



HAL
open science

**Programme Sélune. Phase “ Travaux d’arasement ”
Rapport bilan 2021-2022. Dynamique fluviale volet 1
Flux hydriques, sédimentaires et chimiques**

François Meric, Ophélie Fovet, Alain Crave, Anne-Julia Rollet

► **To cite this version:**

François Meric, Ophélie Fovet, Alain Crave, Anne-Julia Rollet. Programme Sélune. Phase “ Travaux d’arasement ” Rapport bilan 2021-2022. Dynamique fluviale volet 1 Flux hydriques, sédimentaires et chimiques. Inrae. 2022, 41 p. hal-04681161

HAL Id: hal-04681161

<https://hal.inrae.fr/hal-04681161v1>

Submitted on 29 Aug 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.



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 2021-2022

Dynamique fluviale

Volet 1

*Flux hydriques, sédimentaires et
chimiques*

Auteurs

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

1 : UMR SAS INRAE-Institut Agro Rennes

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

3 : UMR LETG, Université de Rennes 2-CNRS

Décembre 2022

Liste des figures

FIGURE 1 LOCALISATION DES STATIONS DE SUIVI MULTI-PARAMETRES INRAE ET DES BARRAGES SUR LA SELUNE (EXUTOIRE CONSIDERE : STATION DE SIGNY).....	3
FIGURE 2 STATION INRAE DU PONT DE SIGNY EN AVAL.....	4
FIGURE 3 STATION EDF-INRAE DU PONT DE VIREY A L'AMONT ; A GAUCHE : PRELEVEUR AUTOMATIQUE INRAE ; A DROITE : SONDES EDF.....	5
FIGURE 4 SCHEMA DE L'ENSEMBLE DES ANALYSES REALISEES SUR UN ECHANTILLON D'EAU PRELEVE.....	6
FIGURE 5 A GAUCHE : PRELEVEUR REFRIGERE A LA STATION DE SIGNY (AVAL) ; A DROITE : PRELEVEUR NON REFRIGERE A LA STATION DE VIREY (AMONT).....	6
FIGURE 6 LOCALISATION DES PIEGES A SEDIMENTS DISPOSES DEPUIS AOUT 2021 SUR LA SELUNE, DES CAROTTAGES EFFECTUES LE 2 AOUT 2022 ET DES MOUILLES.....	8
FIGURE 7 RELATION TURBIDITE-MES POUR LA STATION AMONT DE VIREY (EQ-7), INTEGRANT L'ENSEMBLE DES ANNEES DE SUIVI. LA ZONE GRISEE REPRESENT L'INTERVALLE DE CONFIANCE A 95%.....	10
FIGURE 8 RELATION TURBIDITE-MES POUR LA STATION AVAL DE SIGNY (EQ-4), INTEGRANT L'ENSEMBLE DES ANNEES DE SUIVI. LA ZONE GRISEE REPRESENT L'INTERVALLE DE CONFIANCE A 95%.....	11
FIGURE 9 CHRONIQUES DE TURBIDITE (EN ROUGE) ET DEBIT (EN BLEU) A LA STATION DE SIGNY (EN HAUT) ET DE LA RQB (EN BAS), DU 15 MAI AU 1ER SEPTEMBRE 2022. LES 4 PHASES DEFINIES PENDANT CETTE PERIODE SONT AUSSI REPRESENTEES.....	12
FIGURE 10 LOCALISATION DES POINTS DE PRELEVEMENTS SUR LES AFFLUENTS DE LA SELUNE.....	14
FIGURE 11 PRECIPITATIONS ANNUELLES EN FONCTION DE LA LAME D'EAU ECOULEE PAR ANNEE AU 2 STATIONS.....	16
FIGURE 12 PLUVIOMETRIE ANNUELLE EN FONCTION DU FLUX SPECIFIQUE DE MES POUR CHAQUE ANNEE ($R^2_{VIREY} = 0,94$; $R^2_{SIGNY} = 0,86$).....	17
FIGURE 13 FLUX CUMULE DE MES SUR L'ANNEE POUR LES STATIONS AMONT ET AVAL.....	18
FIGURE 14 EVOLUTION TEMPORELLE DU RAPPORT C/N ENTRE LE 01/09/15 ET 01/09/22.....	19
FIGURE 15 EVOLUTION TEMPORELLE DES NITRATES (NO ₃), DES SULFATES (SO ₄) ET DE LA SILICE ENTRE LE 01/09/15 ET 01/09/22.....	20
FIGURE 16 EVOLUTION TEMPORELLE DES MES ET DU PHOSPHORE TOTAL ENTRE LE 01/09/15 ET LE 01/09/22. LES ORDONNEES SONT EN ECHELLE LOG.....	21
FIGURE 17 CONCENTRATIONS EN NICKEL DANS LA COLONNE D'EAU A SIGNY.....	22
FIGURE 18 CONCENTRATIONS EN NICKEL DANS LES SEDIMENTS DE BERGE A SIGNY.....	23
FIGURE 19 CONCENTRATIONS EN NICKEL DES CAROTTAGES EFFECTUES LE 02/08/22.....	24
FIGURE 20 EVOLUTION DES MASSES DE MATIERES SECHES DES DIFFERENTES FRACTIONS GRANULOMETRIQUES MESUREES ENTRE LE 21/09/21 ET LE 18/10/22 AUX STATIONS DE VIREY ET DE LA RQB.....	25
FIGURE 21 CHRONIQUE DES DEBITS DE LA SELUNE A SAINT-AUBIN DE TERREGATE (BANQUE HYDRO) ENTRE 01/09/21 ET 01/10/22. LE RELEVÉ DE L'ANNEE HYDROLOGIQUE 2021-2022 A ETE INDIQUE.....	26
FIGURE 22 CONCENTRATIONS DES AFFLUENTS EN ELEMENTS DISSOUS ET PARTICULAIRES AUX DIFFERENTES DATES DE PRELEVEMENT.....	28

