec une concentration moyenne sur 2022-2023 de 0,35 mg/L contre 0,23 mg/L pour Virey.

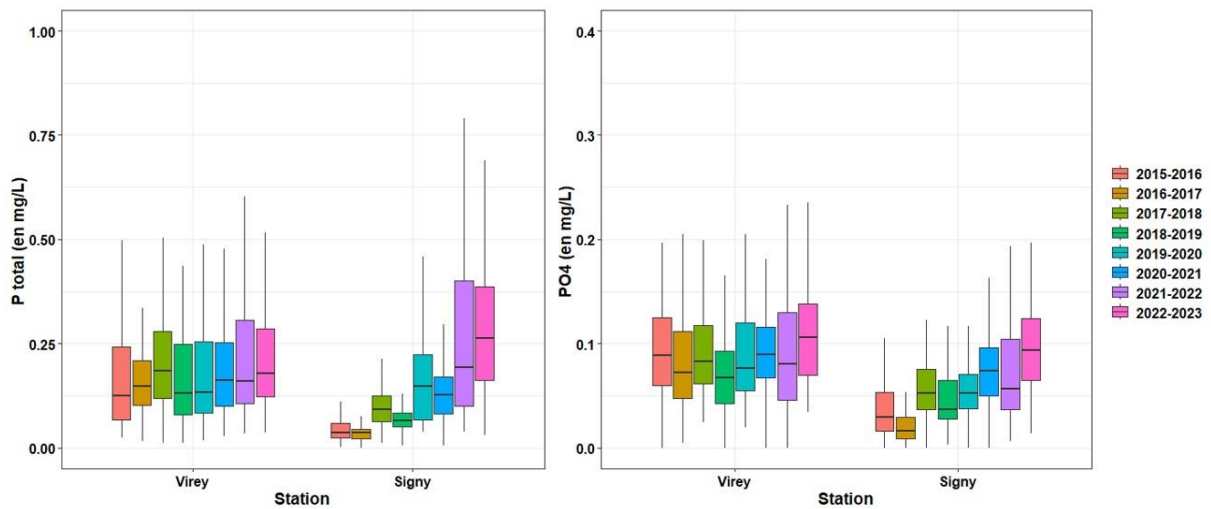


Figure 17 Boxplots des concentrations en phosphore total (à gauche) et en orthophosphates (à droite) à Virey et Signy.

Pour les autres éléments, on observe aucune différence marquée entre Virey et Signy, avec des concentrations moyennes qui semblent similaires entre les deux stations (Figure 18), exceptés pour les sulfates qui présentent une forte hausse cette dernière année sur Signy.

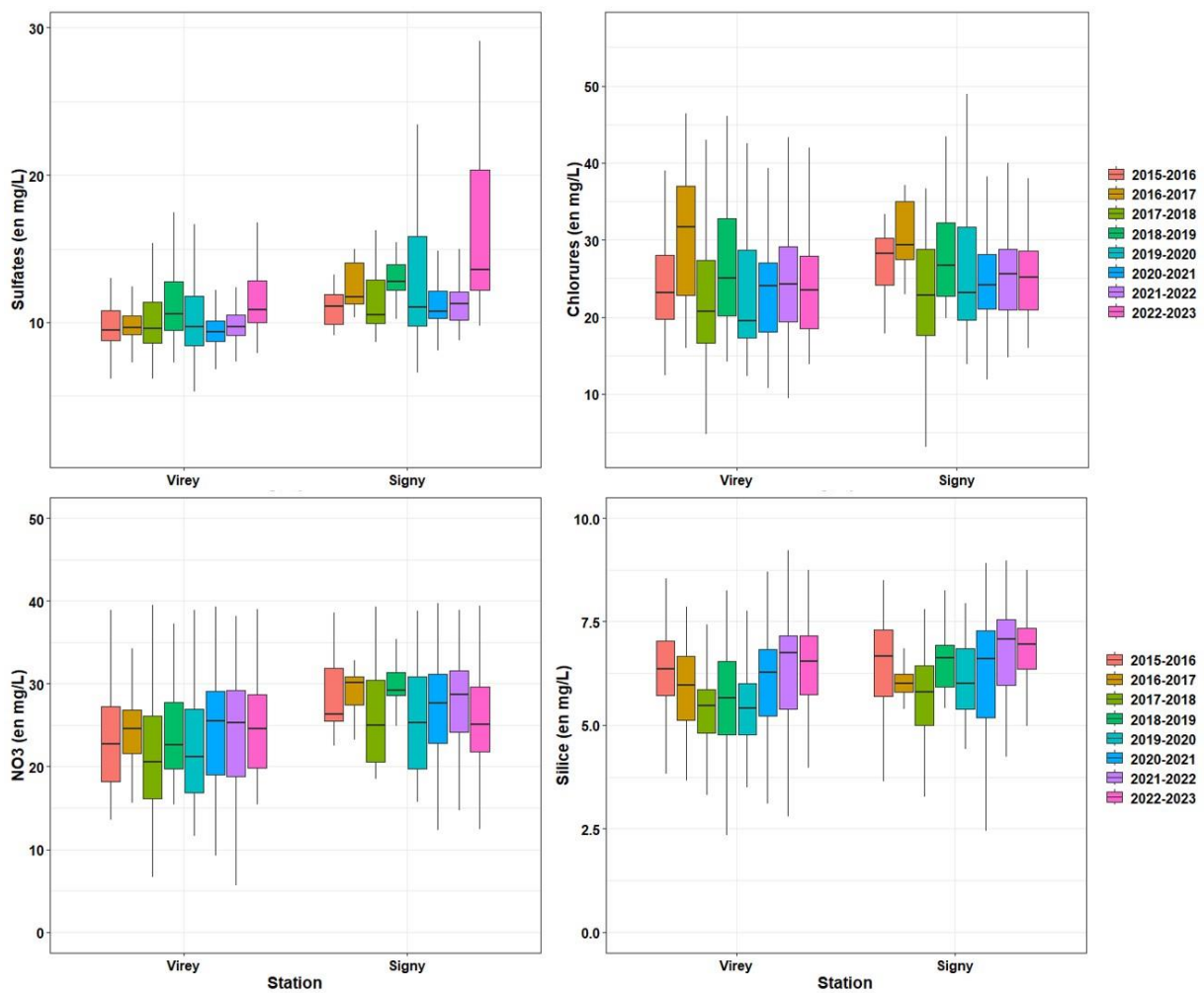


Figure 18 Boxplots des concentrations en sulfates, chlorures, nitrates et silice à Virey et Signy.

En revanche, la dynamique temporelle de ces éléments est différente entre les deux stations (Figure 19). Avant l'effacement des barrages, les concentrations de nitrate et silice à l'aval étaient lissées avec les pics de dilutions période de crue observés à Virey (en noir) qui étaient absents à Signy (en rouge). Cette dynamique de crue est graduellement revenue à l'aval à partir de 2018 et est totalement similaire aujourd'hui. Le même schéma s'observe pour les sulfates et les chlorures (Annexe 4).

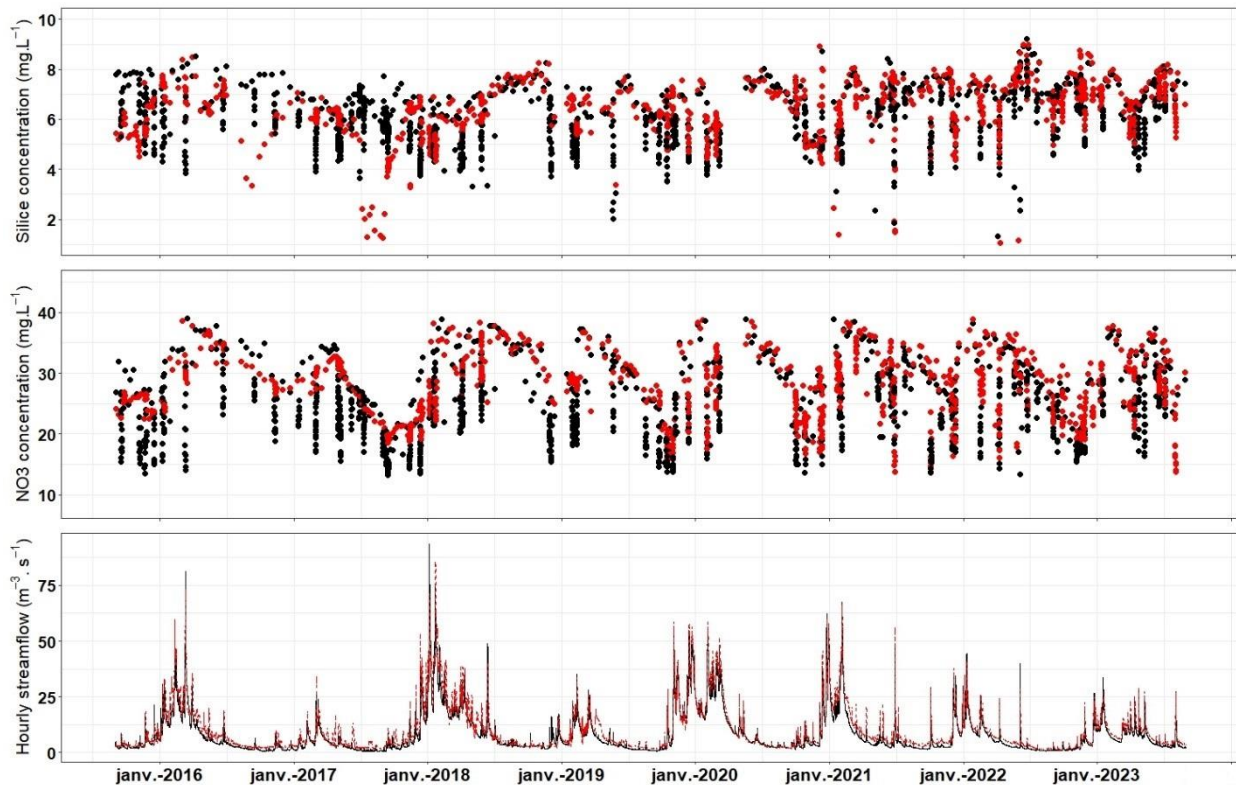


Figure 19 Chroniques des concentrations en Silice dissoute et nitrates depuis le 1^{er} septembre 2015 jusqu'au 1^{er} septembre 2023 à Virey (noir) et Signy (rouge), ainsi que la chronique des débits horaires (en bas) (Fovet et al. 2023).

Le calcul des flux de ces éléments par la méthode DWC (Annexe 3) met en évidence des valeurs aval de phosphore total et orthophosphates faibles sur les premières années du suivi, puis de plus en plus élevées jusqu'à être supérieures à celles de l'amont en 2022-2023. Pour le reste des éléments, les flux aval sont systématiquement supérieurs aux flux amont. Cela indique que, même si les barrages jouaient sur les dynamiques temporelles de ces éléments, ils n'impactaient pas les quantités transférées à l'échelle de l'année.

Le rapport C/N est un indicateur du degré d'évolution de la matière organique contenue dans l'eau, et donc de son origine. Un rapport C/N inférieur à 8 est signe d'une origine plutôt aquatique de la matière organique et un rapport C/N supérieur à 8 indique plutôt une origine terrigène (Bohlin et al., 2006). On observe à Signy une hausse progressive des valeurs, qui tendent vers celles de l'amont (Figure 20). Avec les barrages, la matière organique était issue en grande partie de la production planctonique associée aux lacs (Fovet et al., 2020). Avec leur disparition, ces apports aquatiques ont fortement diminué au profit d'apports terrestres plus importants, ce qui explique l'évolution de ce rapport C/N aval vers des valeurs plus fortes. A Virey, ce rapport est stable depuis 2015, avec une moyenne de 9,6.

