



HAL
open science

Dynamique fluviale (Volet 1) : Flux hydriques, sédimentaires et chimiques [Programme Sélune - Phase travaux d'arasement. Rapport bilan 2019-2021]

Vincent Stubbe, Ophélie Fovet, Alain Crave, Anne-Julia Rollet

► To cite this version:

Vincent Stubbe, Ophélie Fovet, Alain Crave, Anne-Julia Rollet. Dynamique fluviale (Volet 1) : Flux hydriques, sédimentaires et chimiques [Programme Sélune - Phase travaux d'arasement. Rapport bilan 2019-2021]. INRAE. 2022. hal-03960468

HAL Id: hal-03960468

<https://hal.science/hal-03960468>

Submitted on 27 Jan 2023

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



eau
seine
NORMANDIE

INRAE

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



Programme Sélune

Phase « Travaux d'arasement »

Rapport bilan 2019-2021

Dynamique fluviale

Volet 1

Flux hydriques, sédimentaires et chimiques

Auteurs

Vincent STUBBE¹, Ophélie FOVET¹, Alain CRAVE², 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

Janvier 2022

Table des matières

1. Introduction.....	6
1.1. Contexte et objectifs	6
1.2. Rappel sur la chronologie du suivi dans la thématique « Dynamique fluviale ».	6
1.3. Réalisations 2019-2021 et contenu du rapport	7
2. Méthodes	8
2.1. Dispositifs de suivi	8
2.1.1. Localisation des stations	8
2.1.2. Equipement des stations.....	9
2.1.3. Protocole de prélèvement et analyses	10
2.1.4. Suivi de la mobilité de la charge de fond.....	12
2.1.5. Mise en place de pièges à sédiments et échantillonnage granulométrique	15
2.2. Traitement des données	17
2.3. Methodes de calcul des flux	17
2.3.1. Calcul des flux annuels sédimentaires fins	17
2.3.2. Calcul des flux annuels de nutriments	19
2.3.3. Estimation de l'incertitude sur le flux (méthode DWC).....	19
2.4 Campagnes physico-chimiques sur les affluents.....	20
3. Résultats.....	21
3.1. Dynamique des paramètres hydrologiques	22
3.1.1. Hydrologie	22
3.2.2 Température de l'eau	24
3.2. Dynamique sédimentaire	25
3.3. Dynamique chimique.....	28
3.4 Suivi de la charge de fond	31
3.5. Chimie des affluents	34
Ce qu'il faut retenir en résumé des observations géomorphologiques et des flux hydrologiques, sédimentaires et chimiques.....	37
Conclusion	38
Annexes.....	39
Références.....	44

Table des illustrations

Figure 1 : Localisation des stations de suivi multi-paramètres sur le bassin versant de la Sélune (exutoire considéré : station de Signy)	8
Figure 2 : Photo de la station aval (Station INRAE)	9
Figure 3 : Station de Virey, à l'amont (EDF-INRAE), à gauche : le préleveur installé par INRAE, À droite : les sondes et le dispositif de suivi installés par EDF	10
Figure 4 : A gauche, préleveur réfrigéré à la station aval (pont de Signy), à droite préleveur non réfrigéré sur la station amont (pont de Virey).	11
Figure 5 : Préparation au laboratoire des échantillons d'eau prélevée en vue des différentes analyses.	12
Figure 6 : Photographie de transpondeurs RFID placés dans des sédiments grossiers.....	12
Figure 7 : Localisation du site de suivi de la charge grossière en aval du pont de Bateau	14
Figure 8 : Localisation du site de suivi de la charge grossière au seuil de Virey.....	14
Figure 9 : Chronique de débit de la Sélune à Saint Aubin de Terregate (banque Hydro) et point de relevé des position des sédiments.....	15
Figure 10 : Dispositif expérimental de piège à sédiment (avant la pose à gauche, après 14 jours à droite)	15
Figure 11 : Schéma fonctionnel vu du dessus des pièges à sédiments.....	16
Figure 12 : Localisation des pièges à sédiments, des mouilles profondes et des points de prélèvement par drague sur la Sélune	16
Figure 13 : Relation entre la turbidité et la concentration de MES sur la station amont de Virey (Eq.V6). Le grisé donne l'intervalle de confiance à 95%.	18
Figure 14 : Relation entre la turbidité et la concentration de MES sur la station aval de	18
Figure 15 : Carte des points de prélèvements sur les bassins versants des affluents de la Sélune.....	21
Figure 16 : Lame d'eau écoulee à l'amont et à l'aval du barrage (respectivement Virey et Signy) en fonction des précipitations	23
Figure 17 : Distribution en boxplot des débits spécifiques journaliers des stations amont (Virey) et aval (Signy) par année hydrologique.....	23
Figure 18 : Fréquences des débits spécifiques sur les stations amont et aval sur les périodes de pré travaux et de travaux	24
Figure 19 : Distribution en boxplot des températures mesurées sur les stations et de l'amplitude thermique hebdomadaire.....	24
Figure 20 : Distribution en boxplots des concentrations en MES (mg/L) par année et selon le type d'écoulement	25
Figure 21 : Distribution normale des concentrations en MES en écoulement de base (HC) et en crue. NB : les échelles sont différentes selon les graphiques.	26
Figure 22 : Précipitations et flux de matière en suspension sur les stations amont et aval.....	27
Figure 23 : Estimation des flux de sédiments en fonction des précipitations ($R^2_{Virey}=0.96$; $R^2_{Signy}=0.92$)	28
Figure 24 : Distribution en boxplots des concentrations en phosphore total des différentes années hydrologiques étudiées et selon le type d'écoulement (NB : Les échelles différent). .	28
Figure 25 : Distribution en boxplots des concentrations en phosphate des différentes années hydrologiques étudiées et selon le type d'écoulement.	29
Figure 26 : Distribution en boxplots des concentrations en nitrates des différentes années hydrologiques selon le type d'écoulement.	29

Figure 27 : Distribution en boxplots des concentrations en nitrites des différentes années hydrologiques et selon le type d'écoulement.	30
Figure 28 : Distribution en boxplots des rapports Carbone/Azote mesurés sur les matières en suspension des différentes années hydrologiques et selon le type d'écoulement	30
Figure 29 : Cartographie des traceurs sur le site de Virey (site 1) en 2021	32
Figure 30 : Cartographie des traceurs en aval du pont de Bateau (sites 2 et 3)	32
Figure 31 : Taux des particules mobiles (A), distances maximales et distances moyennes parcourues par les traceurs mobiles sur les sites 1,2 et 3 entre 2016 et 2021	33
Figure 32 : Débits moyens journaliers à la station de Saint Aubin de Terregatte entre octobre 2016 et octobre 2021 (source : Banque Hydro).	33
Figure 33 : Concentration des affluents en éléments dissous et particuliers aux différentes dates de prélèvement.	35
Figure 34 : Matrice de corrélation et coefficients de corrélation entre les différents paramètres des bassins versants des affluents. Seules les corrélations dont la valeur absolue du coefficient est supérieure à 0,6 ont été retenues.	36

Glossaire

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 2020 correspond à la période du 1^{er} septembre 2019 au 31 août 2020.

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.

RQB : Abréviation utilisée pour désigner le site de la Roche-Qui-Boit

1. Introduction

1.1. Contexte et objectifs

Ce rapport s'inscrit dans le cadre du programme scientifique du suivi de l'arasement des barrages sur la Sélune (<https://programme-selune.com/fr/>), financé par l'agence de l'Eau Seine-Normandie, et débuté en 2012. Suite à la crise sanitaire, le rapport 2019-2020 n'a pas pu être rédigé. Par conséquent le présent rapport présente les résultats des années hydrologiques 2019-2020 et 2020-2021. Une convention entre INRAE, l'AESN, l'OFB, la FNPF, l'Etat et EDF donne un cadrage pour ces travaux jusqu'en 2027. Ils s'organisent en trois 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).

Le présent rapport concerne la thématique « Dynamique fluviale » qui implique 3 Unités Mixtes de Recherche : SAS (Rennes), Géosciences Rennes, et LETG (Rennes, Caen).

Les barrages constituent une barrière physique affectant diversement les flux hydriques, sédimentaires et chimiques, avec des conséquences également sur la géomorphologie du fleuve. L'objectif du suivi est de connaître l'influence des barrages sur les flux chimiques et sédimentaires ainsi que sur la dynamique géomorphologique, avant, pendant et après les travaux de vidange et d'ouverture des barrages. Cette connaissance passe par une quantification des flux mesurés, mais aussi par la compréhension de leur dynamique temporelle.

1.2. Rappel sur la 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 pré-arasement 2012-2017 : Lors de cette phase le protocole de suivi a été mis en place et l'état initial de la Sélune a pu être dressé.
- La phase de travaux 2017-2022 : C'est la période de gestion sédimentaire et de démantèlement des barrages. Cette phase est une phase transitoire car le remaniement artificiel de sédiments y est important (dragage). Entre le premier et le second arasement, le barrage de la Roche-Qui-Boit fait toujours obstacle à la continuité sédimentaire notamment.
- La phase post-arasement 2023-2027 : Cette phase permettra le suivi de la restauration des milieux, leur retour à l'équilibre et d'analyser finalement l'impact de l'opération de restauration sur la géomorphologie et les exports de sédiments fins et d'éléments majeurs par le fleuve.

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 (Rapport d'étape 2013, Janv. 2014). L'année 2014 a permis de recueillir les premiers résultats de la phase de suivi pré-arasement du programme (Rapport d'étape 2014, Février 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 (Rapport d'étape 2015, Fév. 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'Unité Mixte de Recherche 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 (Avr. 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 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 (Rapport 2018, Mar. 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 vidange et de gestion sédimentaire ont démarré en septembre 2020 sur le barrage de la Roche Qui Boit situé en aval du site de Vezins. Dans le contexte de la crise sanitaire et suite à des difficultés de gestion sédimentaire, son démantèlement initialement prévu au printemps 2021 a été repoussé à l'automne 2021 puis au printemps 2022.

1.3. Réalisations 2019-2021 et contenu du rapport

Le financement de la thématique « Dynamique fluviale » permet actuellement :

- L'embauche d'un ingénieur d'étude, V. Stubbe a remplacé M. Ndom en mars 2021 (avec un tuilage de 2 semaines) 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 le Fleuve Sélune. Il participe enfin à des campagnes de terrain diverses (échantillonnage de sédiments, prélèvements synoptiques des affluents, granulométrie...)
- La maintenance et les éventuelles réparations ou renouvellements des instruments composant les stations ou utilisés pour du traçage (pit-tags)
- Les frais d'électricité, de télécommunication, et de missions de terrain associés à la gestion des stations
- Les analyses d'échantillons en laboratoire (chimie, granulométrie)

Le présent rapport propose un bilan comparatif des résultats des 6 années hydrologiques pour le volet flux hydriques, sédimentaires et chimiques sur la période 2015-2021. En raison de la crise sanitaire, l'échantillonnage et l'entretien des stations n'a pas pu être assuré lors du premier confinement, de mi-mars à mi-mai 2020, mais s'est poursuivi normalement lors des re-confinements partiels de novembre 2020 et de janvier 2021.

Les résultats exposés en détail dans ce rapport comparent les paramètres amont et aval acquis respectivement sur les stations de Virey et Signy sous l'influence du seul barrage de la Roche-Qui-Boit à partir de l'année 2019-2020.

2. Méthodes

2.1. Dispositifs de suivi

2.1.1. Localisation des stations

Le suivi des flux est basé sur plusieurs stations (*Figure 1*). La station amont de Virey, co-instrumentée par EDF et INRAE, est installée en rive gauche de la Sélune au niveau du pont de Virey (RD 581). Elle est située 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.

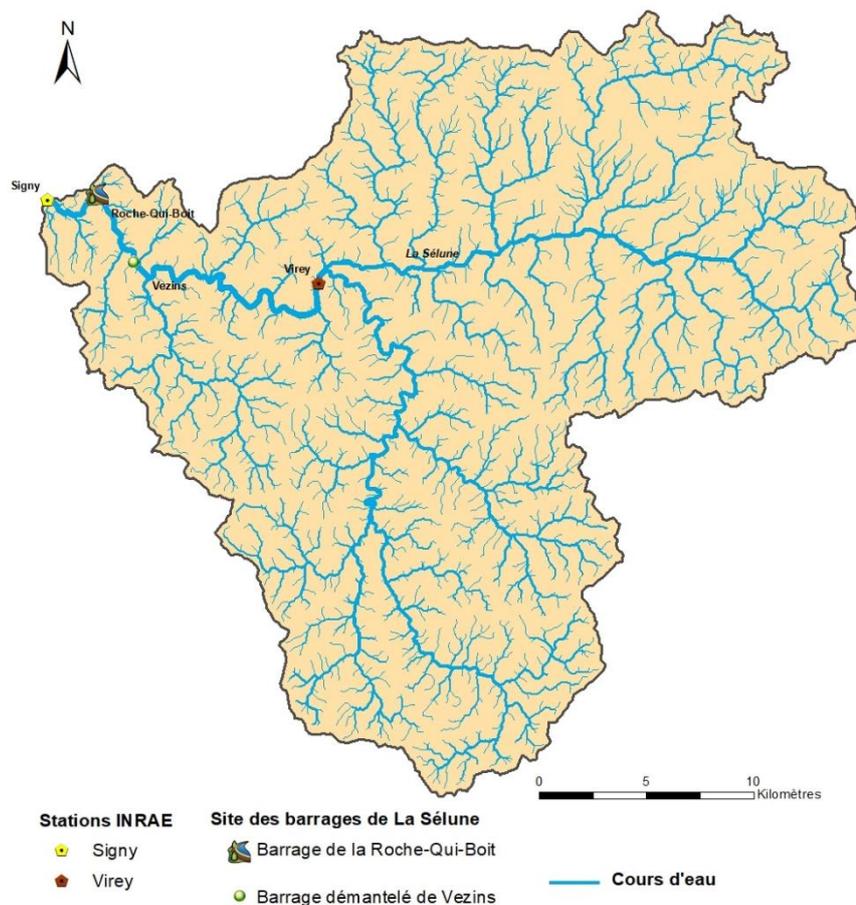


Figure 1 : Localisation des stations de suivi multi-paramètres sur le bassin versant de la Sélune (exutoire considéré : station de Signy)

La station amont permet de mesurer les flux entrants à l'amont des barrages. L'acquisition des données y est effective depuis début février 2015. La collaboration EDF-INRAE a permis à l'ingénieur INRAE d'obtenir les clefs de la station afin d'entretenir les sondes à une fréquence hebdomadaire et assurer la qualité des données. EDF a installé deux stations de mesure à l'aval immédiat de chaque barrage : la station de Dorière en aval du barrage de Vezins (Hors service depuis octobre 2020) et la station de la Roche-Qui-boit en aval du barrage de la Roche-Qui-boit.

La station de Signy, instrumentée par INRAE est installée en rive droite de la Sélune au niveau du pont de Signy (RD 178, limite communale DUCEY/SAINT-AUBIN-DE-TERREGATTE), 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. Elle est située 4 km en aval du barrage de la Roche Qui Boit. Cet emplacement intègre une surface de bassin versant de 777 km². L'acquisition des données par INRAE y est effective depuis fin avril 2014.

2.1.2. Equipement des stations

Station du Pont de Signy

La station INRAE en aval des barrages est équipée depuis avril 2014, d'un turbidimètre, d'un capteur de niveau d'eau, d'un préleveur automatique réfrigéré servant à l'échantillonnage des crues pour le suivi de la chimie et depuis février 2015 d'une sonde de conductivité et température (Figure 2). Il existe également une sonde optique permettant la mesure en continue de la *chlorophylle a* et la concentration de cyanobactéries depuis juin 2016 (Tableau 1). Une centrale d'acquisition et un modem GSM permettent le stockage et le rapatriement des données à distance piloté depuis le laboratoire. Le pas de temps d'acquisition pour l'ensemble de ces paramètres est de six minutes. Le débit est obtenu via la mesure de niveau d'eau et une courbe de tarage fournie par la DREAL, qui réalise des jaugeages depuis 1990 sur cette station. L'entretien des sondes est effectué sur la station de Signy lors de visites hebdomadaires afin de garantir la qualité des données.



Figure 2 : Photo de la station aval (Station INRAE)

Stations de Virey, Dorière et La Roche Qui Boit

Les trois stations sont équipées chacune d'un turbidimètre, d'une sonde de conductivité, d'un capteur de niveau d'eau, d'une sonde d'oxygène dissous, d'une sonde de température et d'une sonde pH (Tableau 1). Le débit est calculé grâce aux jaugeages réalisés par EDF et la DREAL. Ces données sont transmises à un pas de temps horaire depuis février 2015 à INRAE via un serveur FTP, mis à disposition par EDF et permettant le téléchargement hebdomadaire des données. La station Dorière est hors-service depuis octobre 2020.