Listes des tableaux

TABEAU 1 LISTES DES PARAMETRES SUIVIS SUR LES STATIONS DE LA SELUNE.....	5
TABEAU 2 LISTE DES PARAMETRES MESURES SUR CHACUN DES AFFLUENTS.....	15
TABEAU 3 RECAPITULATIF DES FLUX DE MATIERES EN SUSPENSION POUR LES STATIONS AMONT ET AVAL POUR LES 7 ANNEES DE SUIVI.....	17
TABEAU 4 RECAPITULATIF DES FLUX SPECIFIQUES DES ELEMENTS CHIMIQUES MESURES, AVEC LES IMPRECISIONS INTERANNUELLES ASSOCIEES. POUR L'ANNEE 2021-2022, L'ENSEMBLE DE L'ANNEE A ETE CONSIDERE POUR LES CALCULS.....	19
TABEAU 5 RECAPITULATIF DES FLUX TOTAUX ET SPECIFIQUES, AINSI QUE DES INCERTITUDES ASSOCIEES, POUR LES STATIONS AMONT (VIREY) ET AVAL (RQB ET SIGNY). CES RESULTATS PRENNENT EN COMPTE LES DONNEES DU 15/05/22 AU 01/09/22 (= 109 JOURS).....	22
TABEAU 6 NOMS DES POINTS DE PRELEVEMENTS NOMMES D'AMONT (P1) EN AVAL (SIGNY) ET SURFACES DES BASSINS CORRESPONDANT.....	27

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

Remerciements :

Que ce soit pour l'acquisition, l'analyse et le traitement des données de cette année 2021-2022, 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 Fauchoux 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 et la rédaction du rapport ; Laura Soissons et Alban Thomas pour la coordination avec les partenaires AESN, DDTM50, DREAL et EDF, et l'avancement du Système d'information (UMR DECOD) ; Ludovic Michel (EDF) et Gwen Glaziou (DREAL) pour le partage de données sur les stations EDF.

Table des matières

Introduction.....	1
1) Contexte et objectifs	1
2) Rappel sur la chronologie du suivi dans la thématique « Dynamique fluviale ».....	1
3) Réalisations 2021-2022 et contenu du rapport	2
Matériels et méthodes	2
1) Dispositifs de suivi	2
a) Localisation des stations.....	2
b) Equipement des stations.....	3
c) Protocole de prélèvement et analyses.....	5
d) Pièges à sédiments et échantillonnage granulométrique	7
e) Suivi de la mobilité de la charge de fond	8
2) Traitement des données	8
3) Méthodes de calcul des flux.....	9
a) Calcul des flux sédimentaires fins	9
b) Vidange du barrage de la Roche-Qui-Boit.....	12
c) Calculs des flux annuels de nutriments et estimation de l'incertitude associée	13
4) Campagne de prélèvements sur les affluents de la Sélune.....	14
Résultats.....	16
1) Hydrologie	16
2) Dynamique des sédiments fins.....	17
a. Flux sédimentaires.....	17
b. Flux chimiques.....	19
c. Evènement de vidange du barrage de la Roche-Qui-Boit	20
3) Transport des sables.....	24
4) Déplacement des particules grossières.....	25
5) Chimie des affluents.....	26
Conclusions.....	29
Perspectives.....	30
Références.....	31
Annexes	32

Introduction

1) Contexte et objectifs

Ce rapport s'inscrit dans le cadre du programme scientifique « Sélune » qui suit l'arasement des barrages sur ce fleuve. Ce programme est financé par l'agence de l'Eau Seine-Normandie et a débuté en 2012. Une convention entre l'INRAE, l'AESN, l'OFB, la FNPF, l'Etat et EDF donne un cadrage pour ces travaux jusqu'en 2027. 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 : [L'Observatoire Sélune](#). Il vise à mesurer la dynamique selon laquelle vont se rétablir les flux, qu'ils soient **hydriques, sédimentaires, chimiques ou biologiques**.

- 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).

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) 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 transitoire de gestion sédimentaire et de démantèlement des barrages, où le remaniement des sédiments a été important (dragage, vidange).
- 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 cette opération 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 au niveau du pont de Signy, en aval des deux barrages (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 gestion sédimentaire ont démarré en septembre 2020 sur le barrage de la Roche-Qui-Boit (RQB) situé plus en aval. 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. Ces travaux doivent s'achever au printemps 2023. 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. Ces travaux doivent s'achever au printemps 2023.

3) Réalisations 2021-2022 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, granulométrie...)
- La maintenance et les éventuelles réparations ou renouvellements des instruments équipant les stations (centrale NetDL) 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 7 années hydrologiques pour le volet flux hydriques, sédimentaires et chimiques sur la période 2015-2022. Les résultats comparent les paramètres amont et aval acquis respectivement sur les stations de Virey et Signy pendant cette dernière année sous l'influence du barrage de la RQB. Cette année a été marquée par la vidange de ce dernier en mai 2022 qui est une étape majeure de la restauration du fleuve.

Matériels et méthodes

1) Dispositifs de suivi

a) 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. 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.