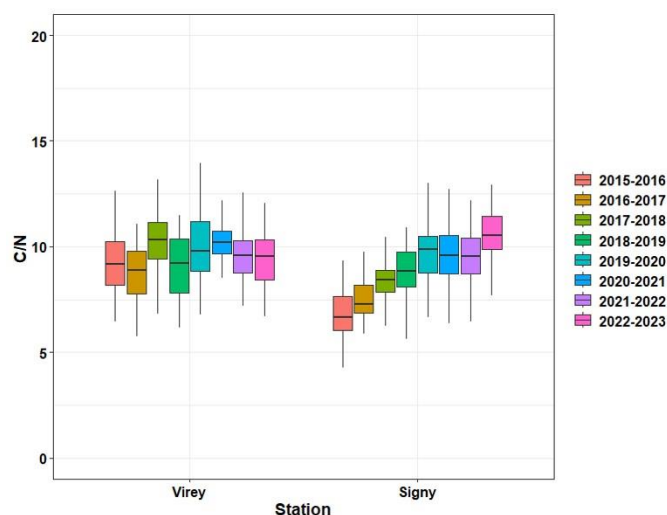


Figure 20 Boxplots des rapports Carbone/Azote à Virey et Signy.

b) Teneurs en CNP des dépôts de MES

Des prélèvements de sédiments de berges ont été effectués à Signy suite à la vidange de la retenue de la RQB, entre le 08/06/2022 et le 29/09/2022. Les teneurs en Carbone, Azote et Phosphore total y ont été mesurées (Tableau 4).

Date	Carbone (g/kg)	Azote (g/kg)	C/N	Phosphore total (g/kg)
08/06/2022	30,0	2,7	11,0	993,6
13/06/2022	10,5	0,9	11,5	525,1
22/06/2022	60,2	5,1	11,8	2087,5
13/07/2022	46,7	4,0	11,7	1732,9
27/07/2022	41,1	3,5	11,6	1425,9
18/08/2022	47,2	4,0	11,8	1761,0
30/08/2022	47,7	4,1	11,7	1825,9
12/09/2022	52,9	4,3	12,3	1797,8
28/09/2022	50,1	4,4	11,3	1910,0

Tableau 4 Concentrations en Carbone, Azote et Phosphore, ainsi que le rapport Carbone/Azote associé, dans les sédiments de berge échantillonnés à Signy suite à la vidange de la retenue de la RQB.

Les concentrations de phosphore total vont de 525 g/kg à 2087 g/kg. Une étude sur une rivière non-impactée par des barrages (la Vène, sous bassin de l'étang de Thau) relève des teneurs en phosphore total dans les sédiments de la rivière entre 1 et 3 g/kg (David et al. 2005). Les valeurs de la Sélune semblent donc extrêmement fortes. Des prélèvements à Virey sont en cours d'analyses pour pouvoir comparer l'amont et l'aval.

c) Teneurs des sédiments en éléments métalliques

Dans le précédent rapport, il a été montré que les concentrations dans l'eau de ces éléments ont atteint un pic le 8 juin 2022 puis sont redescendues sous leurs limites de quantification très rapidement

(cf. Rapport bilan 2021-2022 Programme Sélune). Le suivi sur l'eau a donc été arrêté à la fin de l'été 2022.

Pour les sédiments de berge (Figure 21), il y a une plus grande variabilité des concentrations avec toutefois une hausse progressive jusqu'au 30 août 2022, qui semble ensuite diminuer. Depuis février 2023, la fréquence de prélèvement est passée à 3 mois. Le « bruit » représenté sur les graphiques correspond au signal géochimique du bassin versant lié à la nature et la composition initiale des roches. Le seuil S1 équivaut quant à lui à la concentration maximale autorisée dans les boues épandues et est défini dans la nomenclature Loi sur l'eau de 2006. Ces seuils ont été repris de l'étude du bureau IDRA sur la gestion des sédiments contaminés dans la retenue du barrage de Veziens (IDRA Environnement, 2011). Seul le Nickel a dépassé le seuil S1 et le Cadmium s'en est fortement rapproché. Mais les concentrations de ces 2 éléments ont beaucoup diminué par la suite et sont aujourd'hui au niveau du bruit du bassin. Les concentrations en Cuivre, Zinc et Chrome sont restées à des valeurs bien inférieures, situées autour du bruit du bassin (Annexe 5). L'étude de 2011 avait mesurée dans l'Yvrande (affluent qui se jette dans l'ancienne retenue de Veziens) des concentrations de Nickel et de Cadmium supérieures au seuil S1 avec des valeurs situées respectivement autour de 60 mg/kg sec et de 4 mg/kg sec.

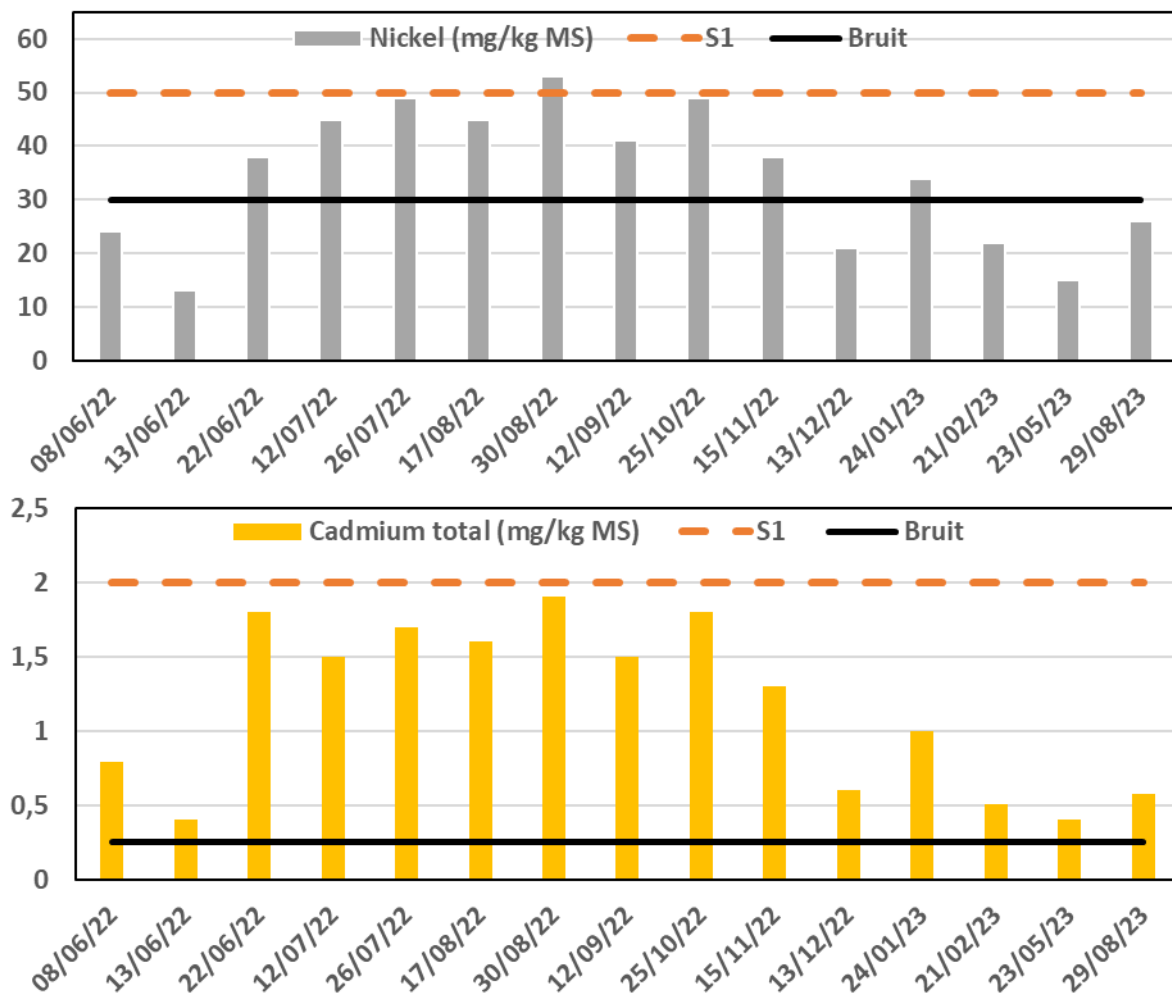


Figure 21 Concentrations en Nickel et Cadmium dans les sédiments de berge échantillonnés à Signy depuis la vidange de la retenue de la Roche-Qui-Boit. Les seuils S1 et Bruit proviennent de l'étude IDRA de 2011 sur la gestion des sédiments contaminés.

d) Origines des matières en suspension

Origine des sources de MES

Les résultats montrent une forte contamination des échantillons de MES par des marqueurs microbiens (Figure 22). Or ces proportions ne peuvent pas être expliquées avec les sources échantillonnées, ce qui implique un échantillonnage de ces dernières incomplet. Cette activité microbienne pourrait être favorisée par le piège à MES utilisé, qui intègre sur une semaine les MES dans des zones à faibles hydrodynamismes (les nids d'abeille). Comme une des hypothèses de ce travail était un échantillonnage exhaustif des sources, il est difficile d'explorer plus en détails ces résultats.

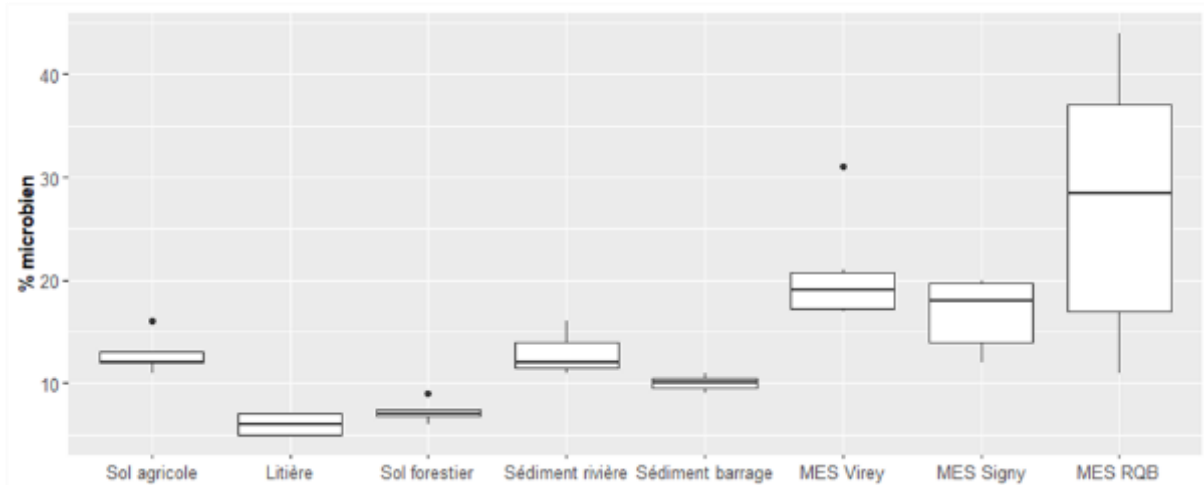


Figure 22 Boxplots des proportions de marqueurs microbiens dans les empreintes chimiques (% microbien) dans les échantillons de sources et de MES prélevées à Virey, Signy et La Roche-qui-Boit.

Cependant, il est possible de pallier ce problème en travaillant sur la fraction de l'empreinte moléculaire issue des apports en végétaux terrestres. Cette empreinte est constituée des composés phénoliques, des acides gras linéaires ayant plus de 19 atomes de C, des ω -hydroxyacides, des polyhydroxyacides et des α,ω -diacides. Trois ratios ont été calculés à partir de ces composés pour rendre compte des distributions de ces molécules dans les échantillons de sources et de MES : le C/V, le VEG ratio et le HPM AG ratio. Le C/V correspond à la somme des aires des acides coumarique et férulique divisée par la somme des aires du vanillaldéhyde, de l'acétovanillone et de l'acide vanillique. Les premières sont des unités C des lignines et les deuxièmes sont des unités V des lignines. La proportion relative de ces unités change d'un précurseur végétal à un autre et pendant la biodégradation. Le VEG ratio correspond à la proportion de PHE parmi la somme des PHE et des acides gras d'origine végétale (les acides gras linéaires ayant plus de 19 atomes de C, les ω -hydroxyacides, les polyhydroxyacides et les α,ω -diacides). Enfin le HPM AG ratio correspond à la proportion des ω -hydroxyacides et des α,ω -diacides parmi les acides gras d'origine végétale (en excluant les deux polyhydroxyacides au calcul). Ces trois ratios ainsi que la concentration en C organique dans les échantillons ont été utilisés comme variables dans une analyse en composante principale (ACP) de manière à ordonner la variance des empreintes chimiques. La projection des sources et des MES dans le plan formé par les deux premières composantes permet d'expliquer 82,7% de la variance. (Figure 23).