Pour la station de Virey, en amont des barrages, INRAE a installé en complément depuis février 2015 un préleveur automatique et un capteur de niveau d'eau pour son déclenchement afin de collecter des échantillons en période de crue (Figure 3, Tableau 1).

Le capteur de niveau d'eau a été remplacé en mai 2017 par un capteur de pression relative PLS et l'installation d'une centrale d'acquisition ainsi qu'un modem GSM permettant l'accès et le téléchargement des données à distance.

L'entretien des parcs de sondes EDF est assuré par un bureau d'étude privé, à raison de deux passages par mois durant l'été et un passage le reste de l'année. La station EDF de Virey est aussi entretenue hebdomadairement par INRAE depuis le 10/08/2021.



Figure 3 : Station de Virey, à l'amont (EDF-INRAE), à gauche : le préleveur installé par INRAE, À droite : les sondes et le dispositif de suivi installés par EDF

Tableau 1 : Récapitulatif des paramètres mesurés sur les stations de la Sélune.

Paramètres mesurés	Stations de mesure			
	Virey	Dorière	Roche-Qui-Boit	Pont de Signy
Conductivité électrique ($\mu\text{g}/\text{cm}$)	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
Turbidité Mes (mg/L)	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	1h	1h	6min

2.1.3. Protocole de prélèvement et analyses

Le suivi et la quantification des flux nécessitent des prélèvements réguliers d'échantillons d'eau, pour l'ensemble des conditions hydrologiques. Un prélèvement manuel systématique est réalisé de façon hebdomadaire, 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 (

Figure 4). Le préleveur est programmé pour se déclencher automatiquement (via une information transmise par la centrale d'acquisition) si le seuil de niveau d'eau fixé par l'utilisateur est dépassé à Signy et si la montée du niveau d'eau dépasse 4cm en une heure à Virey.

Le seuil fixé à Signy est réajusté régulièrement lors des visites sur site ou à distance depuis Rennes (via le modem) en fonction des conditions hydrologiques de base. 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.



Figure 4 : A gauche, préleveur réfrigéré à la station aval (pont de Signy), à droite préleveur non réfrigéré sur la station amont (pont de Virey).

L'échantillonnage a débuté en mai 2014 pour la station INRAE en aval des barrages et en février 2015 pour la station INRAE-EDF en amont. 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 5), sur la phase dissoute (PO_4 , NO_3 , NO_2 , NH_4 , Cl , SO_4 , Si) et 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 10304); le phosphore PO_4 , P total (ISO 15681), l'ammonium NH_4 (ISO 11732), 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

particulaires 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 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.

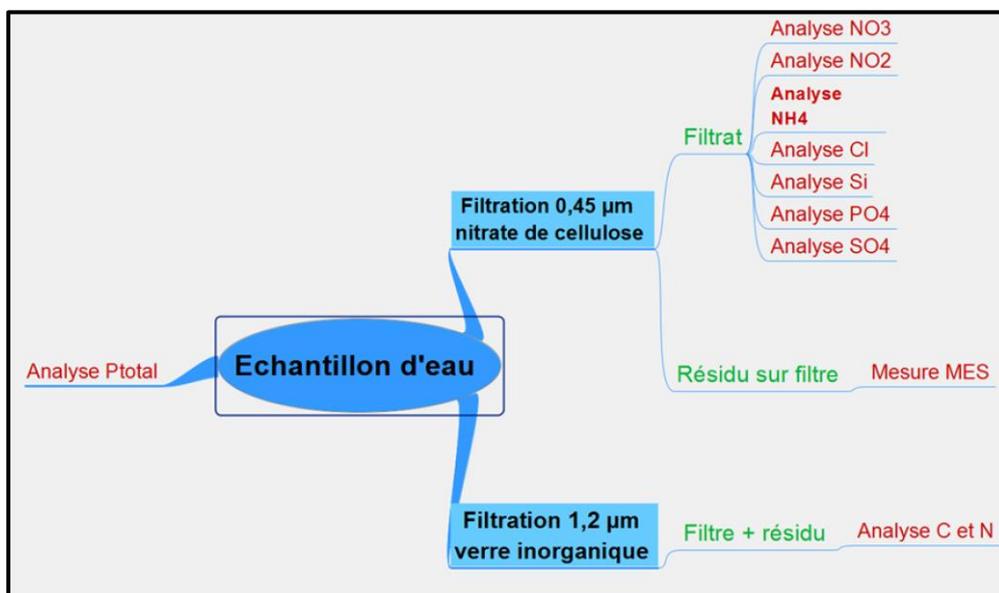


Figure 5 : Préparation au laboratoire des échantillons d'eau prélevée en vue des différentes analyses.

2.1.4. 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 (Figure 6).



Figure 6 : Photographie de transpondeurs RFID placés dans des sédiments grossiers

150 traceurs ont été ainsi déployés sur deux tronçons: le seuil de Virey (50 traceurs – site 1) en amont des anciennes retenues et en aval du pont de Bateau (2 transects avec 50

traceurs chacun, sites 2 et 3), à l'aval des barrages (*Figure 8* et *Figure 7*). 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 influence des ouvrages.



Figure 8 : Localisation du site de suivi de la charge grossière au seuil de Virey



Figure 7 : Localisation du site de suivi de la charge grossière en aval du pont de Bateau

Les mobilités observées sont mises en perspectives avec les débits moyens journaliers (Qjm) enregistrés durant les périodes de suivis. Ces débits sont issus de la banque hydro (station de Saint Aubin de Terregatte). Durant la période 2019-2021 l'hydrologie a été particulièrement active avec un total de 28 jours présentant des débits supérieurs au débit biennal (dont 15 en 2020-2021) ainsi qu'une journée voyant le Qjm supérieur à une crue quinquennale (en 2020) (Figure 9).

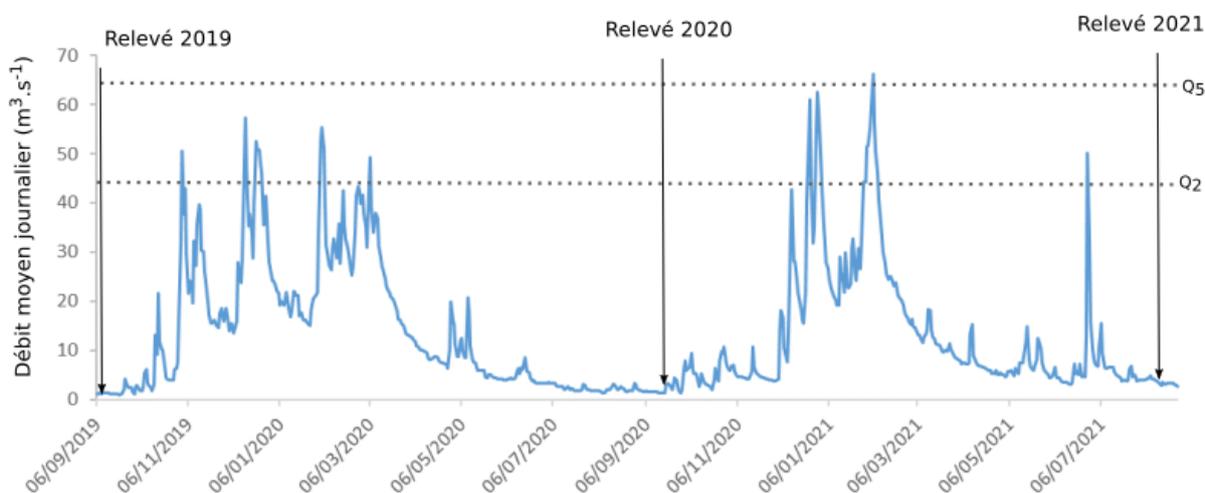


Figure 9 : Chronique de débit de la Sélune à Saint Aubin de Terregate (banque Hydro) et point de relevé des position des sédiments

Les hivers 2019-2020 et 2020-2021 diffèrent dans la mesure où le premier a connu de nombreuses crues courtes (1 jour) légèrement supérieures au débit biennal (Q2) alors que le second se caractérise par des crues nombreuses mais plus longues (> 1 jour) et plus intenses.

2.1.5. Mise en place de pièges à sédiments et échantillonnage granulométrique

Des pièges à sédiments expérimentaux ont été fabriqués et posés au mois d'août 2021 (Figure 10). L'objectif de ces pièges est de suivre l'évolution de la granulométrie charriée par le cours d'eau. Ce suivi a pour objectif de rendre compte d'une possible évolution granulométrique des sédiments avec l'apparition de sables transportés à l'aval des barrages. Ce dispositif ne consiste pas à quantifier les flux sédimentaires avec plus de précision.



Figure 10 : Dispositif expérimental de piège à sédiment (avant la pose à gauche, après 14 jours à droite)

Ce dispositif est constitué d'une bouteille en plastique à goulot large dans laquelle est placée une structure PVC en nid d'abeille qui favorise la rétention des sédiments. L'eau entre par la section du goulot, S1, puis dans la bouteille dont la section est plus large, S2. Le champ de

vitesse ainsi diminué permet la sédimentation dans les nids d'abeille qui retiennent les sédiments (Figure 11). La surface de sortie S3 est égale à la surface d'entrée S1. Le dispositif est lesté par une chaîne et fixé au fond du cours d'eau par des fers à béton.

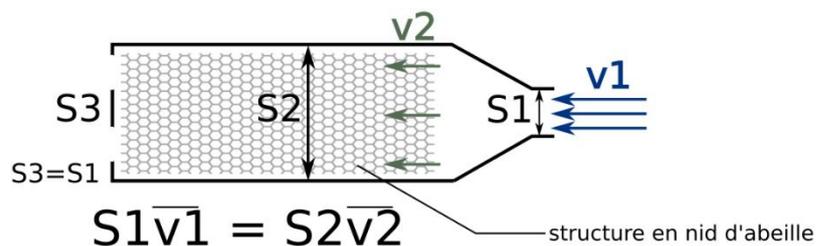


Figure 11 : Schéma fonctionnel vu du dessus des pièges à sédiments

Quatre pièges ont été fabriqués et posés. Un piège est présent en amont à 200m en aval de la station de Virey comme témoin des conditions « naturelles ». Les trois autres pièges ont été placés en aval immédiat de la RQB, au pont du bateau et 200m en aval de la station de Signy (Figure 12). Ces pièges sont placés entre les mouilles profondes présentes à l'aval de la RQB qui pourraient constituer des pièges à sédiments naturels en stockant une partie d'un flux de sable potentiellement relargué à l'ouverture des barrages. En complément, un échantillonnage de sédiments à l'aide d'une drague a été réalisé en aval de la RQB pour analyse granulométrique. Afin de comparer la granulométrie charriée par la Sélune avant et après l'ouverture de la RQB, les résultats seront acquis a minima sur l'année hydrologique 2021-2022. Par conséquent aucun résultat ne sera présenté dans ce rapport.

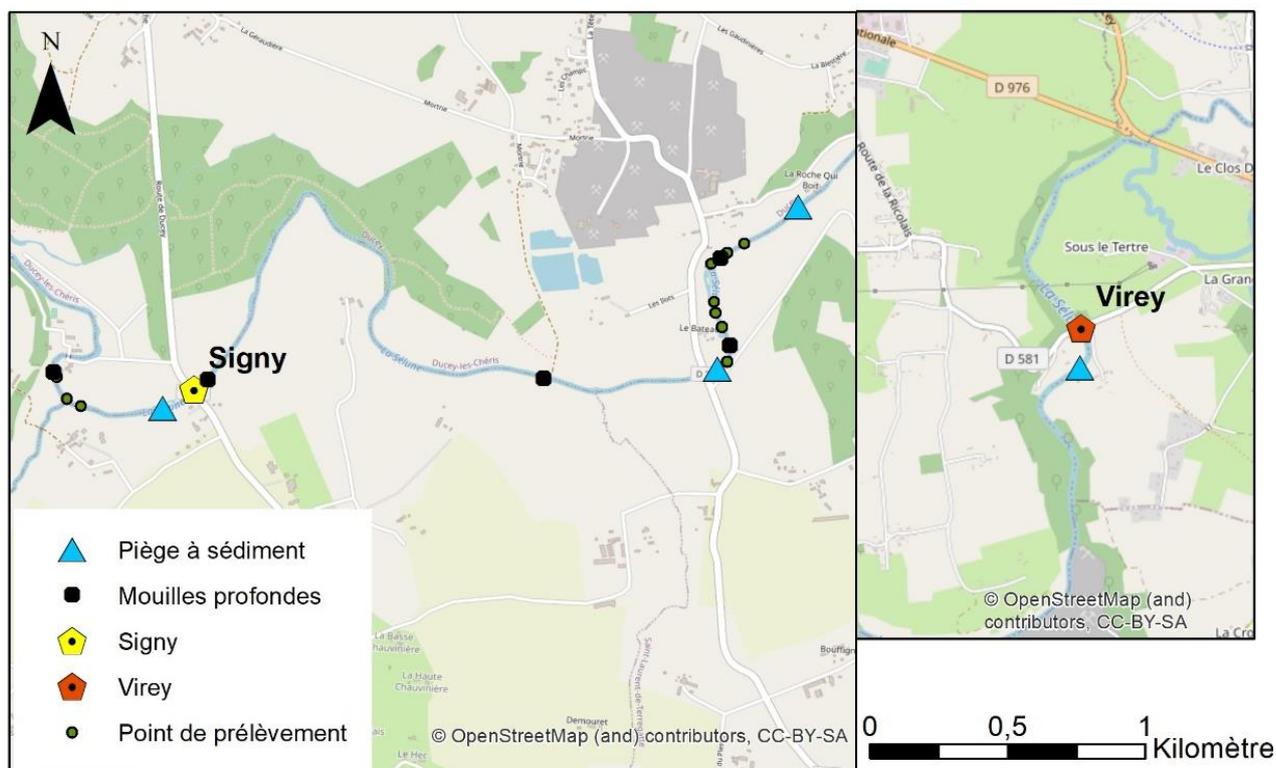


Figure 12 : Localisation des pièges à sédiments, des mouilles profondes et des points de prélèvement par drague sur la Sélune

2.2. Traitement des données

Les données acquises par les sondes de la station INRAE et celles fournies par les stations EDF sont traitées à l'aide du logiciel HYDRAS. 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. Cette correction est faite systématiquement sur les données de turbidité et de débits qui sont utilisées dans le cadre du calcul des flux hydriques et sédimentaires. Les données issues des analyses en laboratoires sont compilées dans un fichier Excel. Les valeurs sont contrôlées régulièrement au fil de l'eau. L'ensemble des données produites est archivé sur le serveur de l'UMR SAS.

L'interprétation des données fait également appel à des données complémentaires sur la pluviométrie : les données de pluie de la Station MétéoFrance de Saint-Hilaire-du-Harcouët (50484002) nous sont transmises au pas de temps horaire, par MétéoFrance dans le cadre de la convention Météo France – INRAE.

NB : Le système d'information du programme Sélune est actuellement en cours de construction. La version bêta du système d'information géographique est accessible à l'adresse suivante : <https://geosas.fr/selune>.

2.3. Methodes de calcul des flux

2.3.1. Calcul des flux annuels sédimentaires fins

Les flux de sédiments fins sont suivis par des mesures haute fréquence de la turbidité combinées à des mesures plus ponctuelles des concentrations en MES, en écoulement de base et en crue. La turbidité de l'eau est la mesure du caractère trouble dans l'eau dû aux matières en suspension. Elle est essentiellement liée aux concentrations de MES présentes, mais cette relation dépend aussi de la granulométrie et de la nature des particules. En effet la sonde du turbidimètre est plus sensible aux concentrations des particules fines, alors que les concentrations de MES sont en revanche surtout liées à la masse des particules les plus grosses. Le calcul des flux sédimentaires est classiquement réalisé en utilisant une relation statistique d'étalonnage établie entre la turbidité et la concentration de MES, pour disposer d'une chronique haute fréquence estimée de ces concentrations. Pour établir cette équation entre la turbidité et les MES, une régression linéaire simple a été utilisée sur les stations amont et aval :

$$\text{Virey : } MES \text{ (mg/L)} = a_V \times \text{Turbidité (FNU)} + b_V$$

$$\text{Signy : } MES \text{ (mg/L)} = a_S \times \text{Turbidité (FNU)} + b_S$$

a_X et b_X sont les coefficients de l'équation de calibration Turbidité/MES pour Virey et Signy.

Les régressions sont calibrées par station. Pour calibrer la relation Turbidité/MES, on cherche à sélectionner des évènements pertinents : 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, 63 crues ont été échantillonnées sur la période 2015-2021. Parmi elles, 40 crues sont mobilisées pour établir la relation d'étalonnage Turbidité/MES ($R^2 > 0,6$). Cela représente 565 couples de points sur la période 2015-2021 (Figure 13) à partir desquels l'équation de calibration a été calculée.