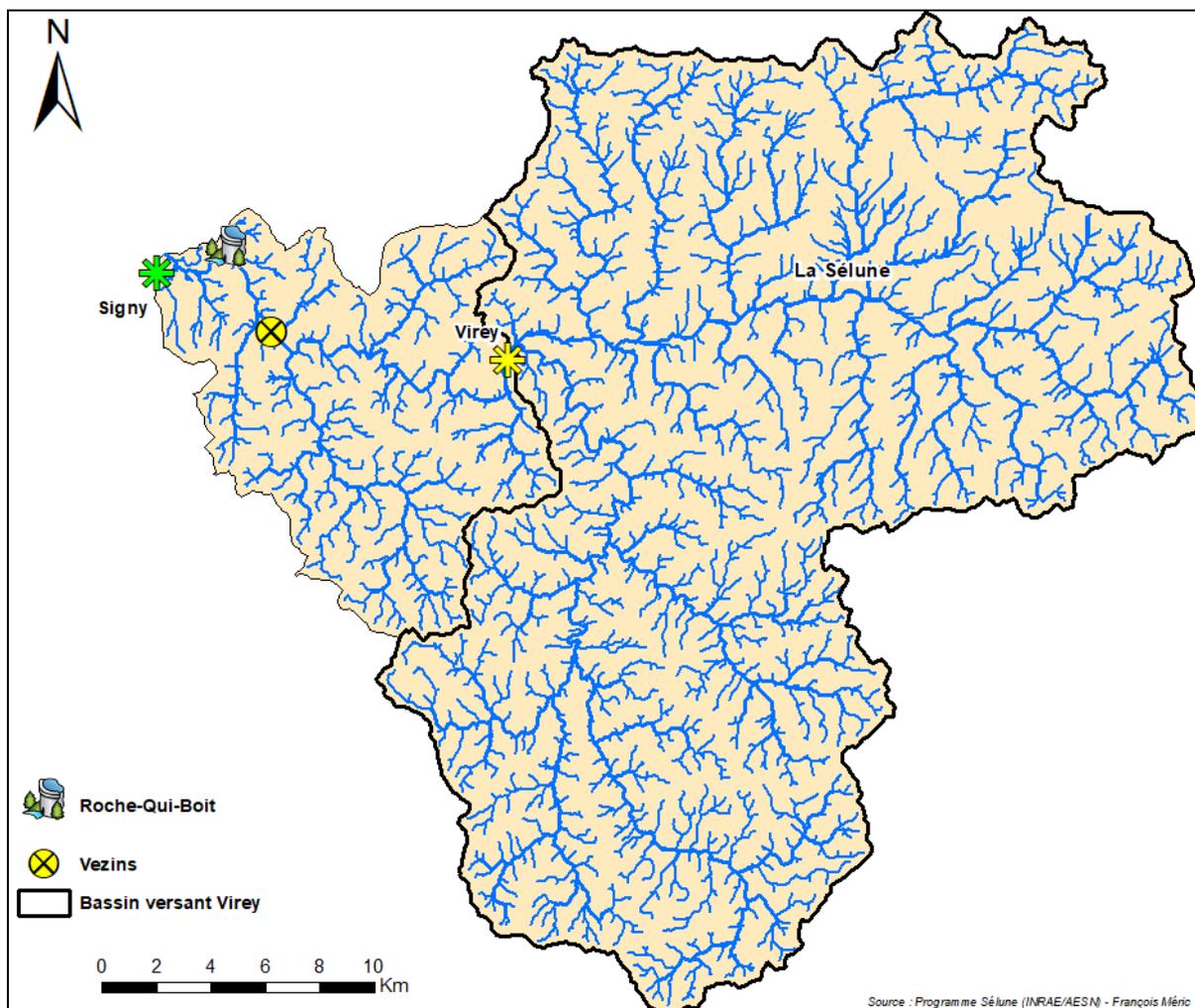


Figure 1 Localisation des stations de suivi multi-paramètres INRAE et des barrages sur la Sélune (exutoire considéré : station de Signy).

EDF avait également 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 suite à l’arasement du premier barrage) et la station de la Roche-Qui-boit en aval du barrage de la RQB qui intègre un bassin versant de 750 km².

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 RQB. Cet emplacement intègre une surface de bassin versant de 777 km². L’acquisition des données par INRAE y est effective depuis fin avril 2014.

b) 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 mais cette dernière est inactive depuis octobre 2021 suite à des incidents techniques non résolus (Tableau 1). Une centrale d'acquisition (NetDL 1000) et un modem GSM permettent le stockage et le rapatriement des données à distance pilotés depuis le laboratoire. Le pas de temps d'acquisition pour l'ensemble de ces paramètres est de 6 minutes. Le débit est obtenu via la mesure de niveau d'eau et une courbe de tarage fournie par la DREAL (mise à jour en décembre 2020), qui réalise des jaugeages depuis 1990 sur cette station. L'entretien des sondes est effectué lors de visites hebdomadaires afin de garantir la qualité des données.



Figure 2 Station INRAE du pont de Signy en aval.

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 (DuoSens) ainsi qu'un modem GSM permettant l'accès et le téléchargement des données à distance. L'entretien des sondes EDF de cette station est 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. La station EDF de Virey est aussi entretenue hebdomadairement par INRAE depuis le 10/08/2021.



Figure 3 Station EDF-INRAE du pont de Virey à l'amont ; à gauche : préleveur automatique INRAE ; à droite : sondes EDF.

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
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	6 min

Tableau 1 Listes des paramètres suivis sur les stations de la Sélune.

c) 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 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 (Figure 5). 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 4cm 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, 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 à cette station.



Figure 5 A gauche : préleveur réfrigéré à la station de Signy (aval) ; à droite : préleveur non réfrigéré à la station de Virey (amont).

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 4), 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 particulaire sont dosées par analyseur élémentaire (NF ISO 10694). La phase dissoute est mesurée sur des échantillons filtrés à $0,45 \mu\text{m}$; la phase particulaire sur des résidus de filtration à ce même seuil de filtration, et le phosphore total sur l'eau brute.