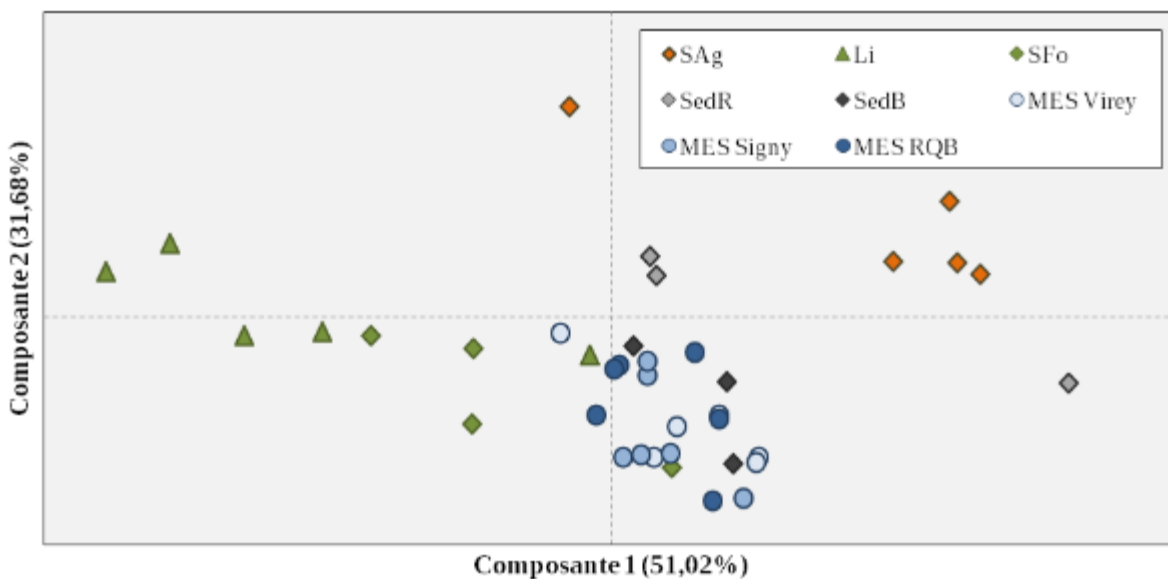


Figure 23 Projection des échantillons de sources et de MES dans le plan formé par les deux principales composantes de l'analyse en composante principale effectuée en utilisant comme variables le carbone organique total et les ratios moléculaires C/V, VEG ratio et HPM AG ratio.

Les sources semblent s'organiser en 3 groupes avec les sols forestiers et les litières (en vert), les sols agricoles (en orange) et les sédiments (en gris/noir). Ces clusters permettent ainsi de différencier les 3 origines potentielles de la MO végétale terrestre identifiées dans le bassin versant. La projection des échantillons de MES dans le plan de l'ACP semble indiquer une similarité de composition avec les sédiments.

Variabilité temporelle de la composition des MES

Cette variabilité a pour le moment été étudiée entre le 10/02/2022 et le 10/06/2022. Il ressort que les échantillons prélevés à la Roche-Qui-Boit et Signy entre le 23 mai et le 10 juin ont des empreintes moléculaires très proches de celles des sédiments de barrage. Ce qui est très probablement liée à la vidange du barrage de la Roche-Qui-Boit situé en amont qui a commencé le 15 mai 2022. L'analyse des échantillons prélevés entre le 10/06/2022 et le 11/07/2023 permettra de confirmer cette observation.

4) Transport des sables

a) Flux de sables (Fovet *et al.*, 2023)

Les estimations des flux de MES ne prennent pas en compte les flux de sable (> 50 μm) qui se sont déplacés près du lit de la rivière, car l'équipement de surveillance ne permet pas de quantifier avec précision cette composante du flux sédimentaire. Cependant, l'analyse de la distribution granulométrique des MES au niveau de Virey et Signy a mis en évidence que les sédiments de plus de 20 μm ne franchissaient pas les barrages (Figure 24). En supposant que 10 % du volume total de sédiments (1 800 103 m^3) qui se sont déposés dans les deux réservoirs au cours des 90 dernières années avaient une taille supérieure à 50 μm (IDRA Environnement, 2012), le flux annuel de sable à l'amont a pu être estimé. Sur la base des données d'échantillonnage de cette étude et une densité de sédiments de 1,5 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (pour convertir le volume de sédiments en masse), le flux annuel de sable à Virey a pu être estimé à 3 000 t par an (soit 4,8 $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}$ par an).

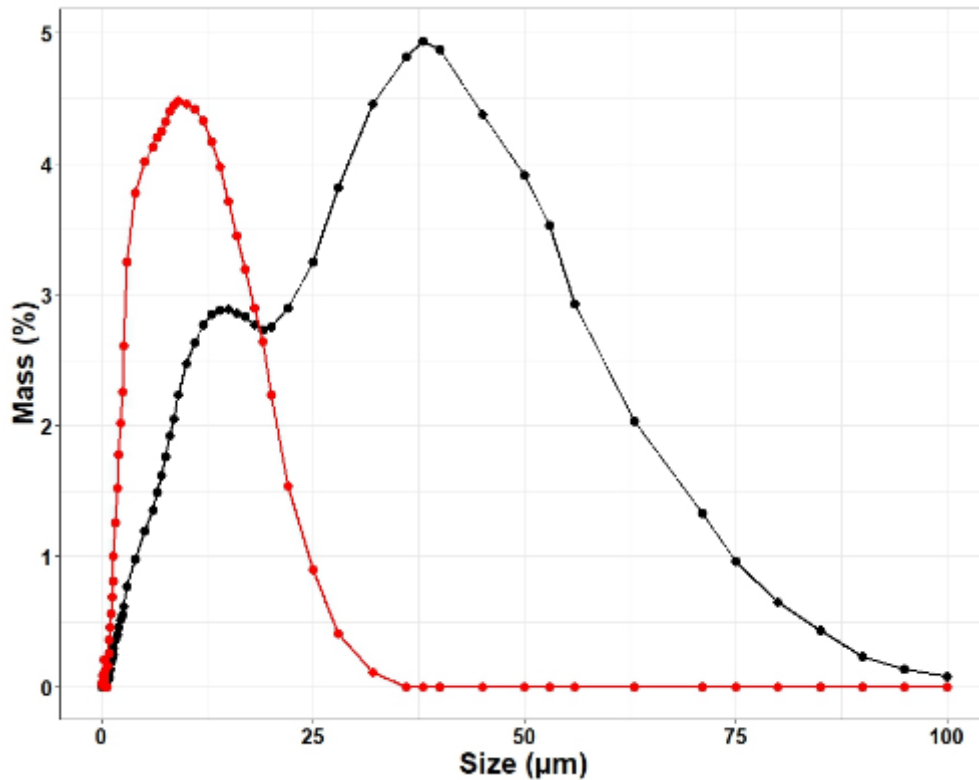


Figure 24 Distribution des tailles de particules des MES aux stations de Virer (noir) et Signy (rouge) avant que les barrages soient arasés.

b) Evolution de la granulométrie en aval des barrages

Depuis 2022, 15 échantillonnages ont été effectués (Figure 25). Avant la vidange du barrage de la RQB en mai 2022, la masse de sédiments circulant en aval était plus faible qu'à Virey. A partir du 1^{er} juin, des quantités beaucoup plus élevées sont observées aux 3 stations aval. Au début, ce sont en majorité des sédiments fins (< 200 µm) qui ont été exportés mais à partir du 2 août, des sables (> 200 µm) ont été piégés à la RQB, signe de leur déplacement. Mais ce signal « sableux » n'a pas été observé plus en aval, au Pont du bateau et à Signy (Annexe 6). On peut supposer que le transit de cette fraction granulométrique au niveau de ces stations s'est fait pendant l'hiver 2022-2023, quand le suivi était pause.

Les échantillonnages de 2023 montrent un rééquilibrage des masses granulométriques entre les 4 stations mais il est encore trop tôt pour parler de signal « naturel ». De nombreuses mouilles sont présentes en aval et ont pu stocker des sédiments qui peuvent dorénavant être remobilisés lors d'évènements extrêmes.

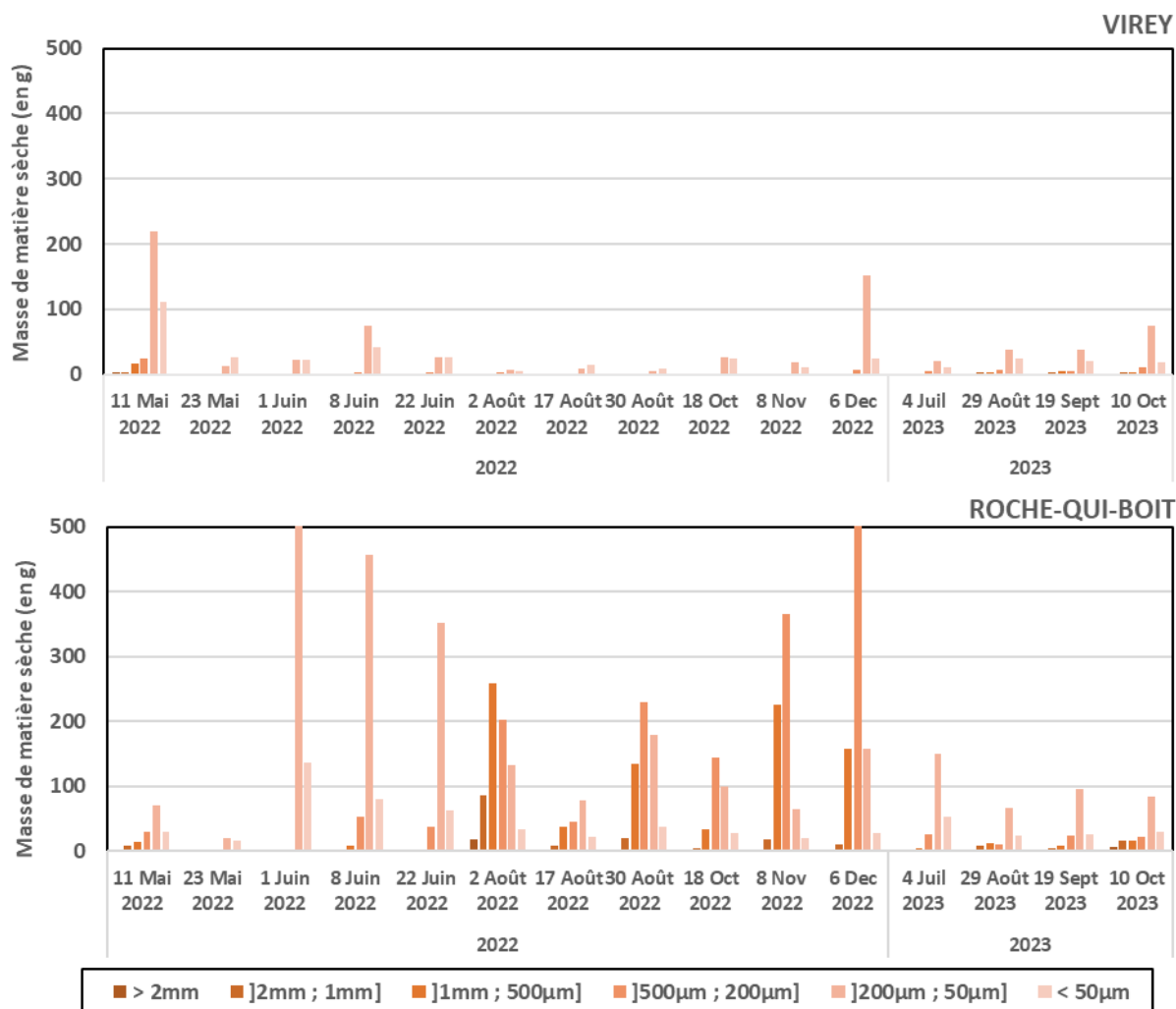


Figure 25 Evolution granulométrique des particules en suspension à Virey et la RQB depuis mai 2022.