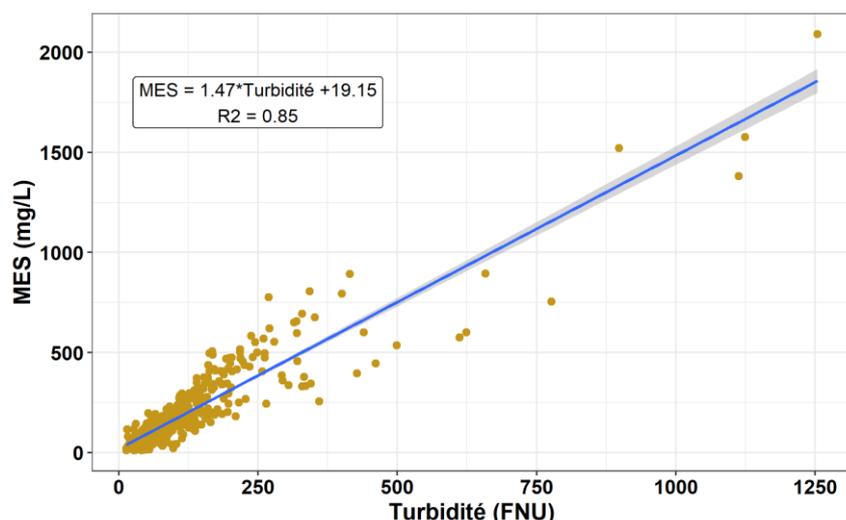


Figure 13 : Relation entre la turbidité et la concentration de MES sur la station amont de Virey (Eq.V6). Le grisé donne l'intervalle de confiance à 95%.

Pour la station de Signy, en aval des barrages, afin d'assurer la continuité avec les précédents rapports et pour repérer d'éventuelles évolutions avec les travaux, les relations établies en intégrant les données 2017-2021 (pendant travaux) sont comparées à celles établies avec les données 2015-2017 (état initial). La relation d'étalonnage Turbidité/MES (Eq.8) a été déterminée avec les données en écoulement de base et les données de crues triées ($R^2 > 0,6$) recueillies depuis le début des travaux de vidange (soit 454 couples de points) (Figure 14).

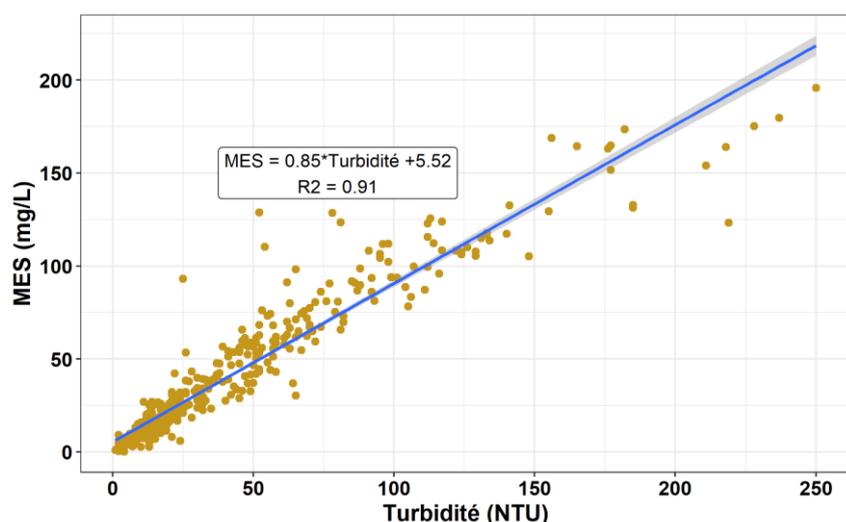


Figure 14 : Relation entre la turbidité et la concentration de MES sur la station aval de Signy (Eq.S6). Le grisé donne l'intervalle de confiance à 95%.

La régression et le calcul des incertitudes associées ont été conduites à l'aide du package R Stats. Les incertitudes de ces équations de calibration ont été calculées avec un intervalle de confiance de 95%.

Le flux des deux stations est calculé en appliquant l'équation issue de chaque année hydrologique aux concentrations en Turbidité et de débit de chaque période ou station.

L'équation utilisée pour chaque année-station est celle donnant le flux retenu avec le moins d'incertitude et qui correspond à la même période que l'année hydrologique étudiée (pré-travaux, travaux, ou post-travaux).

L'ensemble des équations établies pour le calcul des flux sont consultables en *Annexe 4*.

2.3.2. Calcul des flux annuels de nutriments

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*).

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 SRC, les méthodes IRC et DWC ont permis d'avoir des résultats convergents. Est retenue la méthode DWC qui permet en plus d'estimer les incertitudes associées aux flux. pour les années hydrologiques 2019-2021.

La méthode DWC (Littlewood, 1995) et (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 :

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

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.

2.3.3. Estimation de l'incertitude sur le flux (méthode DWC)

Les incertitudes et biais associés au calcul de flux sont réduits lorsque la fréquence d'échantillonnage augmente (Moatar *et al.*, 2013): 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 (M2%), des flux d'eau (W2%) et celui hydrochimique (b_{50sup})) permet de déterminer l'impact de ces indicateurs sur les incertitudes (Raymond, 2011). Un abaque développé par (Moatar *et al.*, 2013) a été exploité pour déterminer les incertitudes sur les flux calculés par la méthode DWC à partir de l'indice M2% et la fréquence d'échantillonnage associée.

L'indicateur des flux de matière M2% est la part du flux délivré en 2% du temps, elle n'est calculable qu'à partir d'un suivi au moins journalier. Une relation entre le M2%, le W2% et le b_{50sup} (Moatar *et al.*, 2013) permet aussi de l'estimer à partir d'un suivi discret supra-journalier des concentrations :

$$M_{2\%} - W_{2\%} = 26.7b_{50sup}$$

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

$$\begin{cases} e_{50} = ux^2 + vx \\ e_{10} = r(d)M_2^2 + s(d)M_2 \\ e_{90} = u(d)M_2^2 + v(d)M_2 \end{cases}$$

Où $x=M_2\%$ et où les coefficients $r(d)$, $s(d)$, $u(d)$ et $v(d)$ sont déterminés à partir de l'abaque (*Annexe 1*) décrit précédemment pour tous les flux de nutriments avec la fréquence d'échantillonnage qui est de $d=7$ jours.

2.4 Campagnes physico-chimiques sur les affluents

Pour évaluer le rôle de la contribution des affluents sur le cours principal de la Sélune entre nos deux stations amont/aval (Virey et Signy), 4 campagnes de prélèvements ont été réalisées depuis 2019 (*Figure 15*). Le suivi en continu des flux sur chacun des affluents serait difficile étant donné l'énergie et le coût d'une station en continu. 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 de qualité chimique et dans les différents contextes pédoclimatiques nationaux (Dupas *et al.*, 2019). L'objectif de ces campagnes, qui visent les basses et hautes eaux, est d'explorer la variabilité spatiale de la chimie des affluents dans la partie étudiée du fleuve Sélune pour répondre aux questions suivantes :

Q1 : la chimie des affluents entre les deux stations est-elle très différente ou semblable à celle du fleuve Sélune ?

Q2 : la chimie des affluents entre les deux stations se hiérarchise-t-elle selon des facteurs d'usages des sols ? de relief ? de taille ?...

Q3 : les variations de concentrations sur les différents affluents et sur le fleuve sont-elles synchrones ?

Q4 : peut-on hiérarchiser les apports dissous et de sédiments fins par les affluents entre les barrages ?

Au total, 12 points de prélèvements ont été définis sur les affluents. 11 d'entre eux se situent entre les stations amont et aval. Cet échantillonnage permet de couvrir 81% de la différence de 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.

Les paramètres chimiques mesurés sont les mêmes qu'aux stations de Virey et de Signy et sont traités selon le même protocole. Lors des prélèvements plusieurs paramètres in situ sont également relevés (*Tableau 2*).

Les bassins versants correspondant à ces stations de prélèvements ont été délimités à partir d'un MNT de résolution 50m, les pentes moyennes et les surfaces correspondantes aux occupations du sol dominantes d'après les données OSO 2018 (<https://www.theia-land.fr/carte-doccupation-des-sols-millesime-2018/>, téléchargées en 2019) ont été déterminées pour chaque sous bassin sur QGIS (cf. Rapport 2019).

Tableau 2 : Paramètres mesurés lors des campagnes sur les affluents

Mesures d'éléments solides et dissous	Paramètres mesurés in situ
Phosphates (mg/L)	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Phosphore Total (mg/L)	Température ($^{\circ}\text{C}$)
Chlorure (mg/L)	O2 dissous (mg/L)
Nitrites (mg/L)	
Nitrates (mg/L)	
Sulfates (mg/L)	
Silice (mg/L)	
Ammonium (mg/L)	
MES (mg/L)	

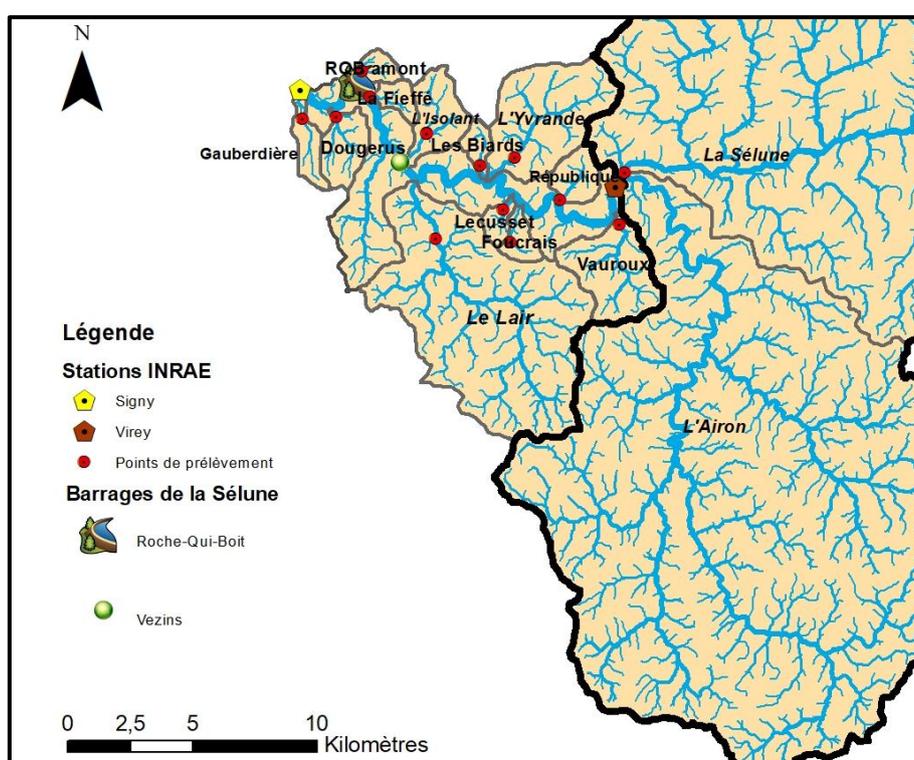


Figure 15 : Carte des points de prélèvements sur les bassins versants des affluents de la Sélune.

3. Résultats

L'influence des barrages sur les dynamiques événementielles et saisonnières des flux dans la phase pré-arasement a été détaillée dans les rapports précédents. En résumé, le suivi mettait principalement en évidence le stockage des sédiments et des éléments adsorbés dans les retenues (abattement important des flux de MES et de Phosphore), un effet tampon sur les dynamiques événementielles des solutés dû au mélange avec le stock d'eau dans les retenues. Il y avait également des effets source/puits saisonniers sur certains éléments chimiques (Si, PO₄) attribués à l'activité et la production biologique dans les réservoirs.

Depuis le début des travaux de vidange, on observe une augmentation des concentrations MES et de phosphore à l'aval.

3.1. Dynamique des paramètres hydrologiques

3.1.1. Hydrologie

Comme le montre la

Figure 16, la variation des débits spécifiques est semblable à celle de la pluviométrie. Les débits spécifiques de l'amont et de l'aval diffèrent peu (<8% relativement aux entrées de pluie) et surtout pour les années hydrologiques 2016-2017, 2019-2020 et 2020-2021 avec respectivement des différences absolues de 29mm, 89mm et 61mm de lame d'eau écoulée. Cette différence ne semble pas être liée aux barrages étant donné qu'elles sont observées avant et après l'arasement.

En considérant la moyenne pluviométrique annuelle de 901mm depuis l'année 1968, les années 2016-2017 et 2018-2019 peuvent être considérées comme sèches avec un cumul pluviométrique respectif de 588mm et 643mm (cf. Annexe 2).

Le débit maximum est atteint en hiver : 86,3 m³/s à l'aval (21/01/2018) et 93,7 m³/s à l'amont (05/01/2018). La valeur minimale de débit enregistrée correspond à la période estivale : 0,45 m³/s (19/07/2017) à l'amont et 1,05 m³/s à l'aval (01/09/2017).

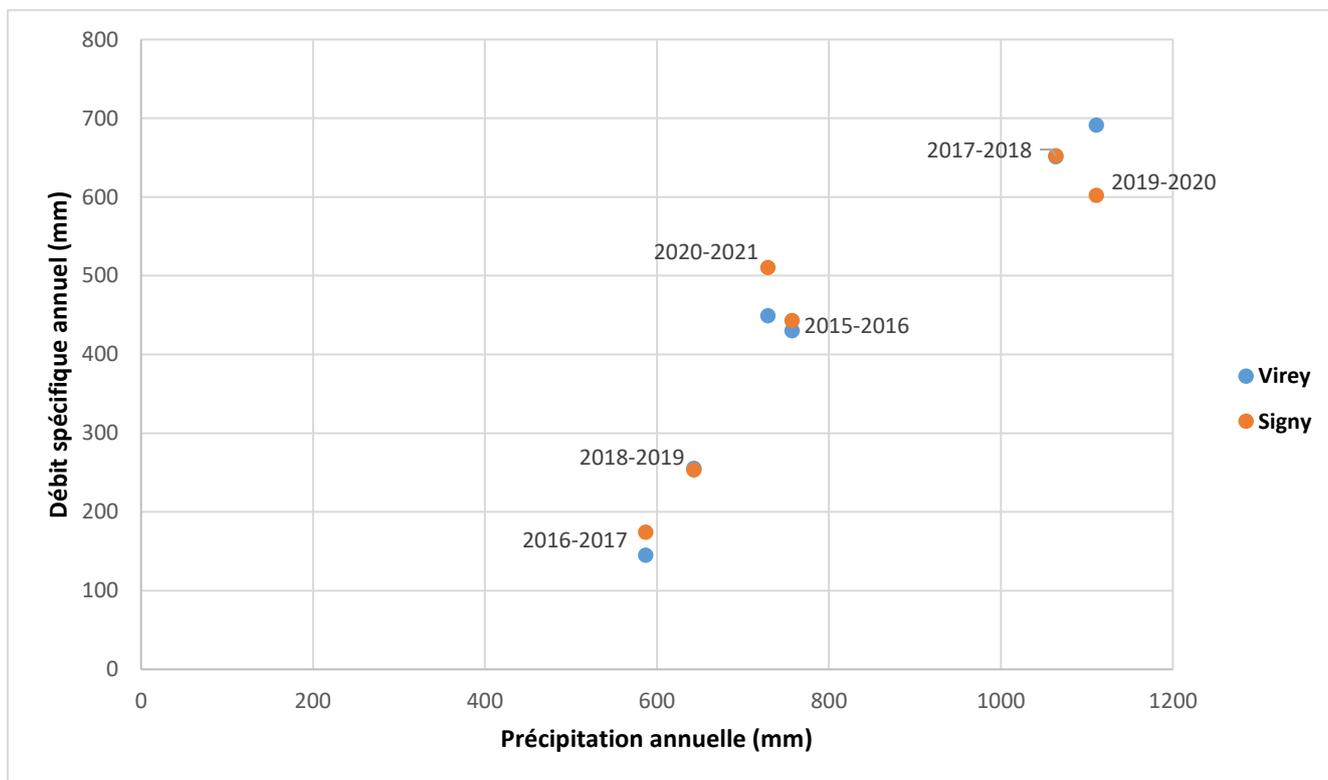


Figure 16 : Lame d'eau écoulee à l'amont et à l'aval du barrage (respectivement Virey et Signy) en fonction des précipitations

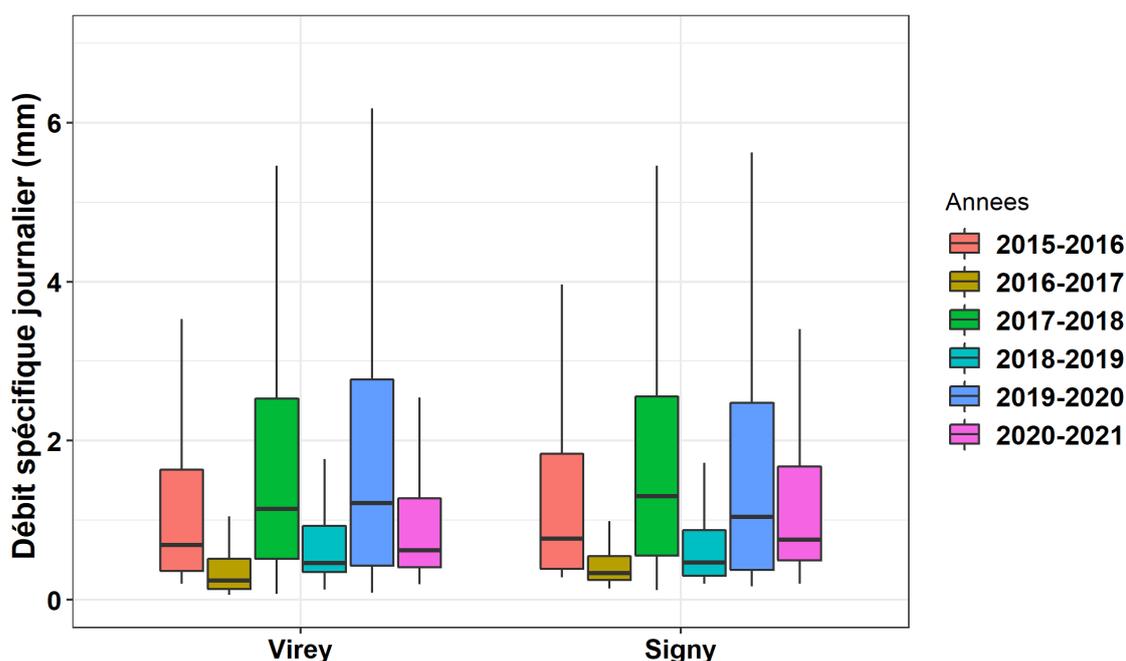


Figure 17 : Distribution en boxplot des débits spécifiques journaliers des stations amont (Virey) et aval (Signy) par année hydrologique.