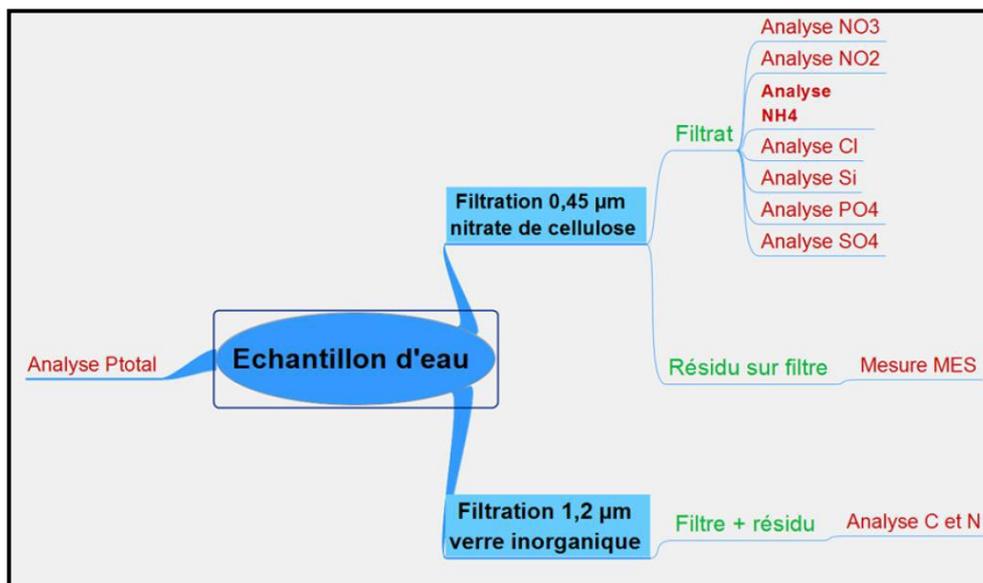


Figure 4 Schéma de l'ensemble des analyses réalisées sur un échantillon d'eau prélevé.

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.

Courant mai 2022, l'ouverture complète du barrage de RQB a engendré le déplacement d'un volume important de sédiments fins qui était contenu à l'amont de RQB. Ces sédiments fins se sont déposés massivement entre 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. En complément, 4 carottages dans des banquettes de sédiments ont été réalisés le 02 août 2022 sur 4 sites (Figure 6) : à l'aval immédiat du barrage de la RQB, à l'aval du pont de Signy, à l'amont du moulin de Quincampoix et au moulin de Quincampoix. Après avoir sondé l'épaisseur de la banquette, 3 profondeurs ont été échantillonnées (surface, milieu et fond). Ces prélèvements ont été faits dans des banquettes de sédiments récentes dont l'origine supposée était la vidange. L'objectif était de suivre l'évolution des concentrations en métaux dans les dépôts successifs de cette période. Toutes ces analyses « métaux » ont été réalisées 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 précédent rapport. Pour rappel, l'objectif de ces pièges est de suivre l'évolution de la granulométrie charriée à l'aval de la RQB et de marquer temporellement le transit vers l'aval des sables stockés à l'amont de la RQB. Il s'agit principalement de mesurer la progression de ce transit 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.

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 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 6). Ces pièges ont été placés entre les mouilles profondes présentes à l'aval de la RQB 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 (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.

Ce suivi a commencé en août 2021 mais a dû être arrêté pendant l'hiver car la hausse des débits rendait impossible la collecte des pièges. Il a repris en mai 2022, avec un relevé toutes les 2 semaines, sauf en crue où ils étaient ramassés au bout d'une semaine. Depuis septembre, les relevés se font toutes les 3 semaines. Les résultats avec et après l'ouverture du barrage ont pu être comparés.

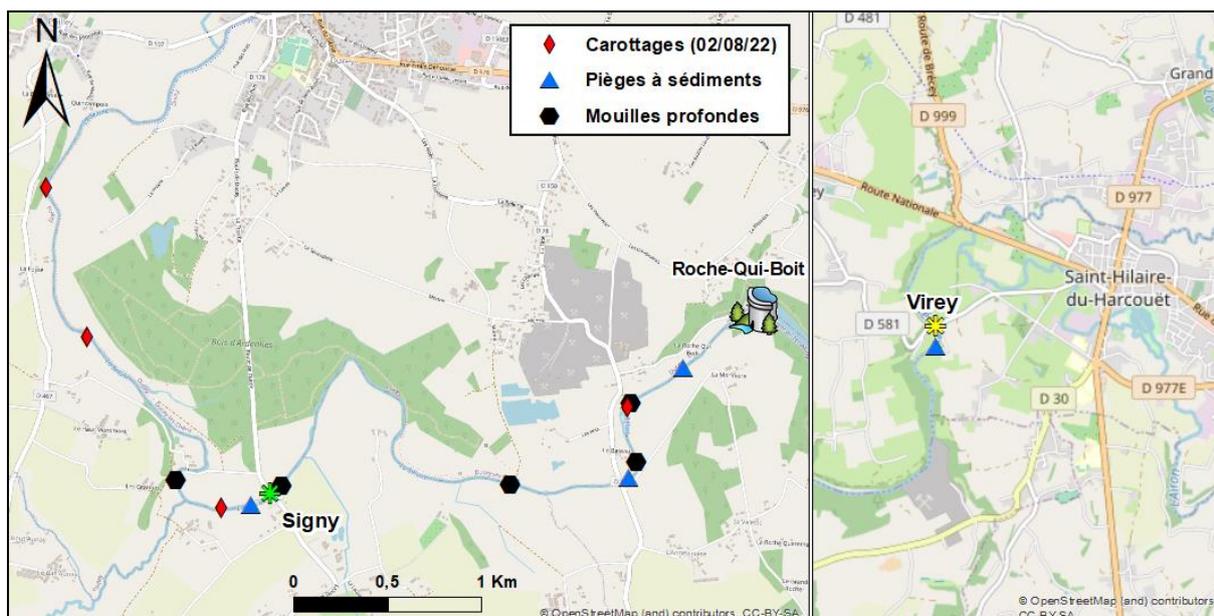


Figure 6 Localisation des pièges à sédiments disposés depuis août 2021 sur la Sélune, des carottages effectués le 2 août 2022 et des mouilles.

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.

Une fois collectés, les pièges sont vidés et leur contenu est brûlé à haute température (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.

Ce suivi a commencé en août 2021 mais a dû être arrêté pendant l’hiver car la hausse des débits rendait impossible la collecte des pièges. Il a repris en mai 2022, avec un relevé toutes les 2 semaines, sauf en crue où ils étaient ramassés au bout d’une semaine. Depuis septembre, les relevés se font toutes les 3 semaines. Les résultats avec et après l’ouverture du barrage ont pu être comparés.