6) Déplacement des particules grossières

Depuis le début du traçage sédimentaire de la charge de fond, aucun évènement extrême (cruce décennale ou plus) n'a été observé. Les particules suivies ont globalement montré une mobilité très faible (70% ont parcouru moins de 5m en 5 ans, la distance maximum est de 23 mètres soit moins de 5 m par an) que ce soit en amont ou en aval du secteur restauré.

L'année 2022-2023 a été une année calme d'un point de vue hydrologique avec aucune crue ne dépassant le débit biennal (51,7 m³/s). Le maximum a été observé en janvier avec un pic à 33,7 m³/s. Étant donné l'absence de crues importantes et les faibles mobilités déjà observées pour des débits identiques les années antérieures, aucun suivi n'a été fait en 2022-2023.

Cette faible mobilité du lit de la Sélune résulte de deux facteurs : la faible énergie de ce type de rivière (puissance spécifique moyenne < 30 W/m²) et ses sédiments de fond particulièrement grossiers (D50 de 45-50mm), hérités du Pléistocène (Beauchamp, 2018). Un fonctionnement sédimentaire similaire a été observé dans d'autres cours d'eau de zones hydrologiques granitiques de Normandie (ex : Orne, Vire), dont la charge de fond héritée ne correspond plus aux conditions hydrauliques actuelles et est donc peu mobile. Ces rivières n'ont aujourd'hui quasiment plus d'apport en sédiments grossiers, leurs

bassins versants ne produisant essentiellement que de la matière fine depuis leur transformation pour l'agriculture au Moyen-Âge (Beauchamp, 2018).

5) Température de l'eau (Fovet *et al.*, 2023)

Les températures amont et aval ont été comparées sur les périodes de pré-travaux (mars 2015 – mars 2017) et de fin de travaux (mars 2021 – mars 2023) (Figure 26). Graphiquement, on observe une non-superposition des signaux amont et aval au début du suivi, avec des températures avales plus lisses et plus chaudes (jusqu'à +5°C en période estivale).

En automne et en hiver (septembre à mars), la différence moyenne de température de l'eau entre l'amont et l'aval par rapport à la température moyenne de l'eau à l'amont était de -9,8 % pour la période de pré-arasement et de 0,6 % pour l'année hydrologique 2022-2023. Les variations de la température de l'eau à l'aval étaient également beaucoup plus faibles au cours de la période précédant l'effacement, avec une amplitude relative (c.-à-d. le maximum journalier moins le minimum journalier divisé par la moyenne journalière) égale à 11,6 %, tandis qu'elle a atteint 18,8 % pour l'année 2022-2023.

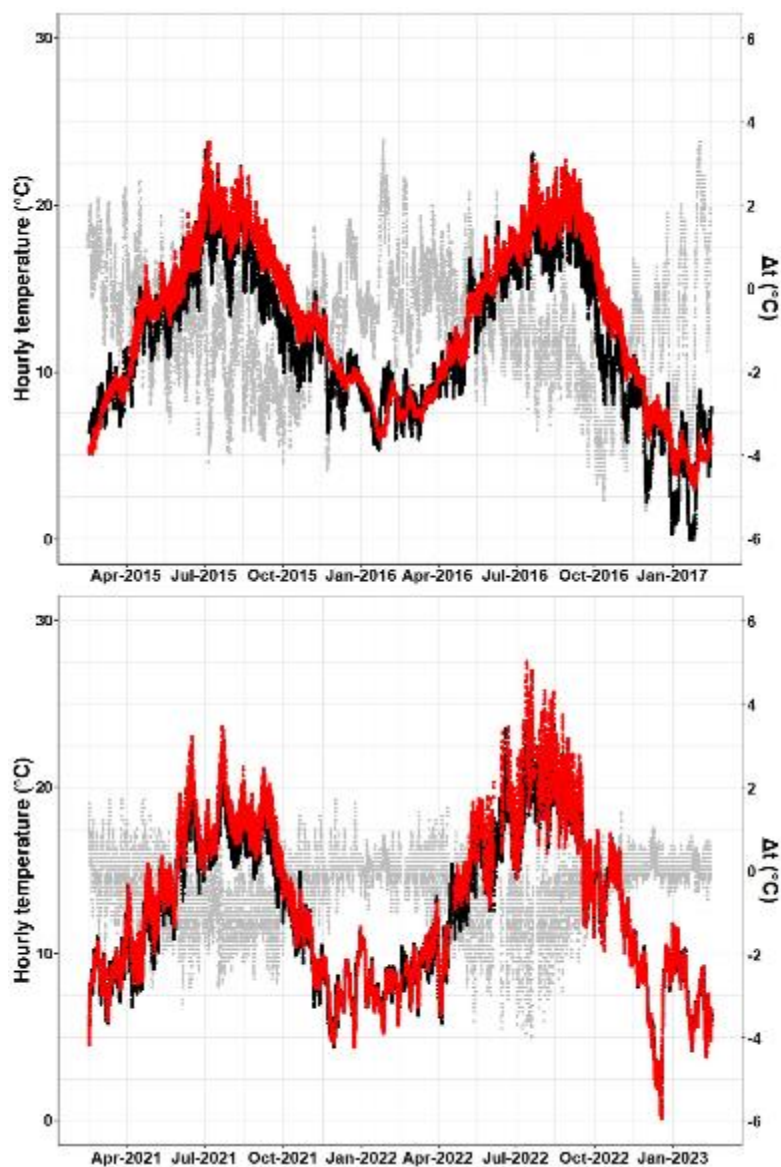


Figure 26 Température horaire à Virey (noir) et Signy (rouge), ainsi que la différence Virey-Signy (gris) ; en haut : pour la période avant arasement (2015-2017) ; et en bas : après arasement (2021-2023).

Les dynamiques amont et aval différaient avant les travaux et sont dorénavant semblables. L'effacement des barrages a donc permis une baisse du réchauffement des eaux à l'aval pendant les périodes chaudes, ainsi que des variations journalières plus marquées.

7) Contribution des affluents aux flux de la Sélune

Depuis le dernier rapport, 2 campagnes affluents supplémentaires ont été menées les 21/03/23 et 27/09/23. En tout, 8 campagnes ont été faites depuis 2019. Les 15 points habituels ont été échantillonnés (Tableau 5).

Point de prélèvement	Nom de la station	Surface du BV (ha)
P1	Airon Amont STEP	27410
P2	Airon Aval STEP	
Virey	Virey	62669
P3	Le Vauroux	1119
P4	Pont de la République	351
P5	Les Foucrais	219
P6	Lecusset	164
P7	Route de l'Yvrande	1769
P8	La Bouffetière les Biards	184
P9	Le Lair	5513
P10	L'Isolant RD	613
P11	L'Isolant RG	
P12	La Fieffé au roy Vezins/la lande de Vezins	196
P13	RQB amont (route les douets Vezins)	190
P14	Route Dougerus le fief	477
P15	Route de la Gauberdière/la Larderie	289
Signy	Signy	77089

Tableau 5 Noms des points de prélèvements de l'amont (P1) à l'aval (Signy), et les surfaces de bassins versants correspondants.

a) Variabilité chimique des affluents

Les résultats des analyses chimiques ont montré que les concentrations mesurées sur les affluents sont souvent du même ordre que celles mesurées sur la Sélune (Figure 28). On observe cependant une variabilité plus importante en nitrate et silice pour les petits et moyens bassins versants (< 100 km²). Sur l'Airon, les stations en amont (P1) et en aval de la STEP (P2) ne présentent pas de différences importantes entre elles ni avec celles de Virey ou Signy. L'Yvrande (P7) affiche toujours des valeurs de chlorures et sulfates bien plus importantes que les autres affluents, confirmées par une forte conductivité (Annexe 7). Une exploration le long du cours de cet affluent a démontré que la conductivité passe de 200 à 1600 µS/cm sur une zone très localisée située au lieu-dit de la Chesnelière. Ceci témoigne d'une pollution locale du cours d'eau. La station des Foucrais (P5) présente des valeurs de phosphore total, de phosphates et d'ammonium plus élevées. La présence d'une STEP juste en amont pourrait expliquer ces résultats. Enfin, la station de la RQB amont (P13) montre des concentrations en MES bien plus fortes que les autres affluents. Les prélèvements sont en effet réalisés au niveau d'un abreuvoir pour bovins ce qui pourrait justifier ces résultats.

Le coefficient de variation (Ecart-type / Moyenne) a été calculé pour chaque date et chaque station pour étudier la variabilité spatiale et temporelle des mesures (Annexe 8). Un seuil de 30% a été utilisé pour définir la stabilité d'un paramètre. Les résultats par site montrent une hétérogénéité des valeurs

de MES, Phosphore total et PO4 sur la plupart des affluents. L'échantillonnage alternativement en hautes eaux (printemps) et basses eaux (automne) influe sur la remise en suspension des particules ce qui peut expliquer cette variabilité. Le reste des paramètres semble stable. Par campagne, on observe des valeurs de MES, Phosphore total, PO4, Cl et SO4 très variables. Cela confirme la présence de stations particulières (Yvrande, Foucrais, RQB amont) qui augmentent ce coefficient de variation.

b) Lien entre occupation du sol et chimie de l'eau

Pour observer l'effet de l'occupation du sol et de la pente moyenne sur la variabilité chimique, des corrélations de Pearson ont été menées entre les concentrations moyennes en éléments chimiques de chaque affluent et ces 2 variables (Figure 27 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Mais les seules corrélations significatives s'observent entre les MES et la surface d'urbain (-0,6), la pente et les nitrates (-0,5), et la pente et les chlorures (-0,6). Ces résultats indiquent une faible influence de ces facteurs sur la variabilité chimique des affluents.

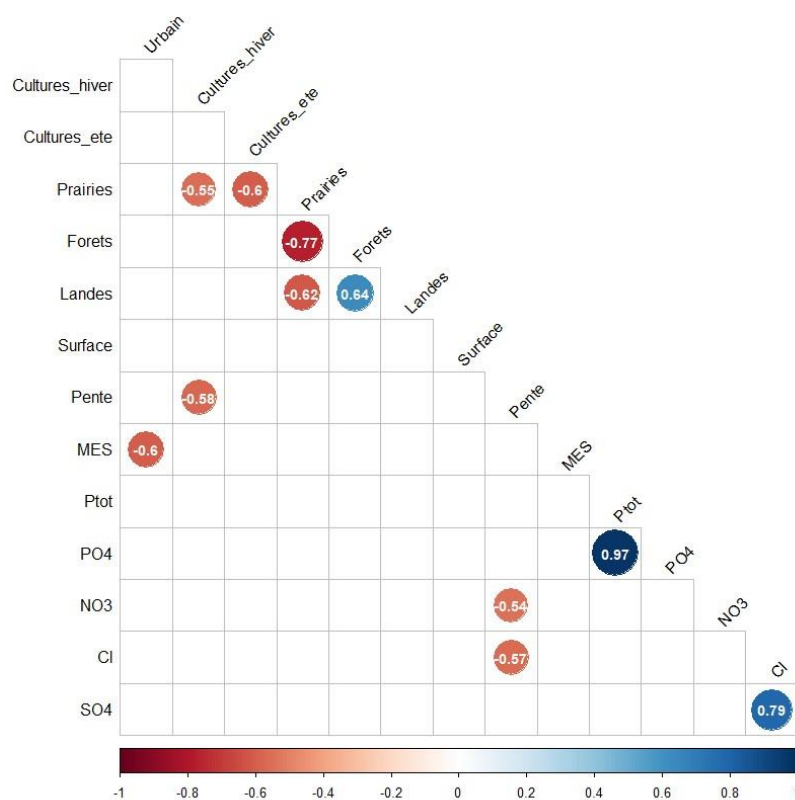


Figure 27 Tableau des coefficients de Pearson calculés 2 à 2 entre les variables chimiques de l'eau et les % d'occupation des sols de chaque affluents. Seuls les coefficients significatifs et > ou < à 0,5 ont été affichés.