Les distributions des débits instantanés (horaire pour Virey, toutes les 6 min pour Signy) sont très semblables (Figure 15). Les débits les plus observés sur la Sélune sont compris entre 0 et 5m³/s indépendamment de la période mais sont moins récurrents d'environ 10% à Signy où à l'inverse les débits spécifiques de 5 à 10 m³/s y sont plus fréquents qu'à Virey. Les débits plus élevés lors de la période travaux sont dus aux forts cumuls pluviométriques des années 2017-2018 et 2019-2020.

Le coefficient de variation (Tableau 2) permet d'évaluer la variabilité globale des débits pendant la durée de l'observation (ASSANI, 2004). Il est défini comme le rapport entre l'écart-type et la moyenne. Plus le coefficient de variation est élevé et plus la variabilité des débits est grande.

Tableau 3 : Coefficients de variations des débits spécifiques selon la période à l'amont et à l'aval des barrages.

	Période Pré-travaux	Période Travaux
Virey	1,26	1,08
Signy	1,08	1,00

À Virey les coefficients de variations montrent des débits un peu plus variables comparés à ceux enregistrés de Signy. La différence de variabilité des débits entre les périodes est due aux différences climatiques des années étudiées en partie mais la baisse de variabilité des débits entre les 2 périodes à Signy est moins importante que celle observée en amont (différence de 8% en aval et de 18% en amont).

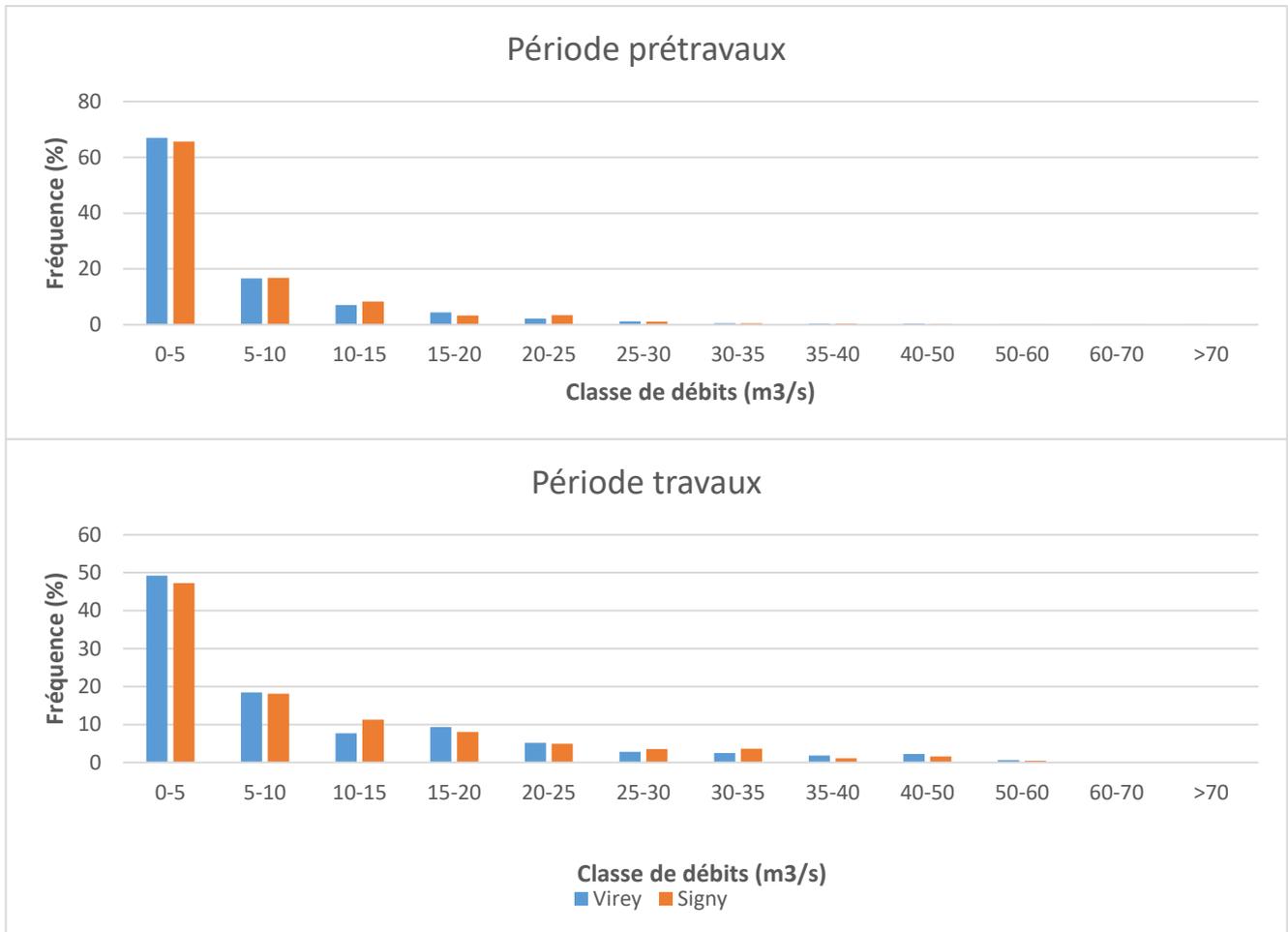


Figure 18 : Fréquences des débits spécifiques sur les stations amont et aval sur les périodes de pré travaux et de travaux

3.2.2 Température de l'eau

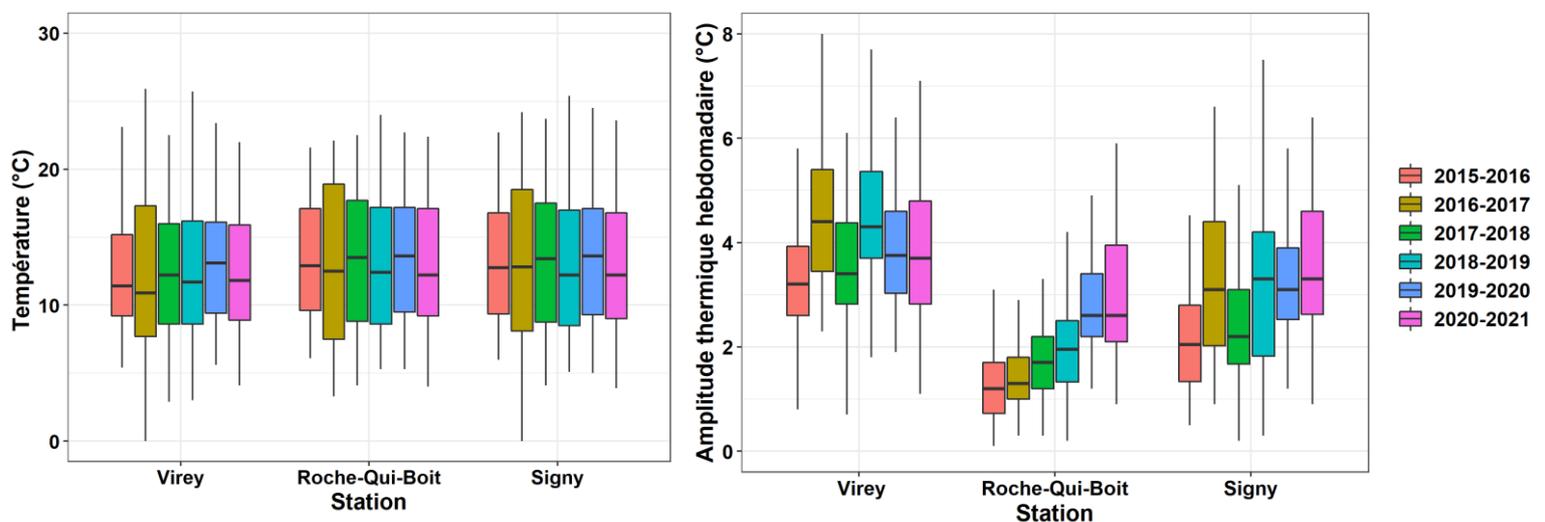


Figure 19 : Distribution en boxplot des températures mesurées sur les stations et de l'amplitude thermique hebdomadaire

Les températures moyennes journalières montrent globalement un léger réchauffement des eaux de surfaces à l'aval des barrages par rapport à l'amont (*Figure 19*). Sur la période 2015-2017, il y avait un réchauffement moyen de 1,06°C entre Virey et la station de la RQB et de 0,99°C entre Virey et Signy. Sur la période travaux, le réchauffement de l'eau n'est plus que de 0,65°C entre Virey et la RQB et de 0,52°C entre Virey et Signy (Annexe 3). Les variations de l'amplitude thermique à Signy sont semblables à celle de Virey bien que ses valeurs soient inférieures (dû à l'effet tampon du barrages). L'amplitude thermique à la sortie du barrage de la RQB est moins marquée que sur les autres stations mais augmente depuis le début de la phase travaux.

3.2. Dynamique sédimentaire

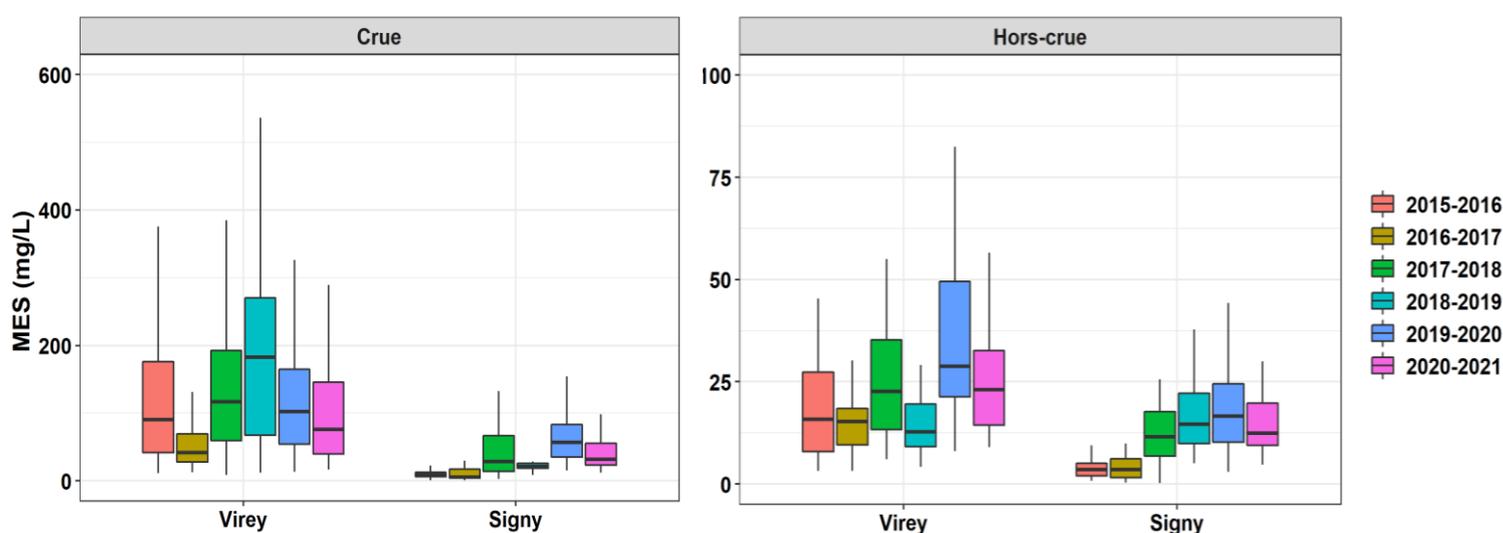


Figure 20 : Distribution en boxplots des concentrations en MES (mg/L) par année et selon le type d'écoulement (NB : les échelles diffèrent selon les graphiques)

Les concentrations de MES sont plus élevées lors des événements de crue. Elles sont toujours supérieures à l'amont par rapport à l'aval, conséquence de l'abatement dû à la présence de barrage(s) (*Figure 20*). Depuis le début des travaux à Vezins, on note une hausse des concentrations de MES à l'aval. En écoulement de base, la concentration en MES à l'aval semble être en constante augmentation et a augmenté de près de 50% entre la phase pré-arasement et l'année hydrologique 2019-2020. La concentration maximale de MES mesurée à l'amont est de 2090 mg/L contre 284,5 mg/L à l'aval en période de crue, et de 257 mg/L contre 112 mg/L à l'aval en écoulement de base pour 2017-2021.

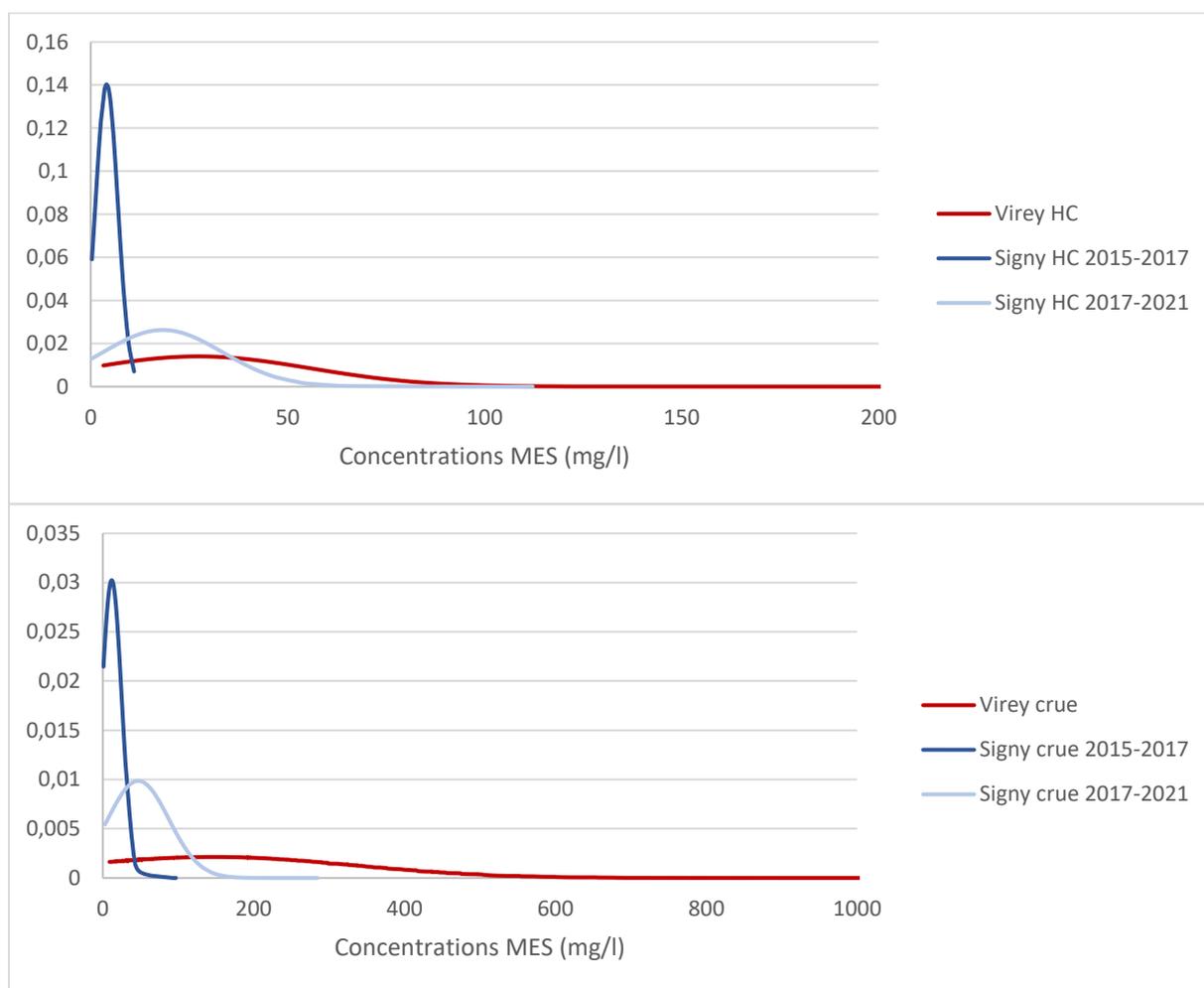


Figure 21 : Distribution normale des concentrations en MES en écoulement de base (HC) et en crue. NB : les échelles sont différentes selon les graphiques.