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’acquisition. 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 Météo France de Saint-Hilaire-du-Harcouët (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. La version bêta du système d'information géographique est accessible à l'adresse suivante : <https://geosas.fr/selune>.

3) Méthodes de calcul des flux

a) Calcul des flux 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 :

- Virey : $MES (mg/L) = a_v \times Turbidité (FNU) + b_v$
- Signy : $MES (mg/L) = a_s \times Turbidité (FNU) + b_s$

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 événements 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, 74 crues ont été échantillonnées sur la période 2015-2022. Parmi elles, 46 crues sont mobilisées pour établir la relation d'étalonnage Turbidité/MES (avec un $R^2 > 0,6$). Cela représente 622 couples de points sur la période 2015-2022 (Figure 7) à partir desquels l'équation de calibration a été calculée.

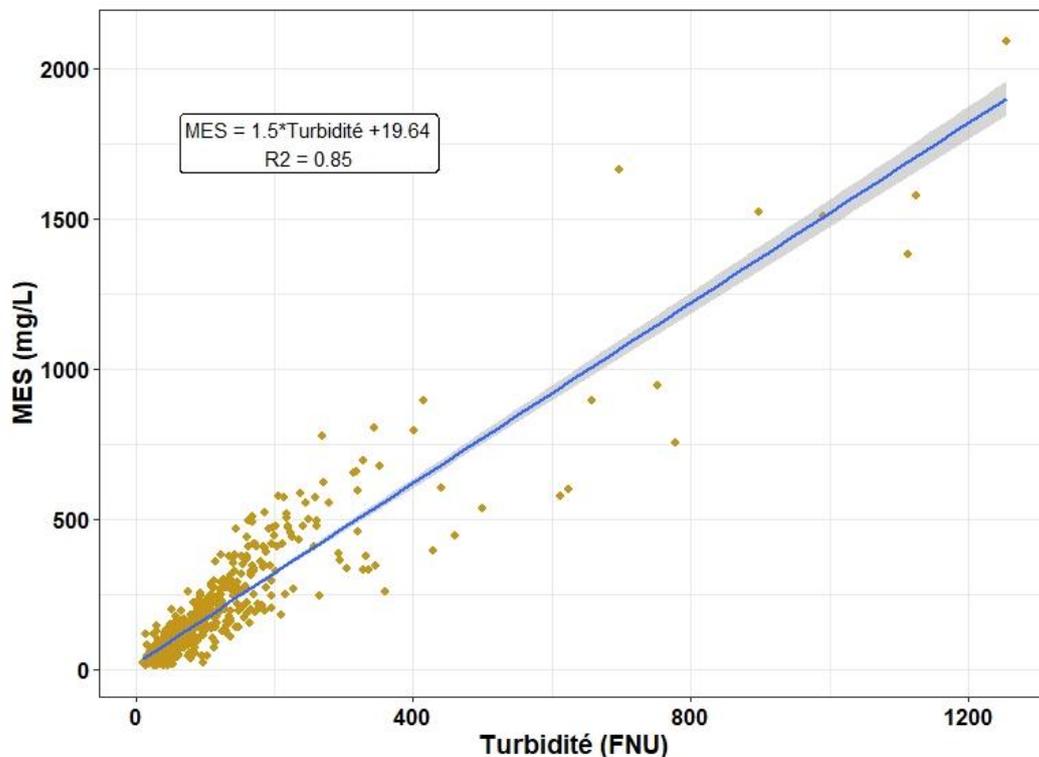


Figure 7 Relation Turbidité-MES pour la station amont de Virey (Eq-7), intégrant l'ensemble des années de suivi. La zone grisée représente l'intervalle de confiance à 95%.

Comme la station de Signy est située en aval des barrages, ses flux sont directement impactés par les différentes phases d'arasement. Les équations sont donc déterminées à partir des données appartenant à la même période (pré-travaux, travaux ou post-travaux). Cette année 2021-2022 a été marquée par la vidange de la RQB débutée le 15 mai 2022 et qui a entraîné une très forte hausse de la turbidité en aval. La relation pour cette année a été établie à partir des données de crues triées ($R^2 > 0,6$) et des données en écoulement de base depuis 2017 (début des travaux de vidange) jusqu'au 15 mai 2022 (soit 500 couples de points et 18 crues) (Figure 8). La période du 15 mai au 1^{er} septembre 2022 a été traitée séparément (voir paragraphe « Vidange du barrage de la Roche-Qui-Boit »).