Le bassin versant de la Sélune est dominé par des activités rurales et agricoles, principalement l'élevage et les cultures d'été (maïs, soja, tournesol). Sur chaque bassin versant, on retrouve en moyenne (+/- écart-type) 45% (+/- 10%) de prairies, 27% (+/- 5%) de cultures d'été, 11% (+/- 6%) de cultures d'hiver et de forêts, et enfin 6% (+/- 3%) de surfaces urbanisées. Cette relative homogénéité dans l'occupation des sols peut expliquer la faible variabilité chimique qui a été observée entre les différents bassins versants.

La pente est variable entre les affluents, allant de 4% pour le bassin de l'Yvrande, à 9% pour celui du Lecusset (la pente moyenne est de 7%). Mais ce paramètre ne semble pas apporter de variabilité dans la chimie des affluents. Mais l'effet de la pente est difficile à prédire car elle dépend beaucoup de la gestion agricole des sols, sur laquelle nous n'avons pas d'information.

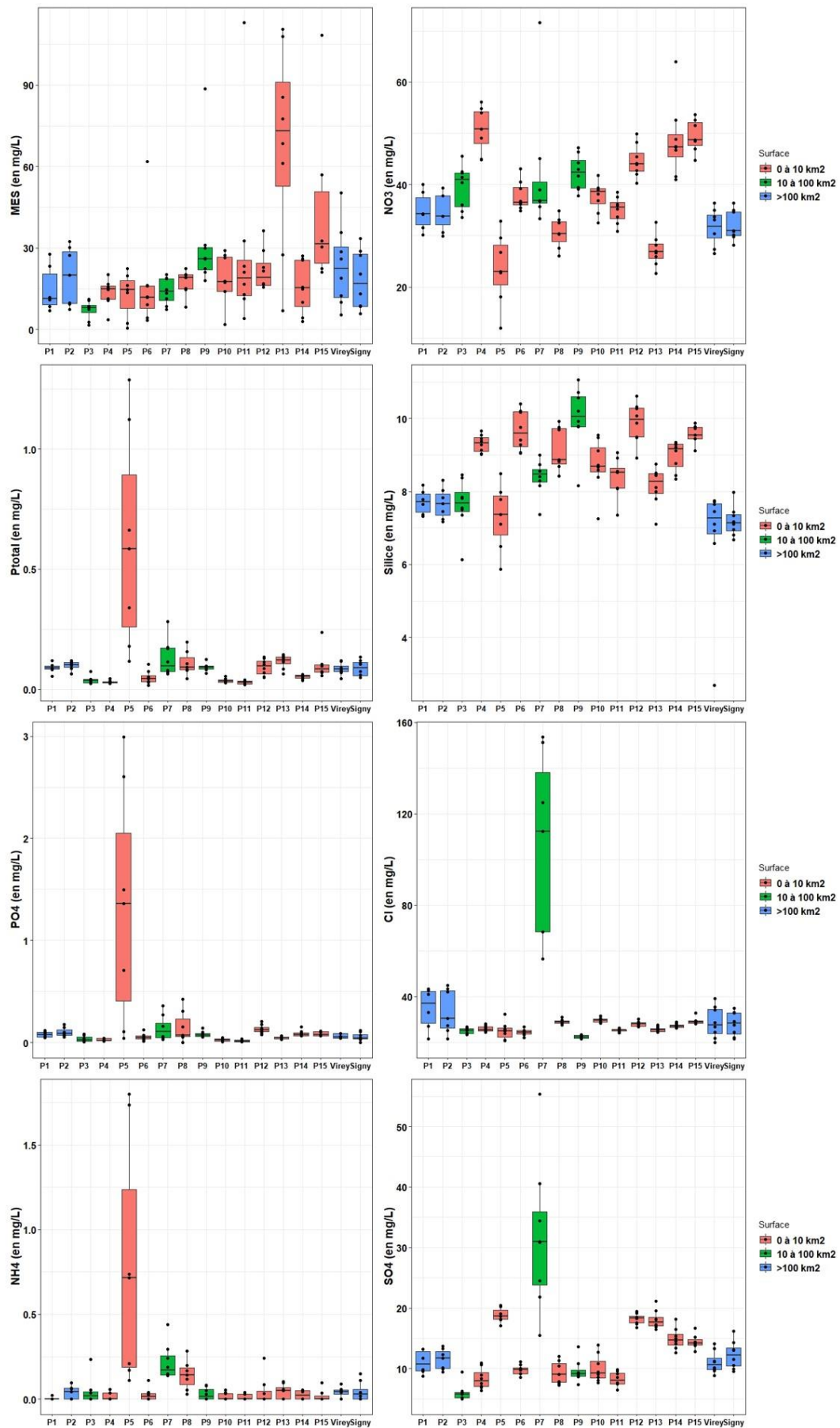


Figure 28 Concentrations des affluents en éléments dissous et particulaires lors des différentes campagnes effectuées.

c) Estimation de la contribution des affluents aux flux de Signy

La contribution de chaque affluent a été considérée comme étant proportionnelle à la taille de son bassin versant. Pour tester cette transposition simple, les flux d'eau de bassins versants de tailles différentes ont été mis en relation avec la pluviométrie de la station météo de Saint-Hilaire-Du-Harcouët (Figure 29). Les débits ont été obtenus sur l'Hydro Portail (DREAL) sauf pour les données du Moulinet qui ont été acquises par l'INRAE. Une large gamme de bassins versants est couverte, allant de 4,5 km² pour le Moulinet à 777 km² pour Signy. La Braize, qui est un affluent de la Sée, a été ajoutée pour mieux couvrir les petites tailles de bassins versants.

Malgré une légère dispersion des valeurs pour les fortes pluviométries, on observe une relation assez linéaire entre ces deux paramètres. Pour une pluie donnée, on a un débit spécifique proche, quel que soit la taille du bassin versant. Le rapport des superficies ($Aire_{\text{affluent}}/Aire_{\text{Signy}}$) a donc été jugé satisfaisant pour évaluer la contribution des affluents au flux hydrique de la Sélune.

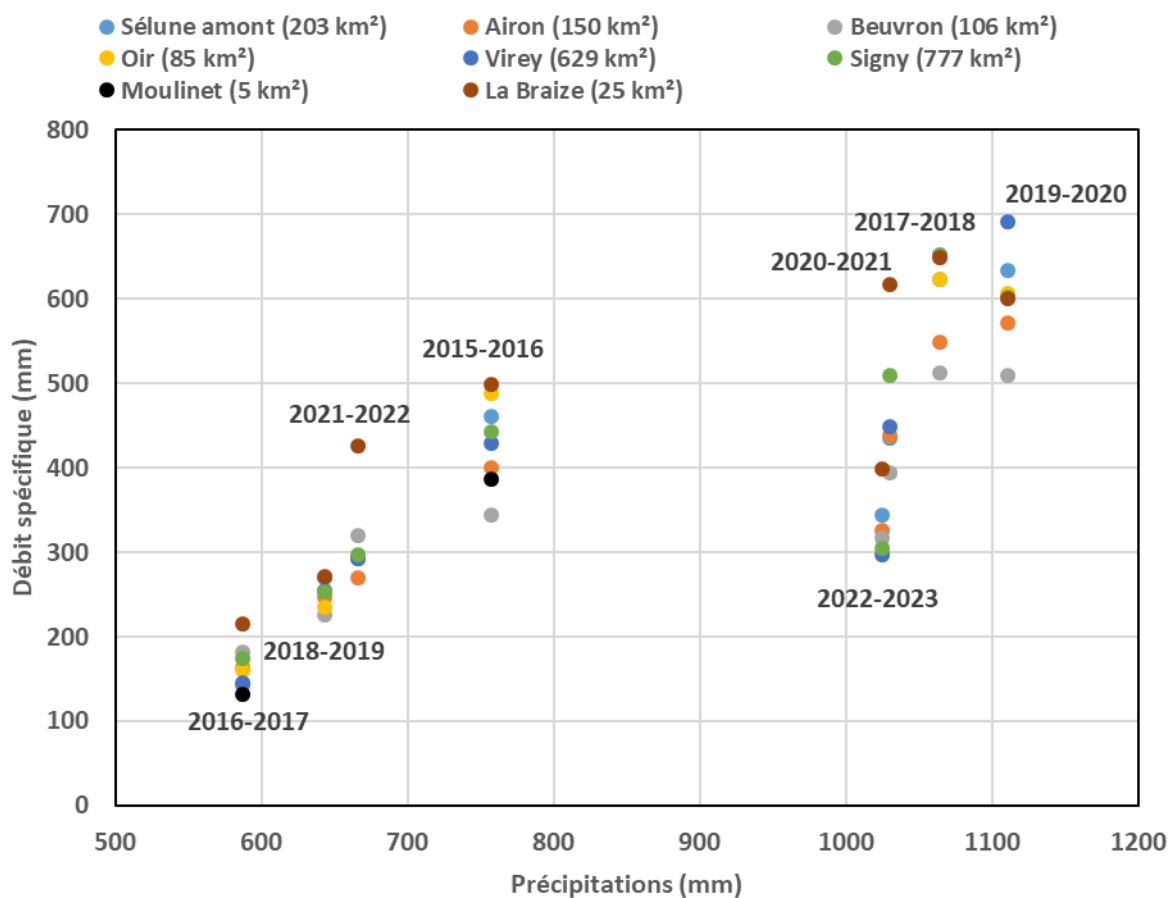


Figure 29 Débit spécifique en fonction des précipitations sur différents affluents de la Sélune, ainsi que sur les 3 stations de la Sélune elle-même. La Braize est le seul affluent représenté qui n'est pas un de la Sélune. Les données proviennent de l'Hydro Portail (DREAL Normandie).

Virey représente 81% du flux d'eau de Signy, dans lequel l'Airon participe à hauteur de 35%. Tous les autres affluents qui sont situés entre Virey et Signy ne fournissent que 19% du flux d'eau. La contribution détaillée de chaque affluent est présentée en annexe (Annexe 9).

Comme l'Airon est l'affluent majoritaire de la Sélune, sa contribution chimique a été évaluée avec la méthodologie DWC, déjà utilisée pour Signy et Virey. Les flux de MES, phosphore total, orthophosphates et nitrates ont été calculés en se basant sur une fréquence de prélèvement de 30

jours (Tableau 6). Les autres éléments (silicates, chlorures, sulfates) sont suivis à des fréquences trop importantes pour que les estimations soient fiables.

Flux en T/an	MES		Phosphore total		PO4		NO3	
	Airon	Signy	Airon	Signy	Airon	Signy	Airon	Signy
2015-2016	1976 (+/-13%)	2887 (+/-29%)	5 (+/-17%)	17 (+/-18%)	6 (+/-27%)	16 (+/-15%)	2340 (+/-16%)	10594 (+/-11%)
2016-2017	483 (+/-13%)	543 (+/-16%)	3 (+/-17%)	5 (+/-18%)	5 (+/-27%)	4 (+/-15%)	878 (+/-16%)	3792 (+/-11%)
2017-2018	3873 (+/-13%)	12182 (+/-6%)	9 (+/-17%)	45 (+/-9%)	11 (+/-27%)	33 (+/-6%)	2991 (+/-16%)	15670 (+/-7%)
2018-2019	2729 (+/-13%)	2798 (+/-6%)	6 (+/-17%)	14 (+/-9%)	11 (+/-27%)	14 (+/-6%)	1161 (+/-16%)	5759 (+/-7%)
2019-2020	4030 (+/-13%)	13743 (+/-6%)	9 (+/-17%)	54 (+/-9%)	15 (+/-27%)	26 (+/-6%)	2835 (+/-16%)	13750 (+/-7%)
2020-2021	2738 (+/-13%)	8399 (+/-6%)	7 (+/-17%)	35 (+/-9%)	10 (+/-27%)	27 (+/-6%)	2238 (+/-16%)	12146 (+/-7%)
2021-2022	2142 (+/-13%)	13217 (+/-75%)	3 (+/-17%)	43 (+/-9%)	5 (+/-27%)	12 (+/-6%)	1455 (+/-16%)	7294 (+/-7%)
2022-2023	2635 (+/-13%)	23673 (+/-29%)	4 (+/-17%)	42 (+/-74%)	5 (+/-27%)	18 (+/-28%)	1578 (+/-16%)	7162 (+/-2%)

Tableau 6 Flux de MES, Phosphore total, Orthophosphates et Nitrates estimés pour l'Airon avec la méthode DWC. Les valeurs de flux de ces paramètres à Signy ont été ajoutées.