La distribution des concentrations en MES (*Figure 21*) est plus étalée à Virey qu'à Signy quel que soit l'écoulement. A l'aval, la distribution des concentrations a fortement évolué et se rapproche de la distribution amont sur la période 2017-2021 par rapport à la période pré-travaux. En écoulement de base, la moyenne des concentrations à Signy est de 4mg/l en 2015-2017 et de 18mg/l en 2017-2021, elle est de 27mg/l à Virey sur l'ensemble de la période. Lors de crues, la moyenne des concentrations à Signy est de 12mg/l en 2015-2017 et de 47mg/l en 2017-2021, elle est de 148 mg/l à Virey.

Les flux de MES calculés pour les stations amont et aval sont illustrés sur la *Figure 22* et le *Tableau 4*. Malgré l'augmentation des concentrations mesurées à Signy comme évoqué précédemment, le taux d'abattement sédimentaire a atteint un maximum de 83% en 2018-2019 et est descendu à 66% en 2020-2021.

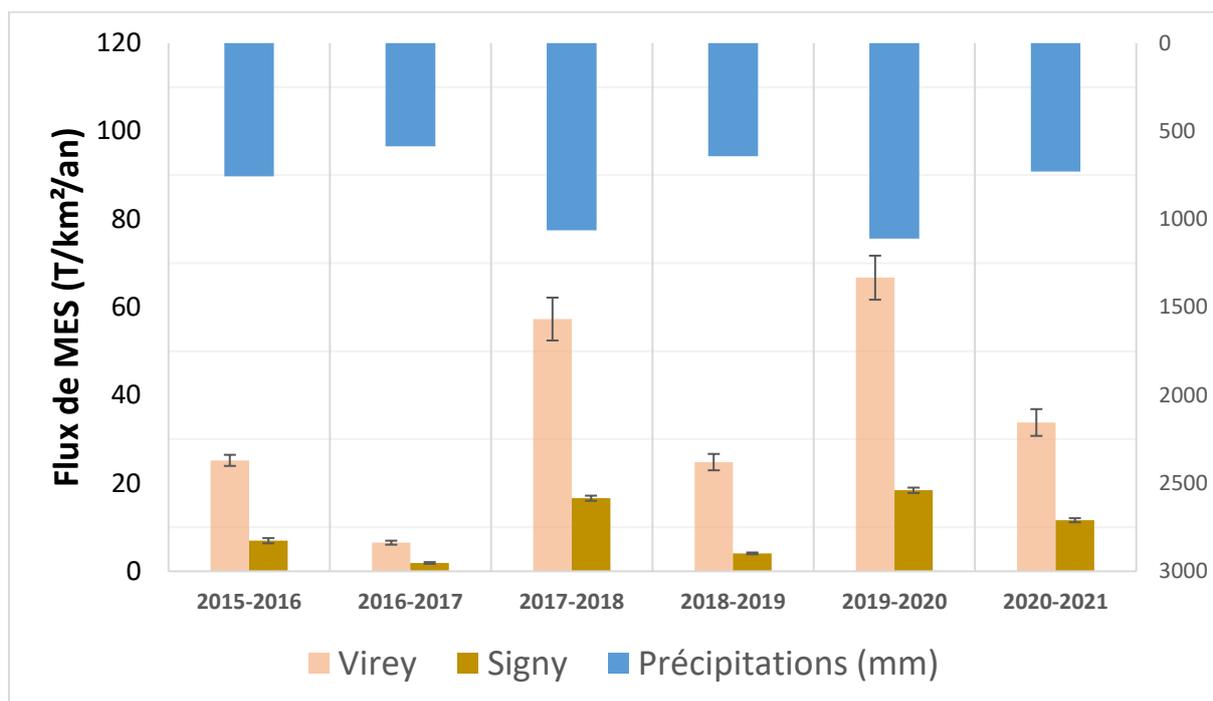


Figure 22 : Précipitations et flux de matière en suspension sur les stations amont et aval

Tableau 4 : Tableau des flux de matière en suspension sur les stations amont et aval.

Année	Virey			Signy			Abattement (%)
	Flux total (T/an)	Flux spécifique (T/km²/an)	Incertitude %	Flux total (T/an)	Flux spécifique (T/km²/an)	Incertitude %	
2015-2016	15851	25,2	10	5361	6,9	17	73
2016-2017	4089	6,5	14	1476	1,9	21	71
2017-2018	36042	57,3	17	12898	16,6	7	71
2018-2019	15599	24,8	15	3186	4,1	10	83
2019-2020	41954	66,7	15	14297	18,4	7	72
2020-2021	21260	33,8	18	9013	11,6	8	66

L'année 2019-2020 qui est la plus pluvieuse présente des maxima en MES aussi bien en amont qu'en aval, respectivement $66,7 T_{MES}/km^2/an$ et $18,2 T_{MES}/km^2/an$. Le flux spécifique annuel de MES est proportionnel à la lame d'eau écoulee sur les bassins versants (Figure 23). Les coefficients directeurs pour Virey et Signy sont respectivement $0,0895$ et $0,0353 (t \cdot km^{-2} \cdot mm^{-1})$. La relation obtenue pour Virey peut servir à estimer, en première estimation, le flux de MES spécifique des affluents se connectant dans la Sélune dans la zone des anciens barrages ; sur la base d'un flux d'eau spécifique observé équivalent entre Signy et Virey (

Figure 16). A noter que selon cette relation linéaire, il faut une lame d'eau seuil d'environ 50 mm annuelle pour déclencher une production de MES.

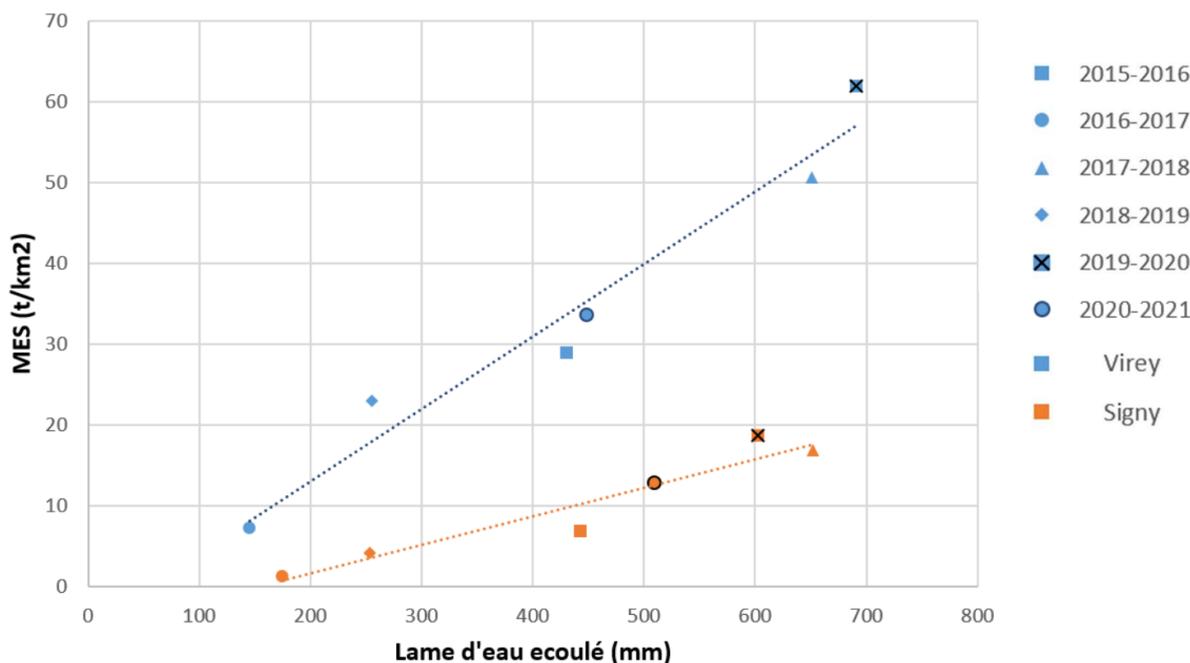


Figure 23 : Estimation des flux de sédiments en fonction des précipitations ($R^2_{Virey}=0.96$; $R^2_{Signy}=0.92$)

Le coefficient directeur à Signy est nettement inférieur et marque l'effet des barrages sur cette relation. Il est étonnant de constater que l'arasement du barrage de Vezins et les travaux de gestion des sédiments n'ont pas induit de modification notable dans l'alignement des points pour la courbe à Signy. Le barrage de RQB semble très efficace pour retenir une part significative des flux de sédiments, notamment la partie la plus grossière des MES mesurées à Virey.

3.3. Dynamique chimique

Les mécanismes d'influence des barrages sur la dynamique chimique de la Sélune ont été détaillés dans les rapports précédents. Les concentrations de certains éléments chimiques en particulier le phosphore, les phosphates et les nitrites, ont augmenté dès le début des travaux menés sur la Sélune en écoulement de base (cf figures ci-dessous).

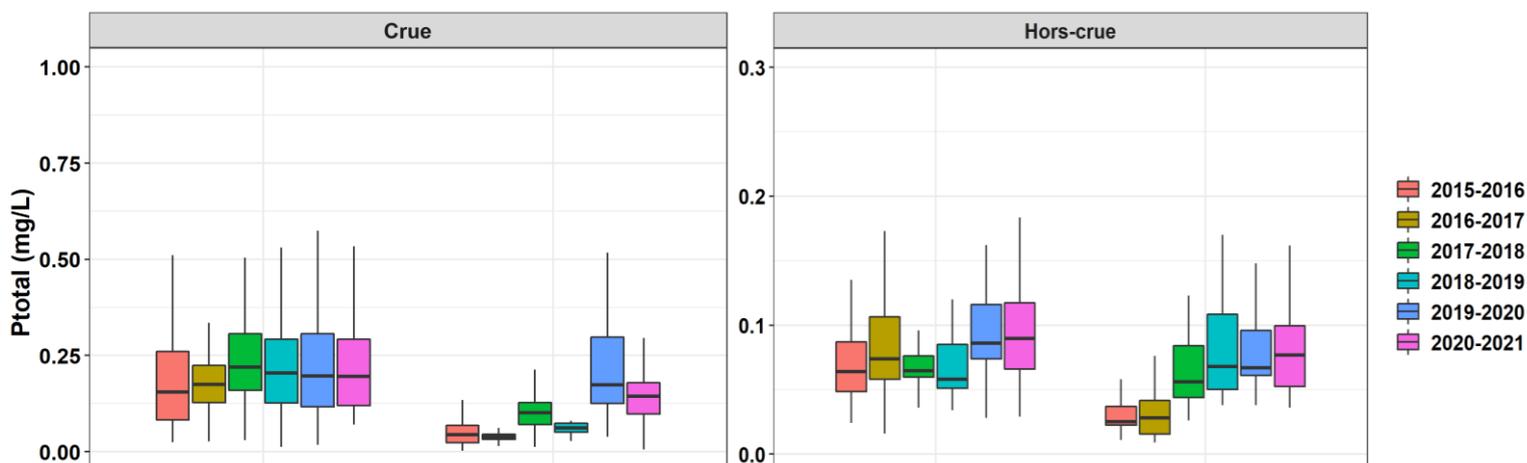


Figure 24 : Distribution en boxplots des concentrations en phosphore total des différentes années hydrologiques étudiées et selon le type d'écoulement (NB : Les échelles diffèrent).

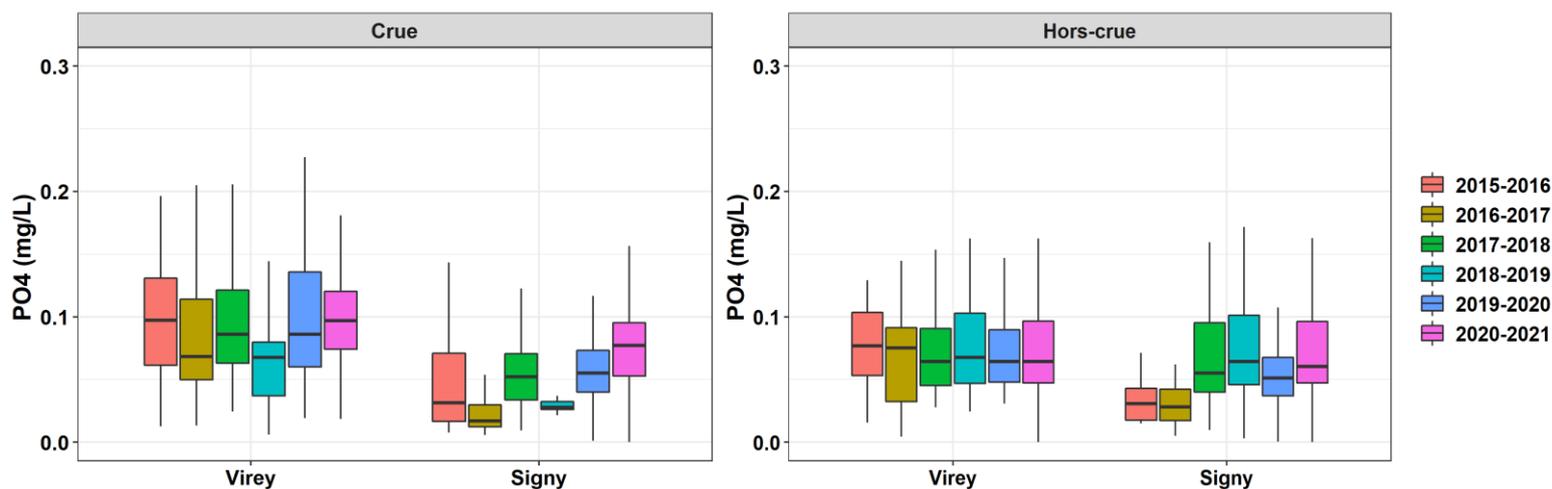


Figure 25 : Distribution en boxplots des concentrations en phosphate des différentes années hydrologiques étudiées et selon le type d'écoulement.

Les concentrations en phosphore total (Ptotal) et dissous (PO₄) présentent des dynamiques semblables à celles des concentrations de MES : des valeurs bien supérieures en crue et les années humides, et des valeurs supérieures à l'amont par rapport à l'aval. Depuis le début des travaux de vidanges du barrage de Vezins, on note aussi une hausse des concentrations de Ptotal et PO₄ à l'aval (Figure 24 et Figure 25). Pour le Ptotal, les concentrations à Signy en écoulement de base ont augmenté en moyenne de 40% entre la période pré-arasement et travaux. Et de 12 % en moyenne, pour le phosphore dissous.