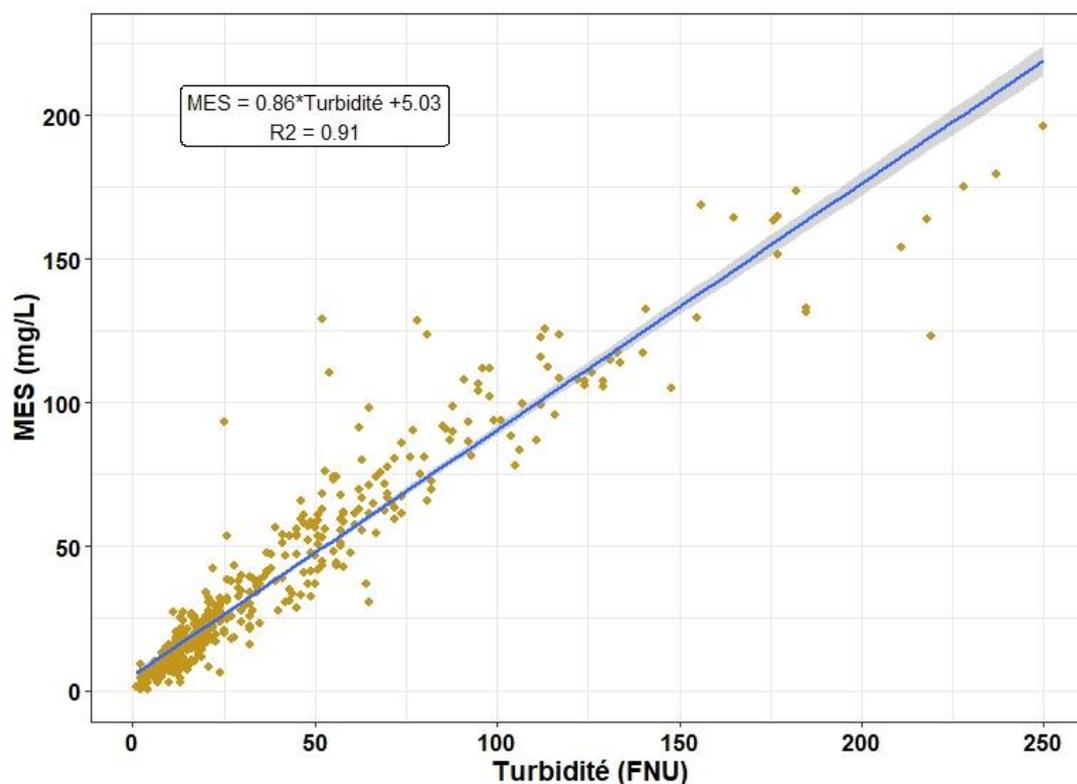


Figure 8 Relation Turbidité-MES pour la station aval de Signy (Eq-4), intégrant l'ensemble des années de suivi. La zone grisée représente l'intervalle de confiance à 95%.

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 Core Team, 2020). Chaque année, nous mettons à jour ces relations avec les nouvelles données acquises, ce qui aboutit au fil des rapports annuels à plusieurs équations pour une même 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 ces calculs de flux est consultable en Annexe 1 et permet de tracer la cohérence des résultats d'une année sur l'autre.

Ces équations permettent d'obtenir des chroniques à haute fréquence de MES à partir de celles de turbidité. Les flux sont calculés en multipliant ces valeurs de MES par le débit associé.

b) Vidange du barrage de la Roche-Qui-Boit

Les flux de sédiments à Signy pendant la période du 15 mai au 1 septembre 2022 ont été calculés séparément du reste de l'année pour plusieurs raisons : (i) la gamme de variation de la turbidité pendant le temps de la vidange était très différente de celle habituellement observée (jusqu'à 1400 NTU), (ii) la nature des particules remises en suspension par l'ouverture du barrage était susceptible d'être différente de celle qui transitaient avant l'arasement de RQB. D'autre part, il y a beaucoup de données manquantes dans les chroniques de turbidité de cette période en raison de problèmes techniques et de sondes ensevelies sous les dépôts massifs de sédiments (environ 1 mois de données manquantes en cumulé).

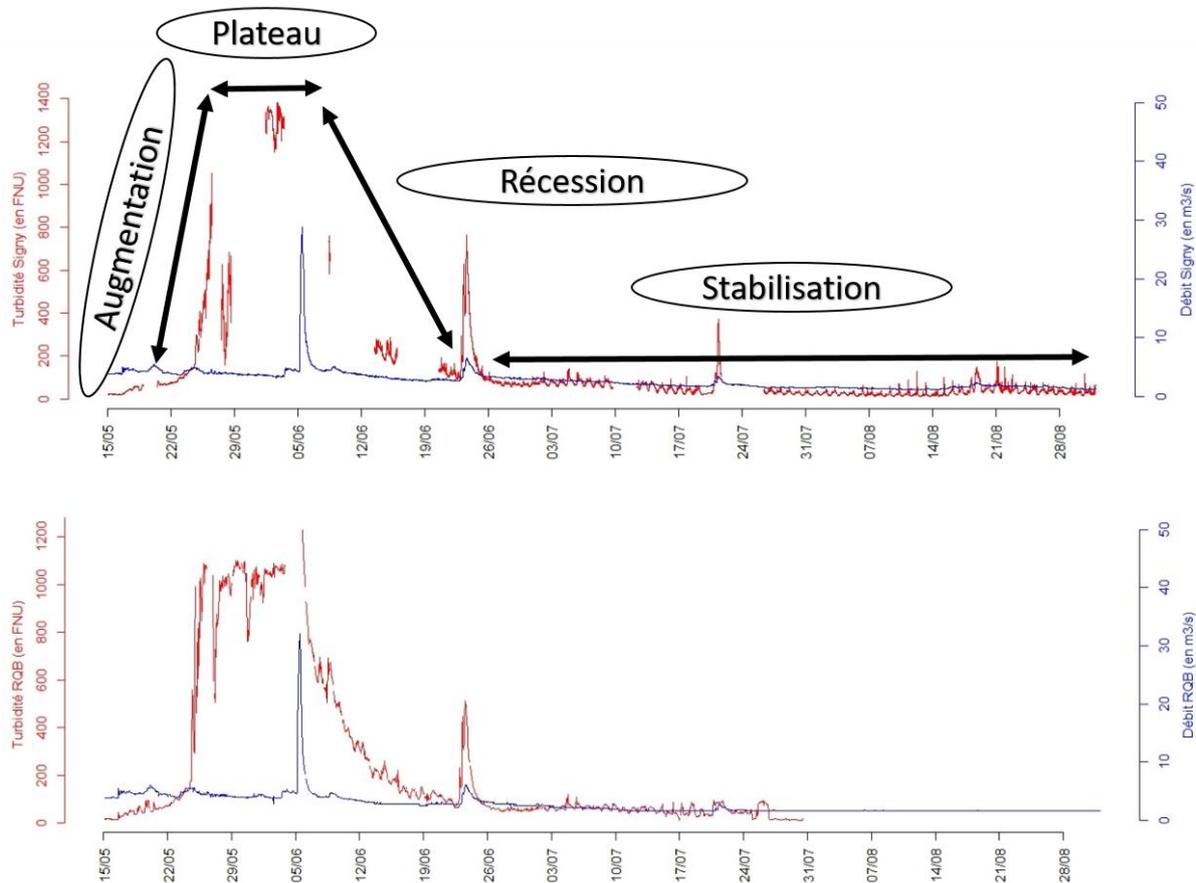


Figure 9 Chroniques de turbidité (en rouge) et débit (en bleu) à la station de Signy (en haut) et de la RQB (en bas), du 15 mai au 1er septembre 2022. Les 4 phases définies pendant cette période sont aussi représentées.