Jusqu'en 2018-2019, les flux de MES et de phosphore sont très proches entre les deux stations car ceux de Signy sont énormément réduits par la présence des barrages. En 2022-2023, la contribution de l'Airon aux flux de Signy représente 11% pour les MES et le phosphore total, 27% pour le PO4 et 22% pour le NO3. Les flux de cet affluent principal restent minoritaires par rapport à ceux de Signy ou Virey. Les autres affluents étant encore plus petits que l'Airon, on peut imaginer que leurs contributions aux flux de Signy sont minimes.

8) Cartographie des dépôts sédiments en aval de la retenue de la Roche-Qui-Boit

Les 4 sites se répartissent sur un linéaire allant de l'ancien barrage de la Roche-Qui-Boit à la station de Signy, le site 1 étant à 500 m du barrage et le site 4 à 4,3 km (Figure 9). Les sites 1 et 4 sont considérés comme linéaires, avec des indices de sinuosité (distance curviligne / distance entre extrémités) de 1. Les sites 2 et 3 sont plus sinueux avec des indices respectivement de 1,2 et 1,1.

Les différences d'aire, de hauteur, de volume total et de volume spécifique entre les 2 campagnes ont été calculés pour les 4 sites (Tableau 7). Le détail des valeurs des aires, hauteurs et volumes de chaque site pour les 2 campagnes est disponible en annexe (Annexe 10). Les résultats mettent en évidence une réduction des dépôts sur l'ensemble des sites. Les volumes spécifiques montrent que cette diminution est moindre pour les sites 1 et 2 avec respectivement -18% et -9%. L'érosion semble principalement latérale avec une baisse générale des aires en moyenne de -34% entre 2022 et 2023. L'évolution verticale des banquettes est moins évidente, avec un enrichissement pour les sites 1 et 2 et un appauvrissement aux sites 3 et 4. Les banquettes des sites 1 et 2 étaient majoritairement végétalisées lors des 2 campagnes à l'inverse de celles des sites 3 et 4 qui étaient principalement nues. On peut supposer que cette végétation ralentit les écoulements ce qui limite leur pouvoir érosif et favorise les dépôts de particules en période d'immersion (crues).

Site	Différence Campagne 2 - Campagne 1							
	Aire totale		Hauteur moyenne		Volume total		Volume spécifique	
	m ²	%	m	%	m ³	%	m ³ /m	%
1	-103,9	-44,8%	0,2	40,4%	-23,2	-22,5%	-0,2	-18,3%
2	-198,6	-23,1%	0,1	21,6%	-30,2	-6,5%	-0,1	-8,9%
3	-194,7	-44,6%	-0,2	-46,0%	-99,8	-70,1%	-0,3	-29,3%
4	-148,7	-23,0%	-0,2	-37,6%	-172,4	-52,0%	-0,5	-45,0%

Tableau 7 Différences d'aire, de hauteur, de volume et de volume spécifique entre la campagne 2 et la campagne 1, ainsi que les incertitudes associées.

Conclusions

Cette année 2022-2023 marque réellement le début de la phase de restauration de la Sélune, avec la continuité amont/aval effective pour la première fois sur une année hydrologique complète. De nombreux paramètres avaient commencé à évoluer à l'aval depuis la phase de travaux et ont montré un équilibrage rapide avec l'amont cette année.

C'est le cas de la température de l'eau qui était réchauffée et avait des variations lissées par la présence des barrages. Depuis leur effacement, les eaux se sont rafraîchies pour atteindre une température proche de celle de l'amont et elles ont dorénavant des variations journalières bien marquées. Il en est de même pour la dynamique de la plupart des solutés chimiques suivis. Les pics de dilution, absents à l'aval avec les barrages, sont aujourd'hui visibles et le signal se superpose entre les deux stations.

En revanche les flux de sédiments fins et de phosphore, libérés en grandes quantités lors de la vidange de la retenue de la Roche-Qui-Boit, sont toujours inégaux avec des valeurs avals bien supérieures à l'amont. Le temps nécessaire pour le rééquilibrage de ces flux est difficile à estimer car une partie de ces sédiments s'est déposée le long des berges et reste mobilisable lors des crues. Les fortes pluies de ce début d'année 2023-2024 vont potentiellement accélérer le curage de ces dépôts.

Concernant le transport des particules plus grossières, celui des sables semble avoir repris en aval depuis la disparition du barrage de la RQB avec un signal observé en été/automne 2022. Comme lors des années précédentes, la mobilité des galets est nulle ce qui confirme la faible énergie de la Sélune.

La variabilité spatiale et temporelle de la chimie de l'eau est faible entre les affluents et la Sélune, en lien avec une occupation du sol similaire sur l'ensemble du bassin versant. Quelques affluents présentent tout de même des spécificités mais qui ont peu d'impacts sur le fleuve car leur contribution au flux d'eau reste minoritaire.

Perspectives

Tout d'abord, comme cette phase de post-arasement vient juste de commencer, il est important de continuer à suivre les différents paramètres physico-chimiques de l'eau. Ils seront essentiels pour comprendre les transformations futures de la rivière et évaluer les temps de réponse du système suite aux travaux.

Les dépôts de sédiments qui ont fait suite à l'ouverture du barrage de la RQB ont été suivis en 2022 et 2023. Une campagne supplémentaire en 2024 est envisagée pour confirmer l'évolution de leur morphologie. En effet, des questions se posent sur le rôle de la végétation dans le maintien ou non de ces banquettes.

L'axe de travail porté par L. Jeanneau (*Géosciences Rennes*) pour identifier les sources de MES a commencé et les premiers résultats ont été présentés dans ce rapport. Mais seulement une partie des

données acquises a été exploitée et une analyse plus approfondie doit être faite. Des réflexions doivent aussi être menées sur le protocole d'échantillonnage pour limiter la contamination microbienne.

Grâce à l'observatoire, les chroniques de données deviennent importantes et des réflexions à de plus grandes échelles peuvent être envisagées. Dans le contexte de recolonisation du fleuve par le saumon, des questions sur l'évolution de la température de l'eau se posent. Malgré le rafraîchissement des eaux depuis la fin des travaux, les conditions de température resteront-elles viables pour cette espèce avec le changement climatique ? Les têtes de bassins, maintenant accessibles, pourront-elles fournir des zones « fraîches » et palier au réchauffement attendu ?

La qualité de l'eau n'est maintenant plus impactée par la présence des barrages et semble s'améliorer. Mais des questions se posent sur les liens entre l'agriculture et la chimie du fleuve. L'étude de l'évolution des pratiques agricoles et de l'occupation des sols sur l'ensemble du bassin versant (et pas seulement sur les affluents étudiés), et sur plusieurs années/décennies, pourrait permettre de mieux comprendre ces interactions.

Références

- Ba, M.M., Heyman, J., Rivière, A., Soulayrol, M.O., Stubbe, V., Meric, F., Kergosien, B., Rolland, P., Petton, C., Lavenant, N., Kermarrec, J.J., Crave, A., 2023. 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* 46, 108837.
- Beauchamp, A., 2018. Impact des aménagements hydrauliques sur les systèmes fluviaux bas-normands depuis 2000 ans : approche géomorphologique et géoarchéologique. *Géographie. Normandie Université, Français*. [\(NNT : 2018NORMC024\)](#). [\(tel-02073234\)](#)
- Bohlin, H.S., Mörth, C.M., Holm, N.G., 2006. Point source influences on the carbon and nitrogen geochemistry of sediments in the Stockholm inner archipelago, Sweden. *Sci Total Environ* 366, 337-349.
- Dupas, R., Minaudo, C., Abbott, B., 2019. Stability of spatial patterns in water chemistry across temperate ecoregions. *Environmental Research Letters*.
- Fovet, O., Meric, F., Crave, A., Cador, J.-M., Rollet, A.-J., 2023. Early assessment of effects of dam removal on abiotic fluxes of the Selune River, France. *Frontiers in Environmental Science* 11.
- Fovet, O., Ndom, M., Crave, A., Pannard, A., 2020. Influence of dams on river water-quality signatures at event and seasonal scales: The Sélune River (France) case study. *River Research and Applications* 36, 1267-1278.
- IDRA Environnement : Proulhac, N., Fauconnier, N., Marrec, A., 2012. Effacement des barrages de la Sélune, gestion des sédiments contaminée et plan de gestion - Phase 1 : synthèse des données et état des lieux du site.
- IDRA Environnement : Proulhac, N., Marrec, A., 2011. Effacement des barrages de la Sélune, gestion des sédiments contaminés et plan de gestion - Synthèse des résultats d'analyse.
- Le Gonidec, C., Grimaldi, C., Crave, A., Rollet, A.-J., Beauchamp, A., Lespez, L., 2015. Rapport d'étape annuel 2014 - Programme Sélune Phase pré-arasement.
- Le Gonidec, C., Grimaldi, C., Fovet, O., Vergnaud, V., 2016. Programme Sélune - Phase pré-arasement - Rapport bilan 2013-2015.
- Littlewood, I.G., 1995. Hydrological regimes, sampling strategies, and assessment of errors in mass load estimates for United Kingdom rivers. *Environment International* 21, 211-220.
- Martignac, F., Le Gonidec, C., Daroux, A., Guillard, J., Baglinière, J.L., Grimaldi, C., Crave, A., 2014. Rapport d'étape 2013 Programme Sélune AESN.
- Meric, F., Fovet, O., Crave, A., Rollet, A.-J., 2022. Programme Sélune - Phase Travaux d'arasement - Rapport bilan 2021-2022.
- Moatar, F., Birgand, F., Meybeck, M., Fauchoux, C., Raymond, S., 2008. Incertitudes sur les métriques de qualité des cours d'eau (médianes et quantiles de concentrations, flux, cas des nutriments) évaluées à partir de suivis discrets. *La Houille Blanche* 95, 68-76.

Moatar, F., Meybeck, M., 2007. Riverine fluxes of pollutants: Towards predictions of uncertainties by flux duration indicators. *Comptes Rendus Geoscience* 339, 367-382.

Moatar, F., Meybeck, M., Raymond, S., Birgand, F., Curie, F., 2013. River flux uncertainties predicted by hydrological variability and riverine material behaviour. *Hydrological Processes* 27.

MTEs, 2023a. Hydro Portail : données publiques relatives à l'écoulement des cours d'eau. EauFrance, URL : <https://hydro.eaufrance.fr/>.

MTEs, 2023b. Naiades : Données sur la qualité des eaux de surface. EauFrance, URL : <https://naiades.eaufrance.fr/>.

Ndom, M., Fovet, O., Crave, A., Gilliet, N., 2018. Programme Sélune - Phase pré-arasement- Rapport bilan 2016-2017.

Ndom, M., Fovet, O., Crave, A., Rollet, A.-J., 2019. Programme Sélune - Phase pré-arasement - Rapport bilan 2017-2018.

QGIS.org, 2023. QGIS Geographic Information System. QGIS Association, URL : <http://www.qgis.org>.

R Core Team, 2023. R : A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna Austria, URL : <https://www.R-project.org/>.

Raymond, S., Moatar, F., Meybeck, M., Bustillo, V., 2013. Choosing methods for estimating dissolved and particulate riverine fluxes from monthly sampling. *Hydrological Sciences Journal* 58.

Stubbe, V., Fovet, O., Crave, A., Rollet, A.-J., 2022. Programme Sélune - Phase Travaux d'arasement - Rapport bilan 2019-2021.