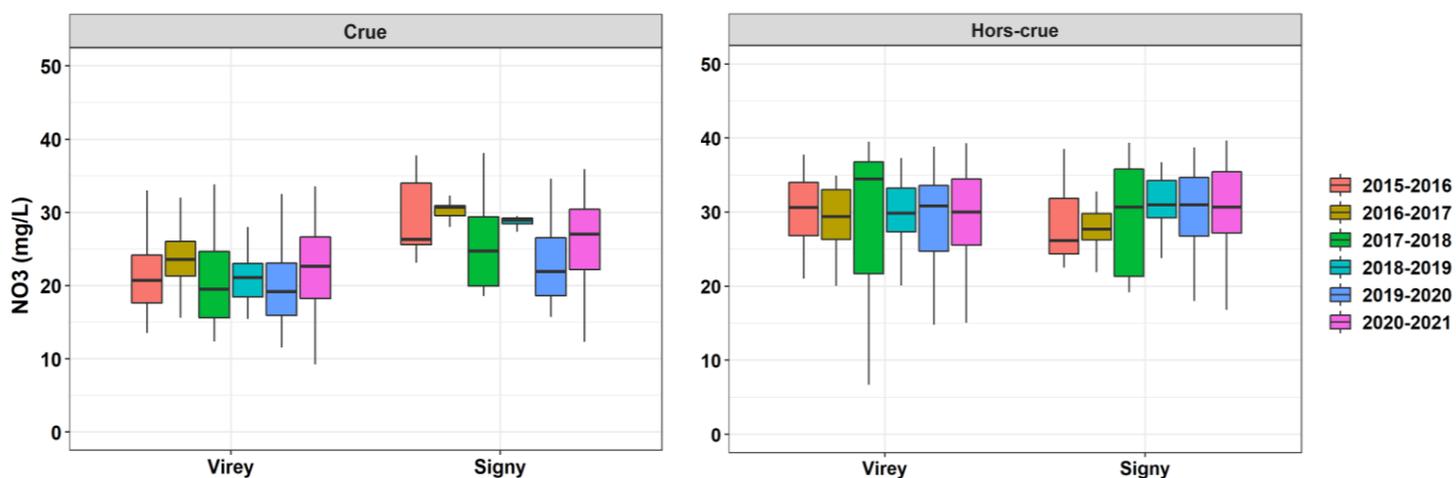


Figure 26 : Distribution en boxplots des concentrations en nitrates des différentes années hydrologiques selon le type d'écoulement.

Les concentrations en nitrates présentent au contraire des valeurs supérieures en écoulement de base, ainsi les années humides sont associées à des valeurs de concentrations plus fortes en écoulement de base mais plus faibles en crue. Les concentrations en NO₃ sont aussi généralement plus élevées à l'amont en écoulement de base et plus diluées donc plus faibles à l'amont en crue. Depuis le début des travaux, la concentration en NO₃ baisse à l'aval des barrages lors des événements de crue et augmentent en écoulement de base.

En crue, elles ont baissé en moyenne de 3,1 mg/L (soit de 11%) entre la période pré-travaux et la période travaux tandis qu'à l'amont elles n'ont diminué que de 1,4mg/L en écoulement de crue. En écoulement de base elles présentent une augmentation moyenne de 2,16mg/L à l'aval et une diminution moyenne de 0,39 mg/L à l'amont.

Lors de la période pré-travaux en écoulement de base, les concentrations moyennes en nitrites sont semblables à l'amont et à l'aval des barrages. Pour les deux années suivant le début des travaux (2017-2018 et 2018-2019), les concentrations en nitrites augmentent fortement et sont très variables contrairement à celles relevées en amont. Les concentrations à l'aval diminuent à partir de l'année 2019-2020 et redeviennent en moyenne similaires à celles de l'amont (± 0.01 mg/L).

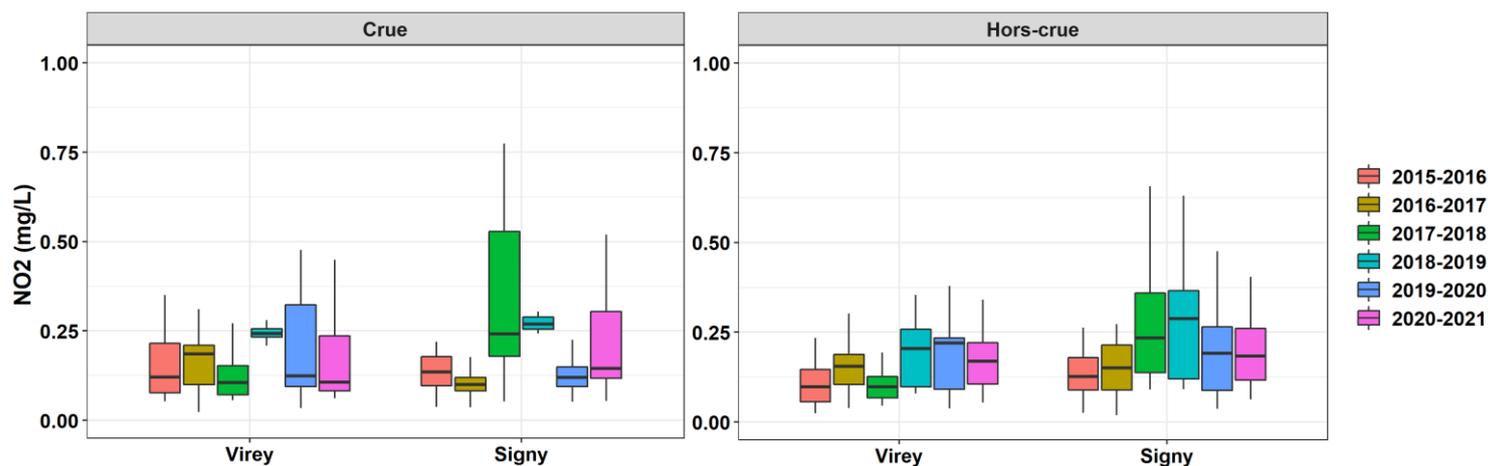


Figure 28 : Distribution en boxplots des concentrations en nitrites des différentes années hydrologiques et selon le type d'écoulement.

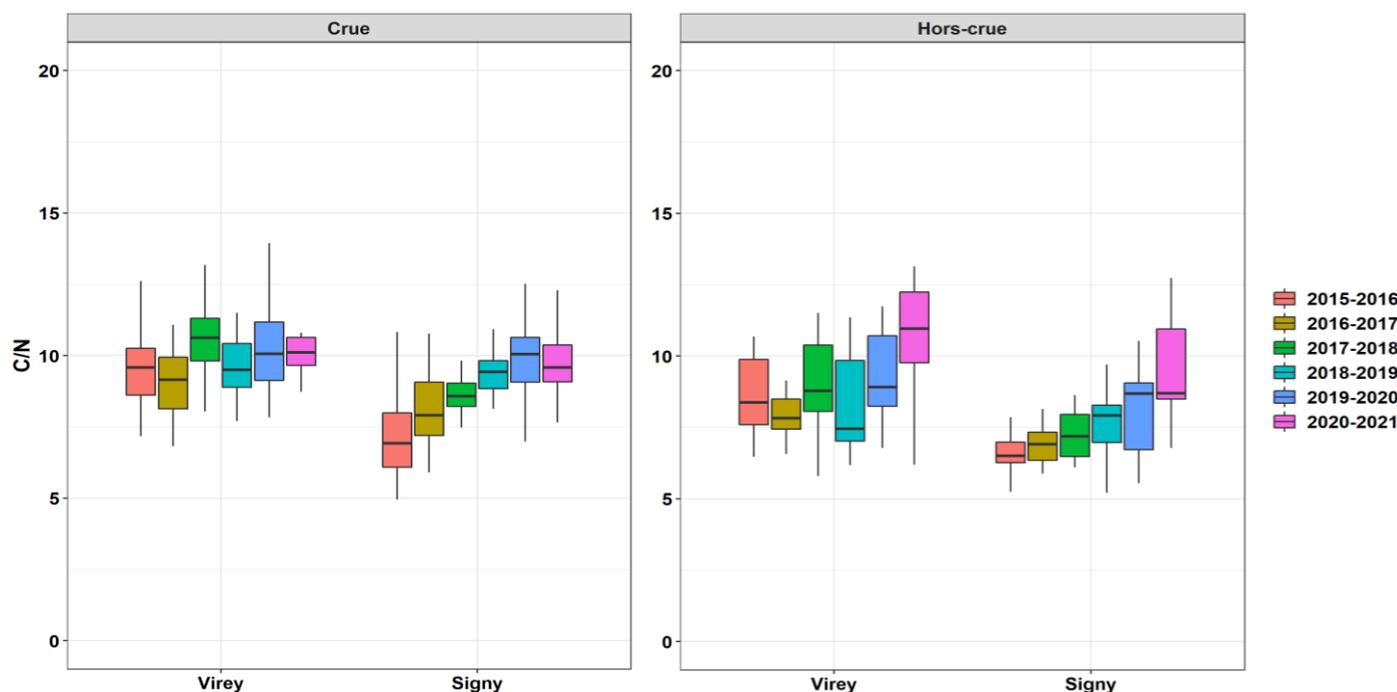


Figure 27 : Distribution en boxplots des rapports Carbone/Azote mesurés sur les matières en suspension des différentes années hydrologiques et selon le type d'écoulement

Le rapport carbone sur azote des particules de MES (C/N) est un indicateur du degré de dégradation de la matière organique et donc de son origine : un rapport C/N inférieur à 8 est indicateur d'une origine plutôt aquatique de la matière organique et un rapport C/N supérieur à 8 indique plutôt une origine terrigène matière organique (Bohlin et al, 2006). Le rapport C/N est un peu plus élevé en crue qu'en écoulement de base, et les années humides par rapport aux années sèches. Il est plus faible à l'aval, et plus élevé sur la période des travaux que la période pré-arasement sur cette station (*Figure 27*). Cette augmentation peut marquer la baisse de la contribution de la production biologique dans la Sélune, avec notamment la disparition du phytoplancton et zooplancton produits dans les retenues à la destruction du barrage de Vezins.

Les estimations de flux annuels des éléments chimiques (*Tableau 5*) mettent en évidence leur contrôle par le flux d'eau lui-même dépendant des précipitations (

Figure 16). Les flux spécifiques de phosphore total étaient moins élevés sur les trois premières années du suivi mais depuis l'année 2018-2019, soit l'année de la vidange finale de Vezins, les flux de phosphore à l'aval sont semblables à ceux calculés à l'amont et leur deviennent même supérieurs de presque 6% sur la période 2018-2021. Les flux de phosphate suivent la même tendance sauf pour l'année 2019-2020 où ils sont plus élevés en amont. On note que les flux spécifiques des autres éléments dissous sont supérieurs à l'aval quelle que soit la période. Les flux de nitrates sont en moyenne supérieurs de 22% sur l'ensemble de la période 2015-2021.

Tableau 5 : Flux (en T/km²/an) et imprécisions annuelles (%) associées des éléments chimiques à l'amont et à l'aval (respectivement Virey et Signy)

Virey	2015-2016		2016-2017		2017-2018		2018-2019		2019-2020		2020-2021	
	Flux (T/km ² /an)	Imprécision (%)										
Ptotal	28	9	8	9	65	9	11	9	53	9	31	9
P-PO4	6	6	2	6	12	6	3	6	11	6	6	6
N-NO3	1927	7	636	7	2681	7	1118	7	2741	7	1929	7
SO4	2671	6	1075	6	3798	6	1747	6	4248	6	2769	6
Si	1999	6	669	6	2318	6	1062	6	2563	6	1772	6
Cl	6267	3	3109	3	7707	3	4763	3	9235	3	6225	3

Signy	2015-2016		2016-2017		2017-2018		2018-2019		2019-2020		2020-2021	
	Flux (T/km ² /an)	Imprécision (%)										
Ptotal	12	17	5	17	49	7	14	7	58	7	35	7
P-PO4	5	19	2	19	11	5	5	5	8	5	9	5
N-NO3	2409	6	858	6	3545	6	1383	6	3107	6	2744	6
SO4	3655	6	1659	6	5418	4	2399	4	5273	4	4337	4
Si	2419	8	714	8	3078	4	1288	4	2876	4	2437	4
Cl	8302	3	4054	3	10598	3	5484	3	10156	3	8855	3

3.4 Suivi de la charge de fond

Depuis le début du traçage sédimentaire de la charge composant le fond du lit, les particules suivies ont globalement montré une mobilité très modérée (< 20m en 5 ans) (*Figure 29 et Figure 30*). Cette faible mobilité nous a permis d'observer un taux de retours des traceurs remarquable, supérieur à 90% après 5 ans de suivi.

L'année de suivi 2015-2016 n'a pas été intégrée dans nos statistiques, la mobilité des traceurs étant toujours surévaluée avant que les particules ne retrouvent une imbrication naturelle.



Figure 29 : Cartographie des traceurs sur le site de Virey (site 1) en 2021



Figure 30 : Cartographie des traceurs en aval du pont de Bateau (sites 2 et 3)

Que ce soit en termes de % de particules mobilisées, les distances maximum ou distances moyennes parcourues par les particules mobiles, nous observons peu de différences entre les sites amont et aval des barrages (Figure 31). Les valeurs moyennes annuelles de déplacement sont globalement trop faibles pour saisir des différences statistiquement significatives.

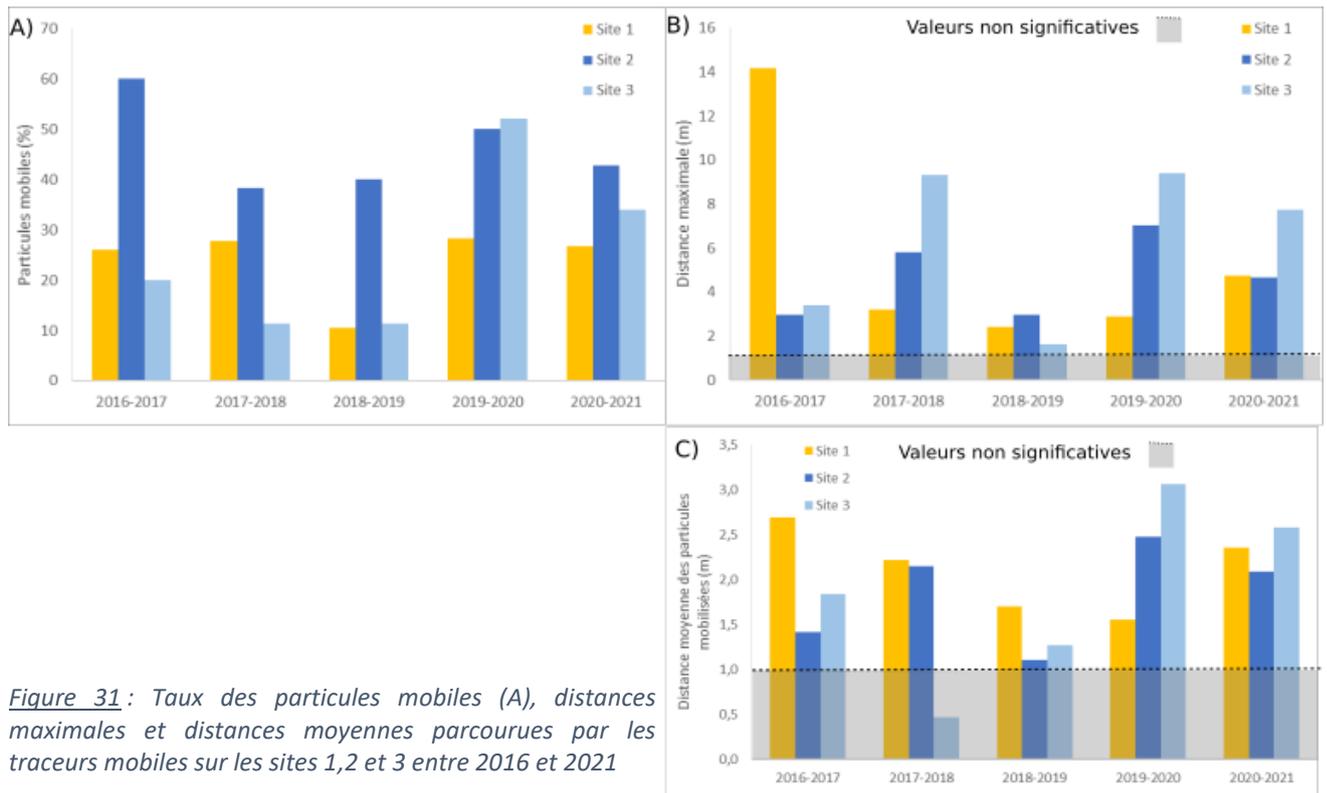


Figure 31 : Taux des particules mobiles (A), distances maximales et distances moyennes parcourues par les traceurs mobiles sur les sites 1,2 et 3 entre 2016 et 2021

Les valeurs de mobilité un peu plus importantes observées depuis 2019 (Figure 31) ne peuvent être indiscutablement attribuées à la suppression du barrage de Vezin étant donné que cette période correspond également à une hydrologie plus active (Figure 32) avec 13 jours en 2019-2020 puis 14 jours en 2020-2021 durant lesquels Q2 a été dépassé. Par ailleurs le site de Virey (site 1) connaît les mêmes tendances. Cette sensibilité à l'hydrologie apparaît également en négatif durant les périodes 2016-2017 et 2018-2019 lors desquelles les mobilités sont plus faibles en lien avec une absence de débit supérieur au débit biennal. Nous n'avons cependant pas de corrélation statistique significative entre le nombre de >Q2 et les distances moyennes, maximales ou les taux de mobilisation.