Pour combler ces trous, les données de la station EDF de la RQB ont été utilisées car moins impactées par les dépôts de sédiments fins. Des équations spécifiques à chaque station (RQB et Signy) ont été établies à partir des données de prélèvements in-situ hebdomadaires réalisés pendant cette période de travaux (6 couples MES/Turbidité pour la RQB et 26 pour Signy). Ces équations empiriques spécifiques à cet évènement permettent de déterminer directement les concentrations en MES lorsque la turbidité est mesurée. Pour estimer les concentrations pour les périodes pendant lesquelles aucune valeur de turbidité n'a pu être mesurée :

- La chronique de turbidité a été divisée en 4 phases (Figure 9), où chacune est caractérisée par une gamme de variations de turbidité. Les phases d'augmentation et de récession sont supposées avoir la même relation MES-turbidité.
- Un modèle $MES_{station\ 1} = f(MES_{station\ 2})$ a été calibré pour chacune des phases, à partir des données disponibles aux 2 stations, pendant la même phase (Figure 9),.

Pour chaque courbe de régression, les intervalles de confiance des coefficients ont aussi été calculés à 95% grâce au package « Stats ».

c) Calculs 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) 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 :

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

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., 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 (M_{2%}), des flux d'eau (W_{2%}) 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 ; Moatar et al., 2020) 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 (Annexe 2) décrit précédemment pour tous les flux de nutriments avec la fréquence d'échantillonnage qui est de $d=7$ jours.

4) Campagne de prélèvements sur les 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), 6 campagnes de prélèvements ont été réalisées depuis 2019. 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 chimiques et dans les différents contextes pédoclimatiques nationaux (Dupas et al., 2019).

Au total, 15 points de prélèvements ont été définis sur les affluents (Figure 10). 13 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

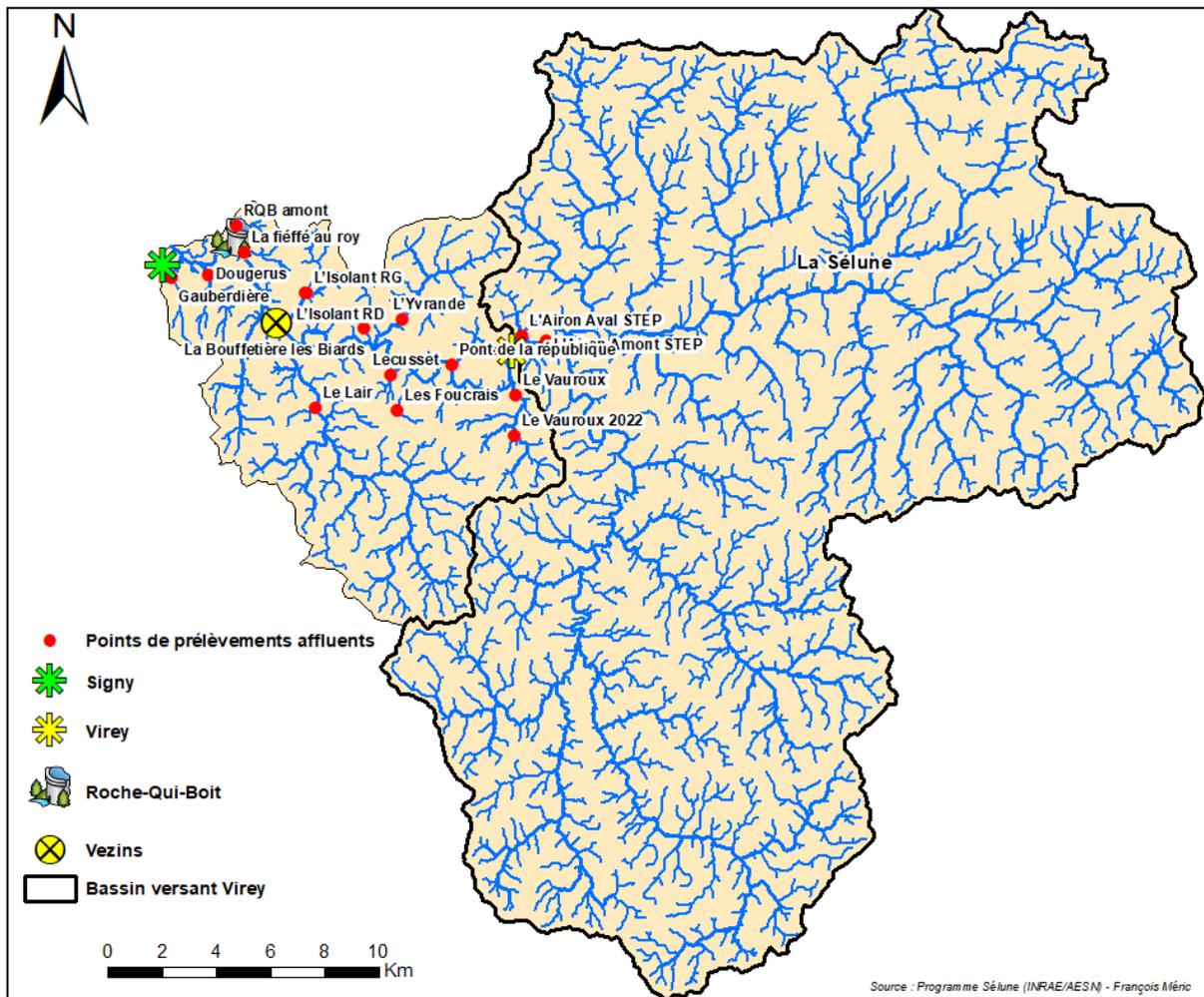


Figure 10 Localisation des points de prélèvements sur les affluents de la Sélune.