Annexes

Incertitude (en %)		2015-2016	2016-2017	2017-2018	2018-2019	2019-2020	2020-2021	2021-2022	2022-2023
Virey	EQ-V1	12	14	24	21	22	28	34	41
	EQ-V2	10	15	21	19	19	25	27	35
	EQ-V3	17	22	25	22	22	29	35	42
	EQ-V4	21	26	20	19	19	23	27	30
	EQ-V5	17	22	17	15	15	18	22	24
	EQ-V6	17	23	17	16	16	19	23	25
	EQ-V7	15	19	15	14	14	17	20	22
	EQ-S8	22	25	21	20	20	23	26	28
	EQ-S8 bis	5	5	5	5	5	5	5	5
Signy	EQ-S1	39	75						
	EQ-S2	17	21						
	EQ-S3			21	20	14	16	16	
	EQ-S4			7	10	7	8	8	
	EQ-S5			12	15	10	12	12	
	EQ-S6			10	13	9	10	10	
	EQ-S7			9	12	9	10	10	
	EQ-S8								32
	EQ-S8 bis	29	16	6	6	6	6	6	8

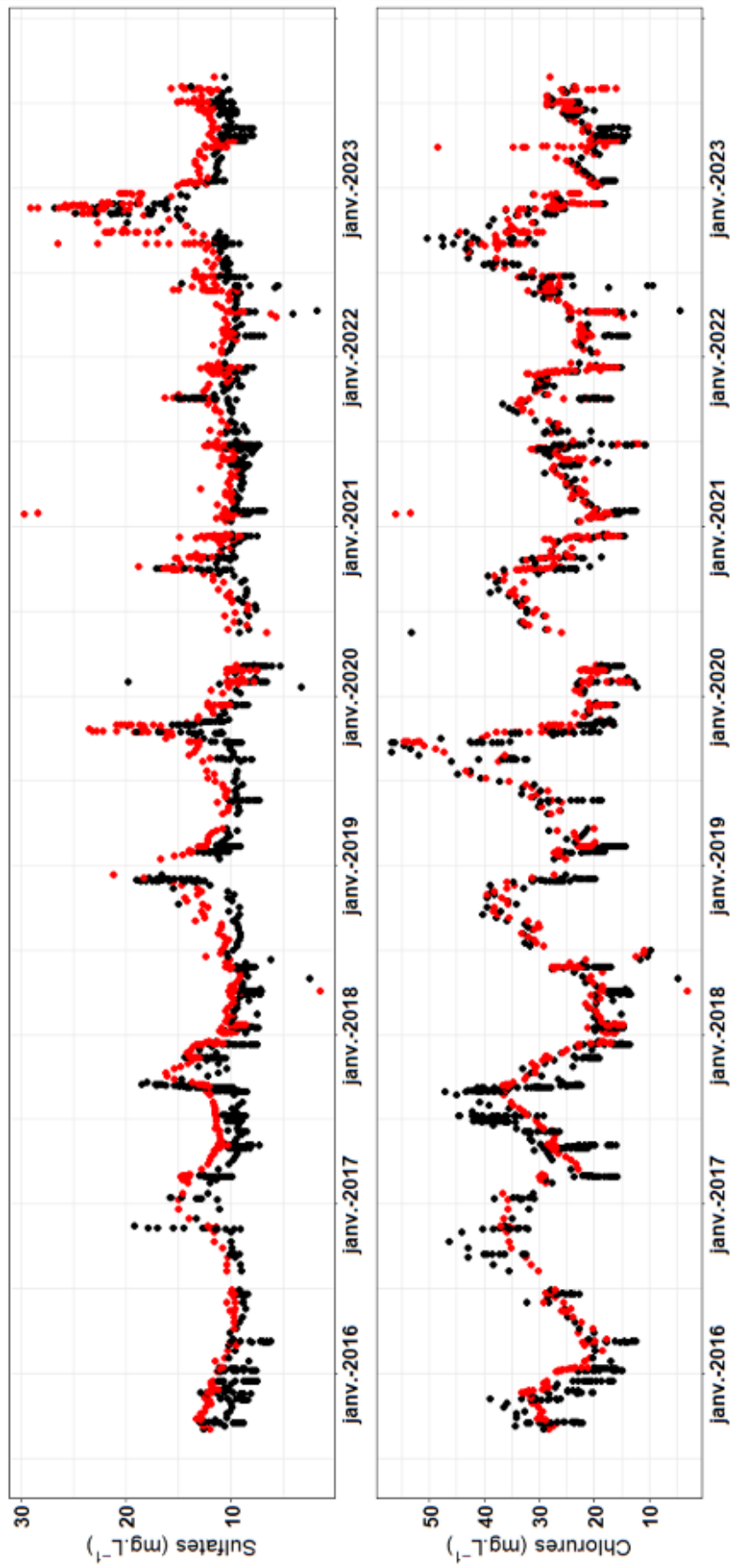
Annexe 1 Incertitudes des équations MES-Turbidité calculées chaque année à Virey et à Signy. EQ-S8 sont les équations déterminées avec les données les plus récentes. EQ-S8 bis sont les modèles forcés par 0 déterminés cette année. Les cases vertes correspondent aux valeurs les plus basses par année. Pour Signy, les équations ont été calculées à partir des données d'une même période (Pré-travaux, Travaux et Post-travaux).

Année	Virey			Signy			Abattement (%)	Pluie (mm)
	Flux total (T/an)	Flux (T/km ² /an)	Incertitude %	Flux total (T/an)	Flux (T/km ² /an)	Incertitude %		
2015-2016	16481	26,2	5	2887	3,7	29	73	757
2016-2017	4408	7,0	5	543	0,7	16	71	587
2017-2018	28669	45,6	5	12182	15,7	6	72	1064
2018-2019	12846	20,4	5	2798	3,6	6	84	643
2019-2020	34369	54,6	5	13743	17,7	6	73	1111
2020-2021	16078	25,6	5	8399	10,8	6	66	1030
1er sept 2021 - 15 mai 2022	5822	9,3	5	4422	5,7	6	58	543
15 mai 2022 - 1er sept 2022	1704	2,7	5	8795	11,3	75	////	123
2022-2023	6306	10,0	5	23673	30,5	8	////	1025

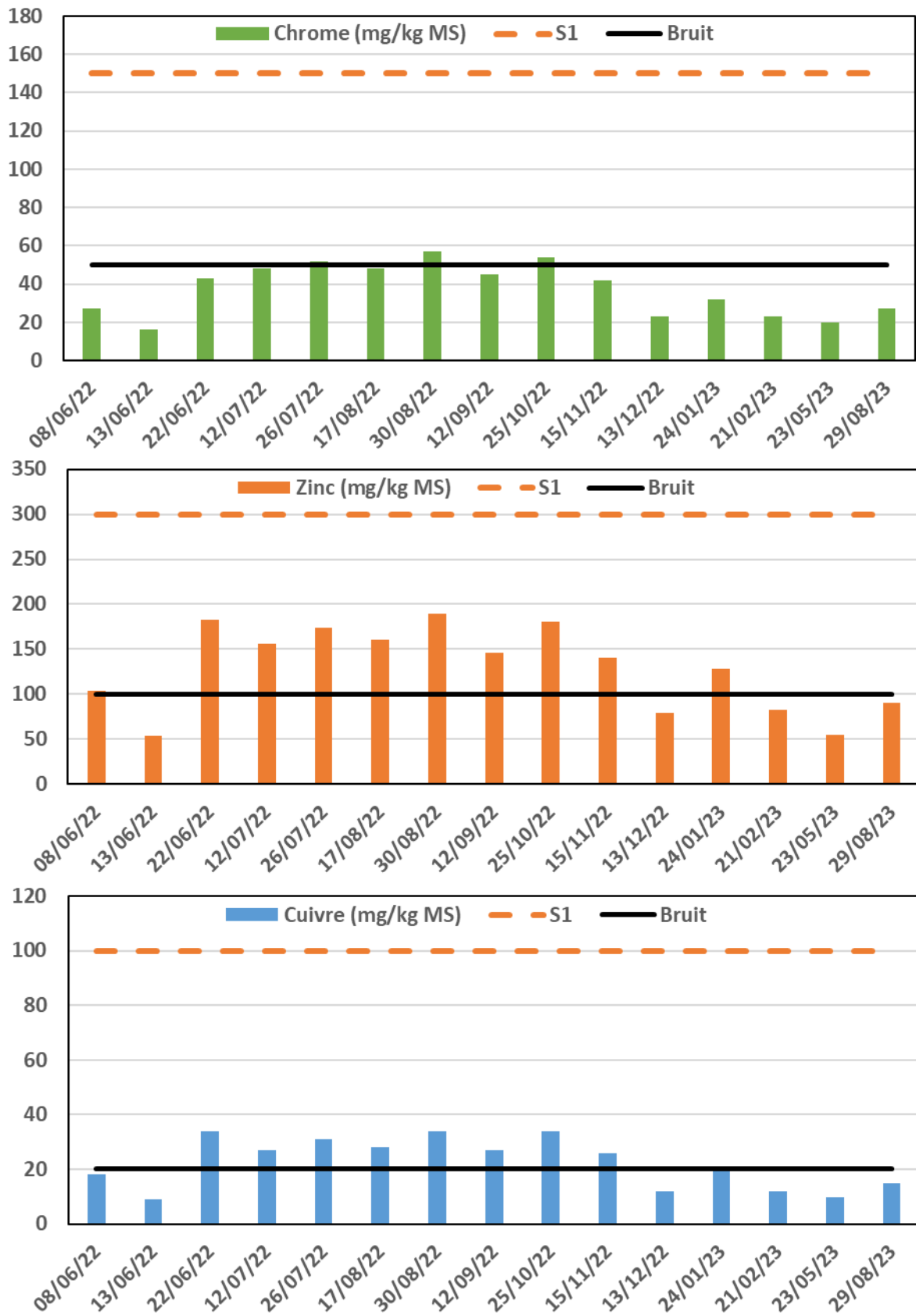
Annexe 2 Récapitulatif des flux totaux et spécifique de MES aux stations amont et aval.

Virey	2015-2016		2016-2017		2017-2018		2018-2019		2019-2020		2020-2021		2021-2022		2022-2023	
	Flux (T/an)	Imprécision (%)	Flux (T/an)	Imprécision (%)	Flux (T/an)	Imprécision (%)	Flux (T/an)	Imprécision (%)	Flux (T/an)	Imprécision (%)	Flux (T/an)	Imprécision (%)	Flux (T/an)	Imprécision (%)	Flux (T/an)	Imprécision (%)
Ptotal	27	11	8	11	63	11	12	11	52	11	32	11	34	11	25	11
P-PO4	18	7	6	7	35	7	9	7	34	7	19	7	9	7	16	7
N-NO3	8487	7	2810	7	12030	7	5012	7	12149	7	8580	7	5544	7	5353	7
SO4	2665	7	972	7	3820	7	1754	7	4253	7	2776	7	1809	7	2278	7
Si	1994	6	605	6	2338	6	1037	6	2566	6	1675	6	1219	6	1252	6
Cl	6292	4	2810	4	7730	4	4421	4	9246	4	6197	4	4214	4	4090	4
Signy	2015-2016		2016-2017		2017-2018		2018-2019		2019-2020		2020-2021		2021-2022		2022-2023	
	Flux (T/an)	Imprécision (%)	Flux (T/an)	Imprécision (%)	Flux (T/an)	Imprécision (%)	Flux (T/an)	Imprécision (%)	Flux (T/an)	Imprécision (%)	Flux (T/an)	Imprécision (%)	Flux (T/an)	Imprécision (%)	Flux (T/an)	Imprécision (%)
Ptotal	17	18	5	18	45	9	14	9	54	9	35	9	43	9	42	74
P-PO4	16	15	4	15	33	6	14	6	26	6	27	6	12	6	18	28
N-NO3	10594	11	3792	11	15670	7	5759	7	13750	7	12146	7	7294	7	7162	2
SO4	3638	6	1659	6	5418	5	2250	5	5270	5	4337	5	2567	5	3246	12
Si	2419	13	714	13	3078	6	1198	6	2874	6	2437	6	1535	6	1665	3
Cl	8177	4	4054	4	10598	3	5105	3	10152	3	8855	3	5511	3	5443	1

Annexe 3 Récapitulatif des flux annuels en éléments dissous à Virey et Signy.