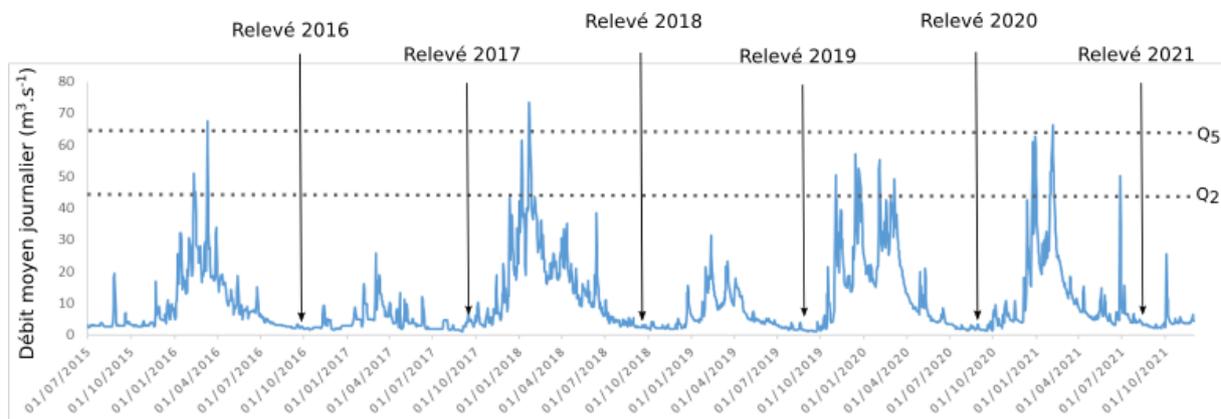


Figure 32 : Débits moyens journaliers à la station de Saint Aubin de Terregatte entre octobre 2016 et octobre 2021 (source : Banque Hydro).

L'importance des distances maximales et moyennes sur le site 1 durant la période 2016-2017 sont pour l'essentiel influencées par le déplacement d'un seul traceur (14 mètres) mais n'a depuis plus été mobilisé quel que soit les débits de crue (figure carte Virey).

3.5. Chimie des affluents

Les superficies correspondant aux sous-bassins affluents sont résumées dans le tableau 6 : les plus étendus sont les bassins de l'Airon, du Lair, de l'Yvrande et du Vaux Roux. Les concentrations mesurées sur les affluents sont généralement du même ordre de que celles mesurées sur la Sélune à Virey et Signy (Figure 33). On note toutefois des valeurs un peu plus élevées en silice dissoute et en nitrates sur plusieurs affluents, et deux stations qui se démarquent un peu des autres : l'Yvrande (P7) présente des concentrations en chlorures et sulfates 2 à 3 fois plus élevées que le reste des affluents, et la station des Foucrais (P5) présente de fortes concentrations en phosphore total et dissous (PO4) et les concentrations en nitrates avec une moyenne de 26mg/L (Figure 33). Ce bassin est majoritairement occupé par des prairies (40% de sa surface) et peu par des cultures (26% de sa surface). Enfin, la station en amont de la RQB (P13) présente des pics importants et variables en MES (coefficient de variation de 65%) et correspond à un petit bassin versant (d'une surface inférieure au dixième de celle à Signy). Les concentrations des affluents semblent stables entre les campagnes comme en témoigne le coefficient de variation inférieur à 30% (Annexe 7).

Tableau 6 : Nom des points de prélèvements nommés d'amont (P1) en aval (Signy) et surface des bassins correspondant.

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 (carrière)	1119
P4	Pont de la république (affluent)	351
P5	Les Foucrais	219
P6	Lecusset (route)	164
P7	Route de l'Yvrande	1769
P8	La Bouffetière les Biards (chemin opposé)	184
P9	Le Lair (Pont Martin)	5513
P10	L'isolant RD	613
P11	L'isolant RG	
P12	La fiéffé 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 Gaubardière/la Larderie	289
Signy	Signy	77089

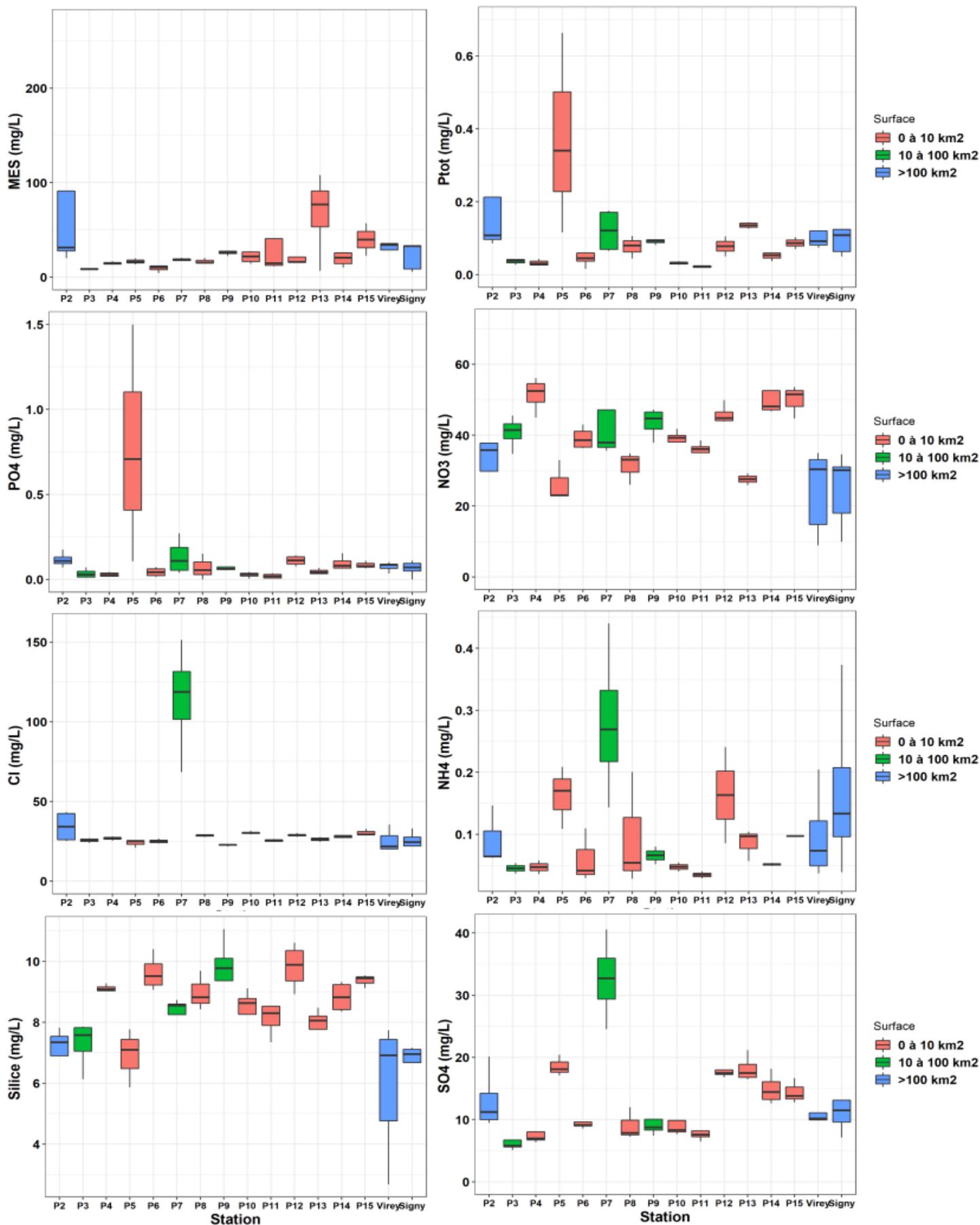


Figure 33 : Concentration des affluents en éléments dissous et particulaires aux différentes dates de prélèvement.

Comme le montre la *Figure 34*, il y a peu de corrélation entre les éléments chimiques et l'occupation des sols, la pente moyenne, ou la taille des bassins versants correspondant aux affluents. Les corrélations les plus fortes sont celles entre le phosphore et la proportion de surfaces en cultures pérennes et celle des surfaces minérales et urbaines, cette dernière corrélation suggère un effet des rejets de P domestiques ou industriels. Il y a aussi une corrélation entre les MES et les surfaces occupées par les cultures d'été, que l'on peut interpréter comme liée à un risque accru d'érosion des sols sur ces surfaces.

Concernant les questionnements relatifs à la synchronie des dynamiques de concentrations, il nous faut encore poursuivre les campagnes en ciblant systématiquement un prélèvement en basse eaux et un autre en hautes eaux pour y répondre. Ces 2 campagnes annuelles initialement prévues ont été perturbées par les événements sanitaires.

Concernant la hiérarchisation des flux apportés par les affluents, une reconstitution des débits sur les stations des affluents est actuellement à l'étude en mobilisant les données de la banque HYDRO et un modèle à base géomorphologique (de Lavenne, A., 2013).

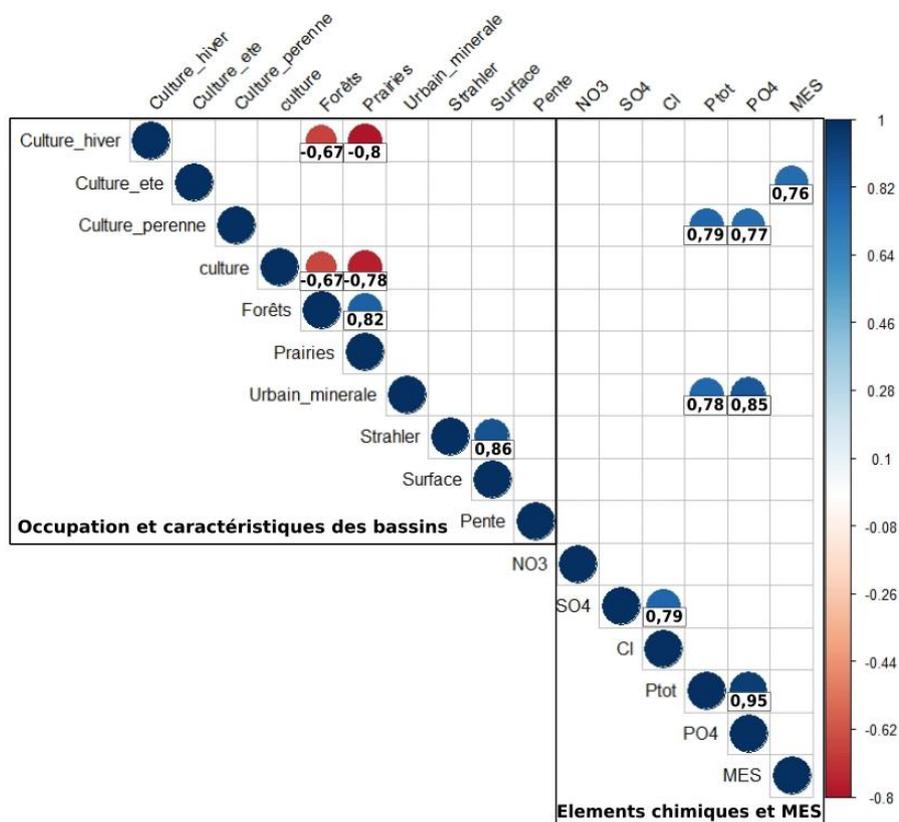


Figure 34 : Matrice de corrélation et coefficients de corrélation entre les différents paramètres des bassins versants des affluents. Seules les corrélations dont la valeur absolue du coefficient est supérieure à 0,6 ont été retenues.

Ce qu'il faut retenir en résumé des observations géomorphologiques et des flux hydrologiques, sédimentaires et chimiques

Les débits spécifiques sont semblables à l'amont et à l'aval depuis l'état initial et dépendent directement des lames d'eau précipitées à l'échelle annuelle. L'arasement du barrage de Vezins n'a donc pas d'effet important sur les flux d'eau annuels sauf peut-être un retour à une variabilité des débits à l'aval plus proche de celle de l'amont.

Les barrages induisaient un réchauffement et un tamponnage thermique des eaux. L'arasement du barrage de Vezins s'accompagne d'une baisse de ce réchauffement (+0,52°C depuis le début des travaux contre +0,99°C avant les travaux à Signy), et d'une baisse de l'effet tampon visible à l'exutoire de la RQB.

Les flux spécifiques de matières en suspension sont toujours nettement supérieurs à l'amont avec un taux d'abattement de 66 à 83 % selon les années, et sont, quelle que soit la station, directement dépendant des débits donc des précipitations annuelles. Les concentrations en MES à l'aval ont augmenté depuis le début des travaux mais restent inférieures à celles de l'amont, le barrage de la RQB jouant toujours le rôle de rétention vis-à-vis des sédiments fins.

Les flux annuels spécifiques de Phosphore, des anions majeurs et de silice dissoute sont aussi directement dépendants des débits donc des précipitations annuelles. L'effet tampon des retenues notamment l'atténuation des variations de concentrations en crue (les augmentations pour Phosphore ou NH₄ comme les dilutions pour NO₃, Cl...) semble moins important depuis le début des travaux. Les flux spécifiques de phosphore à l'aval ont considérablement augmenté depuis l'arasement du barrage en dépassant ceux calculés à l'amont. Une augmentation des nitrites suite au début des travaux semble avoir eu lieu transitoirement en réponse aux opérations de gestion sédimentaire. Elle peut s'attribuer à la remise en contact de la colonne d'eau avec des sédiments de la zone anoxique qui relarguerait nitrites, et ammonium dans une moindre mesure.

D'un point de vue géomorphologique, aucun signal de propagation aval d'incision ou pavage n'a pu être mis en évidence malgré des puissances fluviales spécifiques non négligeables (entre 30 et 45w.m⁻²) et une mobilité moyenne des sédiments grossiers constitutifs des radiers de l'ordre de 1m par an. Cette absence de signal peut être expliquée par la très forte anthropisation du chenal et ses berges (anciennes pêcheries, anciens moulins, protection de berge...) ainsi que potentiellement par le remaniement sédimentaire des zones de radiers lié au frai des poissons migrateurs (lamproie et saumon).

En ce qui concerne les affluents, une forte variabilité spatiale et temporelle est surtout observée pour le phosphate comme en témoignent les coefficients de variations supérieurs à 30% pour cet élément sur la majorité des affluents échantillonnés. Il ne semble pas y avoir de corrélation marquée entre les occupations du sol ou leur part relative et la chimie de l'eau.

Conclusion

Le bassin de la Sélune est soumis à une variabilité hydro-climatique qui induit une variabilité des concentrations en éléments solides et dissous. Outre l'influence climatique, certains paramètres suivis sur la Sélune montrent déjà une réponse à la vidange et l'ouverture du barrage de Vezins. C'est notamment le cas des flux spécifiques de phosphore à l'aval qui ont dépassé ceux calculés à l'amont. Néanmoins, deux ans après l'arasement, l'influence du barrage de la Roche-Qui-Boit est toujours observable sur les températures et les concentrations en MES.

Les résultats majeurs des observations sont :

- La variabilité interannuelle des flux d'éléments liée à celle des flux d'eau ;
- L'augmentation des concentrations de MES à l'aval depuis le début des travaux mais une différence granulométrique amont/aval encore importante (cf. *Rapport 2019*) ;
- L'augmentation des concentrations de phosphore à l'aval depuis le début des travaux;
- Une diminution de matière organique a priori d'origine plutôt aquatique au sein des cours d'eau à l'aval des barrages. Cette origine de la phase organique des MES sera étudiée plus finement dans les prochaines années à l'aide de marqueurs moléculaires.

L'abaissement de la cote menant à la vidange de la retenue de la RQB était initialement prévue à partir de fin septembre 2021. Suite aux décisions gouvernementales, celle-ci a été repoussée au printemps 2022. L'année hydrologique 2022 marquera certainement la dernière année de la période travaux et précèdera le retour d'un écoulement libre de la Sélune.

Annexes

Annexe 1 : Error nomograph parameters for different sampling intervals and reporting periods (1, 3 and 5 years): $y = ux^2 + vx$, where $x = M2\%$ and $y = e50$ (bias), $e10$ (10th imprecision percentile), $e90$ (90th imprecision percentile), Moatar et al, 2013)

d	Bias for $b_{50sup} < 0$									Bias for $b_{50sup} < 0$								
	1 year			3 years			5 years			1 year			3 years			5 years		
	u	v	R ²	u	v	R ²	u	v	R ²	u	v	R ²	u	v	R ²	u	v	R ²
3	0	-0.0002	0.01	0	-0.0003	0.00	0	0.0007	0.04	-0.0008	0.0080	0.52	-0.0001	-0.005	0.08	0.0000	-0.0087	0.07
5	0	0.028	0.18	0	0.019	0.11	0	0.010	0.13	-0.002	0.018	0.77	-0.001	0.011	0.55	-0.0007	0.0003	0.41
7	0	0.056	0.27	0	0.034	0.26	0	0.018	0.22	-0.003	0.019	0.85	-0.002	0.009	0.64	-0.001	-0.003	0.53
10	0	0.083	0.28	0	0.046	0.24	0	0.032	0.12	-0.005	0.030	0.83	-0.003	0.035	0.74	-0.002	0.017	0.65
15	0	0.121	0.37	0	0.079	0.35	0	0.057	0.36	-0.006	0.005	0.89	-0.003	0.021	0.80	-0.002	-0.002	0.68
20	0	0.166	0.33	0	0.102	0.29	0	0.085	0.33	-0.008	-0.031	0.91	-0.004	0.011	0.83	-0.003	0.000	0.74
25	0	0.217	0.34	0	0.138	0.30	0	0.107	0.31	-0.008	-0.093	0.92	-0.005	0.011	0.83	-0.004	-0.010	0.73
30	0	0.255	0.34	0	0.165	0.29	0	0.130	0.25	-0.009	-0.140	0.91	-0.007	0.039	0.91	-0.005	-0.003	0.81
60	0	0.419	0.36	0	0.230	0.34	0	0.167	0.21	-0.007	-0.524	0.90	-0.008	-0.127	0.93	-0.007	-0.049	0.91

d	10th imprecision percentile - e_{10}									90th imprecision percentile - e_{90}								
	1 year			3 years			5 years			1 year			3 years			5 years		
	u	v	R ²	u	v	R ²	u	v	R ²	u	v	R ²	u	v	R ²	u	v	R ²
3	-0.005	-0.289	0.91	-0.003	-0.183	0.88	-0.002	-0.152	0.88	0.002	0.350	0.85	0.002	0.201	0.88	0.002	0.163	0.87
5	-0.005	-0.445	0.93	-0.004	-0.242	0.92	-0.003	-0.198	0.91	0.003	0.513	0.82	0.003	0.285	0.86	0.003	0.245	0.84
7	-0.004	-0.584	0.94	-0.004	-0.331	0.93	-0.003	-0.275	0.93	0.003	0.639	0.81	0.004	0.355	0.84	0.003	0.311	0.81
10	-0.004	-0.689	0.94	-0.005	-0.365	0.93	-0.004	-0.302	0.93	0.003	0.784	0.83	0.004	0.463	0.81	0.003	0.382	0.82
15	-0.003	-0.894	0.94	-0.005	-0.496	0.94	-0.004	-0.395	0.94	0.0005	1.019	0.82	0.003	0.620	0.80	0.003	0.517	0.77
20	0	-1.162	0.95	-0.004	-0.619	0.95	-0.004	-0.505	0.95	0	1.100	0.77	0.003	0.735	0.85	0.003	0.601	0.83
25	0	-1.234	0.94	-0.004	-0.721	0.95	-0.004	-0.574	0.96	0	1.150	0.74	0.002	0.879	0.81	0.003	0.701	0.74
30	0	-1.290	0.92	-0.003	-0.821	0.95	-0.004	-0.645	0.96	0	1.200	0.69	0	1.100	0.83	0	1.010	0.83
60	0	-1.509	0.86	0	-1.224	0.94	0	-1.079	0.96	0	1.250	0.38	0	1.200	0.70	0	1.095	0.76

Annexe 2 : Tableau des précipitations et des lames d'eau écoulées à l'amont et à l'aval des différentes années hydrologiques étudiées

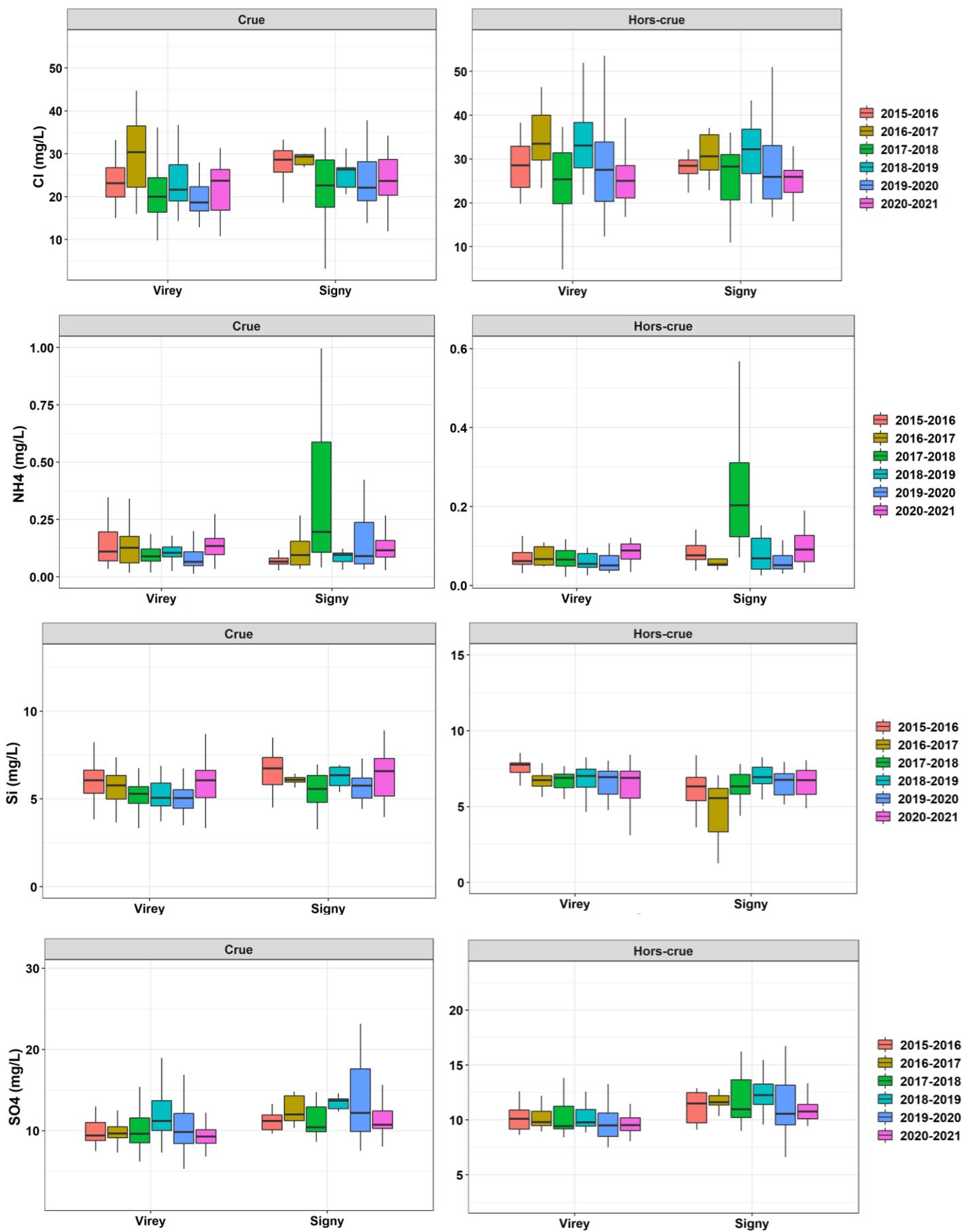
	2015-2016	2016-2017	2017-2018	2018-2019	2019-2020	2020-2021
Virey (mm)	430	145	651	255	691	448,9
Signy (mm)	443	174	652	253	602	510,1
Précipitations (mm)	757	587	1064	643	1111	729,3

Annexe 3 : Tableau des températures moyennes annuelles sur les différentes station

Température (°C)	Virey		RQB		Signy	
	Moyenne	Ecart-Type	Moyenne	Ecart-Type	Moyenne	Ecart-Type
2015-2016	12,19	3,81	13,24	4,16	13,03	4,18
2016-2017	11,9	5,69	12,98	5,60	13,04	5,53
2017-2018	12,47	4,33	13,34	4,94	13,2	4,89
2018-2019	12,37	4,74	12,96	5,02	12,83	5,04
2019-2020	13,02	3,88	13,62	4,37	13,44	4,35
2020-2021	12,21	4,03	12,75	4,41	12,66	4,35

Annexe 4 : Tableau des régressions linéaires entre MES et turbidité établies pour les différentes périodes et chaque station.

Virey	Période	a	b	R²
EQ-V1	2015-2017	1,91	-16,51	0,96
EQ-V2	2015-2018	1,99	-22,23	0,95
EQ-V3	2017-2018	2,14	-22,46	0,96
EQ-V4	2015-2019	1,46	16,93	0,77
EQ-V5	2015-2020	1,43	21,20	0,85
EQ-V6	2015-2021	1,46	19,15	0,85
Signy	Période	a	b	R²
EQ-S1	2015-2017	3,36	-8,20	0,84
EQ-S2	2015-2018	0,84	7,04	0,88
EQ-S3	2017-2018	0,89	1,97	0,96
EQ-S4	2017-2019	0,88	2,48	0,96
EQ-S5	2017-2020	0,83	5,28	0,92
EQ-S6	2017-2021	0,85	5,43	0,91



Annexe 5 : Distribution en boxplots des chlorures, ammonium, silice et sulfates par type d'écoulement et par année hydrologique (NB les échelles diffèrent selon les graphiques)



GIP LABOCEA

7 rue du Sabot - CS 30054 - 22440 PLOUFRAGAN

Tél. 02 96 01 37 22 - Fax 02 96 01 37 50

contact22@labocea.fr

N° SIRET : 130 002 082 00043 - Code APE : 7120 B

RAPPORT D'ESSAI 21-019471 - 0

Prélevé

INRAE RENNES
65 RUE DE SAINT BRIEUC
35042 RENNES CEDEX

INRAE RENNES
65 RUE DE SAINT BRIEUC
35042 RENNES CEDEX

Débiteur :

INRAE SBFC FACTURES

Les données en bleu ont été fournies par le client.

Dossier n° : 21-019471	EAU DE RIVIERE
Vos références : O. FOVET	BC N°1069-000008483/1 / Devis 2021-1787
Analyses réalisées entre le 21/07/2021 et le 28/07/2021	
Echantillon n° : 21-019471-001 - 21HY021281	EAU DE RIVIERE
Matrice : Eau de surface	
Reçu le : 21/07/2021 à 08:49	

Paramètres Physico-chimiques

Analyse	Site	Résultat	Unité	Critère	LQ	Référence Méthode	Méthode
Carbone Organique Total (COT)	P	3,4	mg(C)/l		< 0,30	NF EN 1484	Oxydation-délect ^{IR}
Carbone Organique Dissous (COD)	P	3,4	mg(C)/l		< 0,30	NF EN 1484	Filtrat ^{IR} -Oxydat ^{IR}
Phosphore Total	P	0,25	mg(PO4)/l		< 0,03	Méthode interne CEAU-MO-0078	Oxydat ^{IR} -colo. autom.
	P	0,08	mg(P)/l		< 0,01	Méthode interne CEAU-MO-0078	Oxydat ^{IR} -colo. autom.
	P	0,19	mg(P2O5)/l		< 0,02	Méthode interne CEAU-MO-0078	Oxydat ^{IR} -colo. autom.

Préparation des métaux et minéraux

Métaux: Minéralisation et filtration	P	Analyse des métaux sur échantillon non minéralisé
	P	Analyse des métaux sur échantillon non filtré

Minéraux et Métaux

Analyse	Site	Résultat	Unité	Critère	LQ	Référence Méthode	Méthode
Cuivre	P	0,002	mg(Cu)/l		< 0,001	NF EN ISO 17294-2 (T 90-164)	ICP-MS
Zinc	P	0,036	mg(Zn)/l		< 0,0025	NF EN ISO 17294-2 (T 90-164)	ICP-MS
Chrome	P	0,7	µg(Cr)/l		< 0,5	NF EN ISO 17294-2 (T 90-164)	ICP-MS
Cadmium	P	<0,025	µg(Cd)/l		< 0,025	NF EN ISO 17294-2 (T 90-164)	ICP-MS
Nickel	P	4,0	µg(Ni)/l		< 1	NF EN ISO 17294-2 (T 90-164)	ICP-MS

Annexe 6 : Analyse d'eau sous traitée au laboratoire Labocéa sur des échantillons d'eau prélevés le 20/07/2021. Les concentrations observées en cuivre, zinc, chrome, cadmium et nickel, cadmium sont sous les seuils réglementaires fixés par l'OMS et sous les seuils fixés par la directive 2013/39/UE du parlement européen sur le cadmium et le nickel (Normes de Qualité Environnementales_NQE,)

Annexe 7 : Tableau des coefficients de variation des concentrations en éléments chimiques des prélèvements réalisés sur les affluents de la Sélune

Point de prelevement	MES	Ptotal	PO4	NO3	SO4	Cl	Si	NH4
P1	46,4%	4,0%	20,7%	8,2%	6,5%	2,6%	2,7%	NA
P2	23,6%	14,6%	46,8%	6,2%	13,8%	27,6%	12,02%	52,9%
Virey	45,6%	24,6%	36,1%	5,9%	9,1%	20,9%	36,36%	77,7%
P3	14,6%	19,8%	82,7%	11,2%	30,3%	4,8%	10,99%	26,9%
P4	17,5%	25,1%	43,9%	9,5%	27,1%	4,3%	1,31%	33,4%
P5	18,9%	73,8%	90,5%	22,0%	9,2%	11,0%	14,02%	31,0%
P6	38,8%	70,1%	65,2%	8,2%	12,2%	5,5%	6,17%	72,3%
P7	13,5%	50,4%	81,1%	37,7%	20,5%	30,3%	7,58%	44,2%
P8	18,5%	40,5%	111,4%	14,9%	28,6%	2,7%	7,19%	98,3%
P9	13,6%	7,9%	31,3%	9,8%	28,5%	3,1%	12,29%	30,4%
P10	31,1%	13,5%	61,3%	8,0%	30,6%	3,0%	9,51%	21,5%
P11	129,3%	26,5%	75,7%	7,1%	18,1%	2,9%	6,87%	23,4%
P12	48,7%	30,2%	27,2%	6,1%	5,7%	3,5%	7,75%	67,2%
P13	64,5%	6,0%	36,6%	5,2%	11,7%	4,9%	7,39%	29,5%
P14	40,8%	10,7%	58,4%	15,9%	16,6%	3,0%	5,76%	6,6%
P15	61,3%	26,7%	27,5%	9,3%	14,0%	6,7%	2,34%	NA
Signy	80,9%	41,1%	79,8%	7,5%	14,7%	18,1%	8,90%	84,6%

Références

Ali Arkamose ASSANI, Comparaison de la variabilité inter-annuelle des débits en fonction de régimes hydrologiques artificialisés dans un complexe de barrages sur la rivière saint-maurice (québec, canada), Bulletin de la Société géographique de Liège, 44, 2004, 87-96

Bohlin HS., Morth M Carl., Holm G N., 2006. Point source influences on the carbon and nitrogen geochemistry of sediments in the Stockholm inner archipelago, Sweden. The Science of the Total Environment, Volume 366 : 337-349.

Dupas, R., Minaudo, C., Abbott, B.W., 2019. Stability of spatial patterns in water chemistry across temperate ecoregions. Environmental Research Letters 14.

ISO 10304 : Dosage des ions fluorures, chlorures, nitrites, orthophosphates, bromure, nitrate et sulfate dissous par chromatographie des ions en phase liquide. AFNOR, 1995.

ISO 15681 : Dosage des orthophosphates et du Phosphore total par analyse en flux (FIA et CFA). AFNOR, 2005.

ISO 11732 : Dosage de l'Azote ammoniacal – Méthode par analyse en flux (CFA et FIA) et détection spectrométrique. AFNOR, 1997

de Lavenne A., 2013. Modélisation hydrologique à base géomorphologique de bassins versants non jaugés par régionalisation et transposition d'hydrogramme. PhD thesis,. URL. Sciences de l'environnement. Rennes, Agrocampus-Ouest <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-02810356>.

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.

Moatar, F., Meybeck, M., Raymond, S., Birgand, F., Curie, F., 2013. River flux uncertainties predicted by hydrological variability and riverine material behaviour. Hydrol. Process. 27, 3535-3546.

NF T 90 007. Dosage des silicates solubles – Méthode par spectrométrie d'absorption moléculaire. AFNOR, 2001.

NF EN 872 / T90-105. Qualité de l'eau - Dosage des matières en suspension - Méthode par filtration sur filtre en fibres de verre. AFNOR, Juin 2005.

Raymond, S., 2011. Incertitudes des flux transportés par les rivières (Matières en suspensions, nutriments, sels dissous). Vers un système d'optimisation des méthodes de calcul. Université François Rabelais de Tours, p. 290 p.