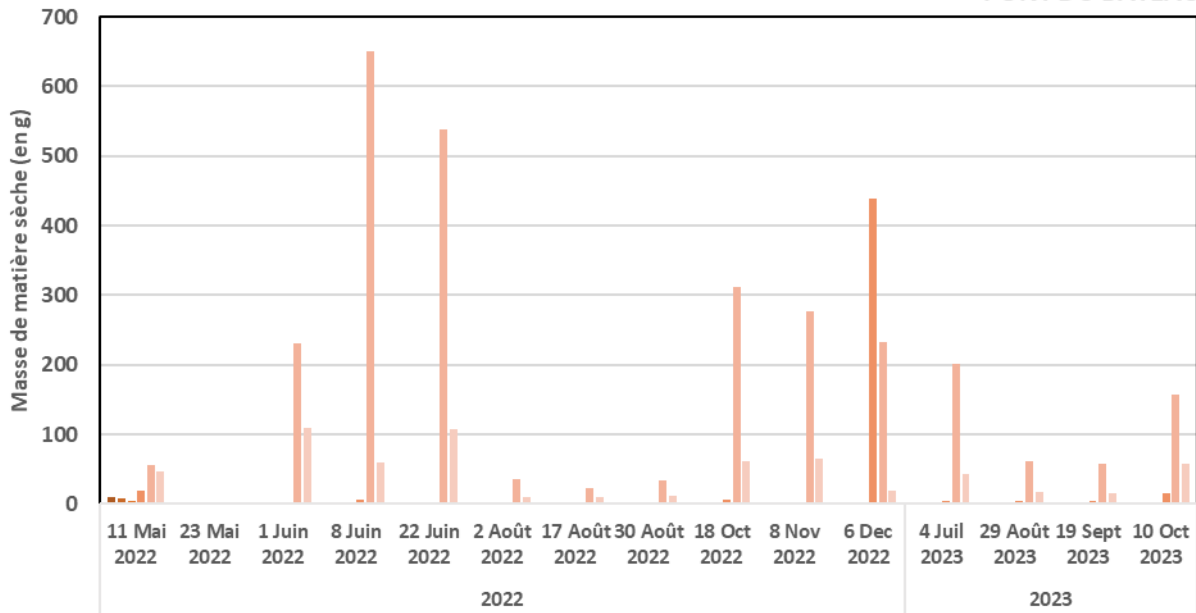


Annexe 4 Chroniques des concentrations en sulfates et chlorures depuis le 1^{er} septembre 2015 jusqu'au 1^{er} septembre 2023 à Virey (noir) et Signy (rouge). On peut voir que le signal aval est plus lisse que celui amont durant les premières années.

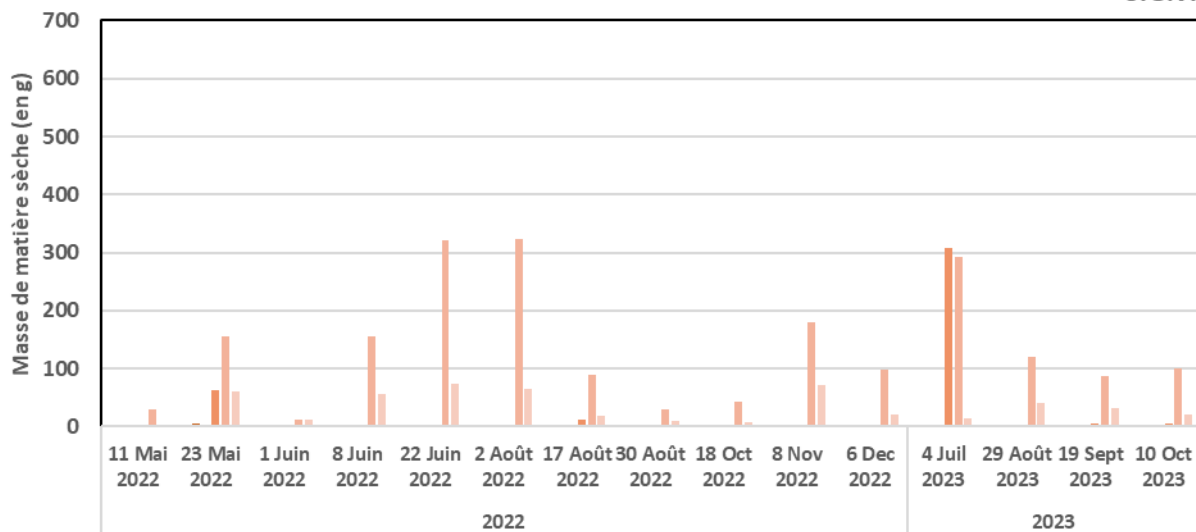


Annexe 5 Concentrations en Chrome, Zinc et Cuivre dans les sédiments de berge prélevés à Signy depuis la vidange de la retenue du barrage de la RQB. Les seuils S1 et Bruit proviennent de l'étude IDRA de 2011 sur la gestion des sédiments contaminés.

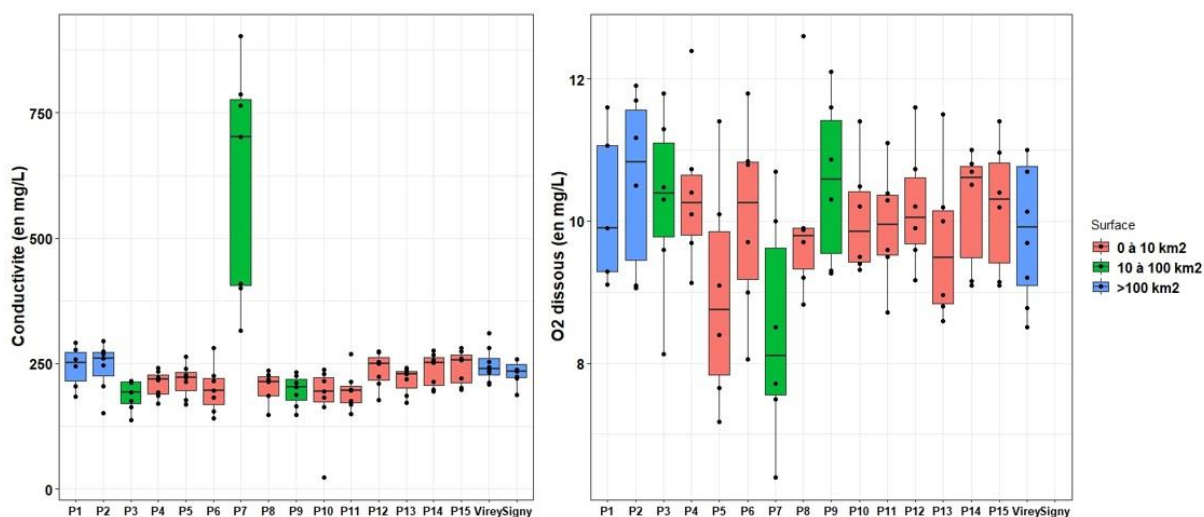
PONT DU BATEAU



SIGNY



Annexe 6 Evolution granulométrique des particules en suspension au pont du bateau et à Signy depuis mai 2022.



Annexe 7 Conductivité électrique et concentrations en oxygène dissous des affluents lors des différentes campagnes effectuées.

Par station	Stabilité des paramètres (CV < 30%)									
	MES	Ptot	PO4	Cl	NO3	SO4	Silice	Cond	Temp	O2
Airon amont STEP (P1)	57,3	24,8	35,6	26,1	11,1	17,5	4,4	17,1	26,3	10,9
Airon aval STEP (P2)	54,5	19,2	49,1	28,9	10,6	14,7	5,4	20,2	31,4	11,9
Virey	63,5	28,6	49,9	23,9	11,1	16,6	25,1	15,8	30,4	13,7
Vauroux (P3)	47,3	167,5	61,6	5,1	10,8	23,9	9,5	16,0	23,8	12,7
Pont de la république (P4)	37,0	128,5	45,7	4,9	8,5	20,6	2,5	12,7	15,3	10,7
Foucras (P5)	65,4	73,8	87,1	15,9	30,0	6,3	12,3	15,5	28,1	17,6
Lecusset (P6)	111,4	56,3	66,6	5,7	7,5	8,7	5,6	23,8	24,2	13,6
Yvrande (P7)	34,2	58,8	85,2	38,9	29,8	38,7	5,8	37,8	19,7	19,0
La Bouffetière les Biards (P8)	27,8	48,3	85,8	3,9	10,2	20,4	6,6	15,2	18,4	13,4
Lair (P9)	69,5	18,1	38,5	3,3	8,1	19,5	8,9	16,0	31,1	11,2
Isolant RD (P10)	48,7	23,9	29,1	3,5	7,9	22,5	8,3	41,3	17,8	8,1
Isolant RG (P11)	118,6	25,6	20,2	2,7	7,4	14,2	6,5	19,8	16,2	8,5
La fiéffé au roy Vezins (P12)	34,5	36,3	32,4	4,0	7,2	4,9	5,6	15,0	17,7	8,5
RQB amont (P13)	53,2	23,9	29,4	4,2	11,2	8,7	6,5	12,5	27,1	11,3
Dougerus (P14)	61,2	17,9	34,2	3,4	14,9	11,8	4,5	14,4	19,6	8,2
Gauberdrière (P15)	73,8	62,6	24,2	5,5	6,5	8,5	2,7	14,3	21,2	9,1
Signy	58,2	37,9	59,1	18,8	9,2	18,7	5,7	12,1	32,8	NA
Par campagne	MES	Ptot	PO4	Cl	NO3	SO4	Silice	Cond	Temp	O2
22/05/2019	97,1	58,0	42,0	70,6	19,0	63,1	24,7	NA	NA	NA
19/11/2019	82,8	88,4	165,0	38,2	23,6	30,8	11,1	24,6	11,3	4,9
22/07/2020	60,8	52,7	88,5	82,7	26,6	69,8	15,2	60,1	13,1	6,9
14/09/2021	72,8	139,6	201,4	68,7	21,5	50,5	11,6	42,9	7,4	6,6
24/03/2022	75,5	58,0	47,6	29,0	17,0	34,8	12,0	18,9	15,4	5,8
11/10/2022	87,9	184,0	243,3	80,3	28,5	72,2	11,0	59,4	10,5	11,8
21/03/2023	103,3	99,7	185,4	41,1	19,2	32,1	13,3	32,0	9,4	NA
27/09/2023	123,8	133,2	235,9	9,8	24,5	43,8	9,5	54,7	5,8	9,6

Annexe 8 Coefficients de variations de différents paramètres physico-chimiques suivis sur les affluents par station et par campagne. Les valeurs en rouges sont celles qui dépassent le seuil de stabilité fixée (30%).

Station	Point de prélèvement	BV (km ²)	Contribution (%)
Airon Aval STEP	P2	274,06	35,3
Virey	Virey	629,00	81,0
Le Vauroux	P3	10,79	1,4
Pont de la république	P4	3,51	0,5
Les Foucrais	P5	1,21	0,2
Lecusset	P6	1,28	0,2
L'Yvrande	P7	16,52	2,1
La Bouffetière les Biards	P8	1,61	0,2
Le Lair (Pont Martin)	P9	50,35	6,5
L'isolant RD	P10	2,89	0,4
L'isolant RG	P11	2,15	0,3
La fiéffé au roy Vezins	P12	1,95	0,3
RQB amont	P13	1,58	0,2
Route Dougerus le fief	P14	4,32	0,6
Route de Gauberdière	P15	2,23	0,3
<i>Bassins non mesurés</i>		47,62	6,1
Signy	Signy	777,00	100,0

Annexe 9 Estimation des contributions de chaque affluent au flux d'eau de Signy, basée sur le rapport entre la surface du bassin versant de l'affluent avec celle de Signy.

Site	Campagne 2022				Campagne 2023			
	Aire totale (m ²)	Hauteur moyenne (m)	Volume (m ³)	Volume spécifique (m ³ /m)	Aire totale (m ²)	Hauteur moyenne (m)	Volume (m ³)	Volume spécifique (m ³ /m)
1	231,97	0,44	103,14	0,81	128,04	0,62	79,93	0,63
2	859,84	0,54	463,70	1,37	661,19	0,66	433,54	1,28
3	436,44	0,33	142,33	0,42	241,77	0,18	42,56	0,13
4	646,03	0,51	331,70	0,87	497,32	0,32	159,33	0,42

Annexe 10 Aire, hauteur, volume et volume spécifique de chaque site suivi par campagne.