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). 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)	
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.

Résultats

Les rapports sur la phase pré-arasement ont mis en évidence un stockage important des sédiments et du phosphore adsorbé dans les retenues, un tamponnage de la dynamique saisonnière des solutés avec les stocks d'eau de ces ouvrages, ainsi que des effets source/puit saisonniers pour certains éléments chimiques (Si, PO₄) attribués à la production biologique dans les réservoirs.

Depuis le début de la période de travaux en 2017, il a été observé une augmentation des concentrations en MES et en phosphore à l'aval, ainsi qu'une diminution de la matière organique d'origine aquatique au profit d'une origine terrigène. Les résultats de 2021-2022 vont permettre de compléter la phase de travaux, avec cette année qui a été marquée par l'évènement de vidange de la RQB en mai/juin 2022.

1) Hydrologie

L'année 2021-2022 a été caractérisée par un été particulièrement sec, avec une très faible pluviométrie et des chaleurs records (Rapport Météo France, 2022). La Figure 11 met en relation les débits spécifiques observés avec la pluviométrie annuelle pour l'ensemble des années suivies sur les stations amont et aval. Sachant que la moyenne pluviométrique annuelle calculée depuis 1968 est de 901 mm, on peut identifier 2021-2022 comme une année sèche avec une pluviométrie annuelle de 666 mm. Les débits spécifiques sont quasiment identiques entre Virey et Signy, avec respectivement 268 et 263 mm. Le débit minimum de cette année a été de 0,56 m³/s pour l'amont (14/08/2022) et 1,15 m³/s pour l'aval (13/08/2022). Ces valeurs n'ont cependant pas atteint celles de 2016-2017 avec respectivement de 0,45 m³/s et 1,05 m³/s. Quant au débit maximum, il était de 44,31 m³/s pour Virey (09/01/22) et 41,32 m³/s pour Signy (09//01/22).

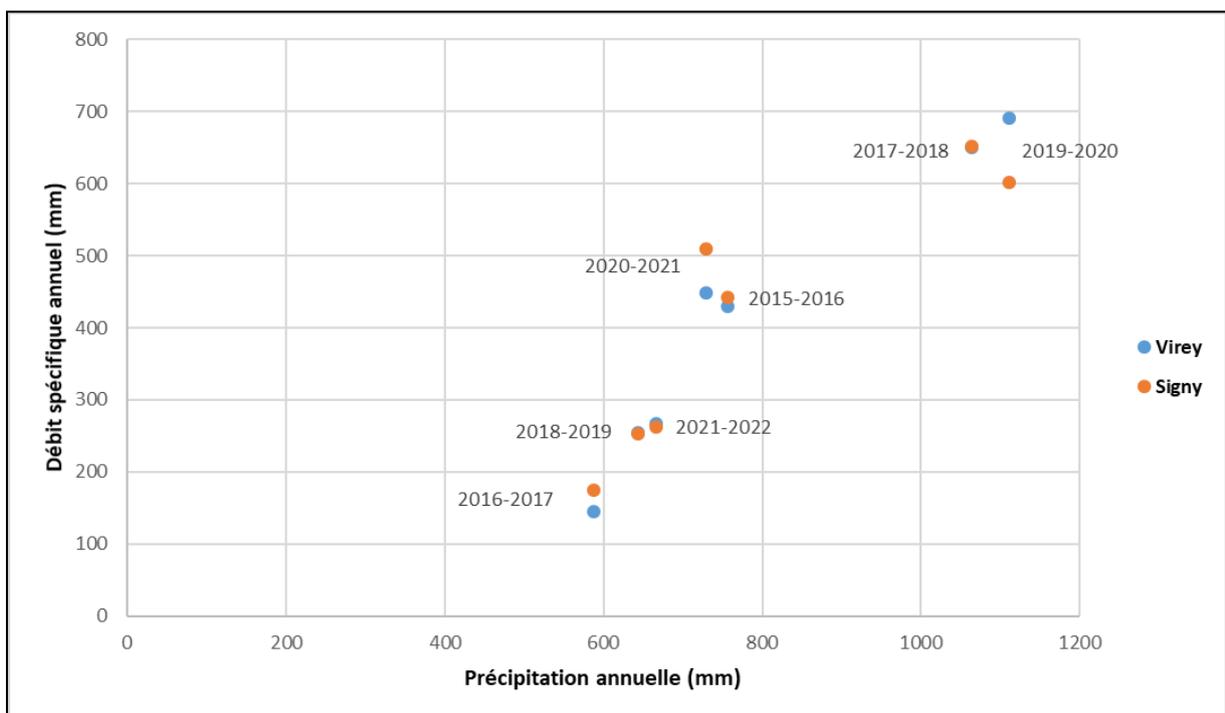


Figure 11 Précipitations annuelles en fonction de la lame d'eau écoulée par année au 2 stations.

2) Dynamique des sédiments fins

a. Flux sédimentaires

Les flux totaux et spécifiques de MES ont été calculés pour les stations amont et aval (Tableau 3). Rappelons que l'année 2021-2022 a été divisée en deux, avec la période de vidange de la retenue de la RQB (du 15/05/22 au 01/09/22) traitée séparément (voir « Vidange du barrage de la Roche-Qui-Boit »). Sur la période du 1^{er} août 2021 au 15 mai 2022, les flux des 2 stations sont parmi les plus faibles sur l'ensemble des années suivies, avec des flux spécifiques de 14,5 T_{MES}/km²/an pour Virey et 6,1 T_{MES}/km²/an pour Signy. On peut remarquer que ces faibles valeurs de flux sont liées à un taux d'abattement minimum de 58%.

Année	Virey			Signy			Abattement (%)
	Flux total (T/an)	Flux (T/km ² /an)	Incertitude %	Flux total (T/an)	Flux (T/km ² /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	36734	58,4	15	12898	16,6	7	72
2018-2019	15977	25,4	14	3186	4,1	10	84
2019-2020	42835	68,1	14	14297	18,4	7	73
2020-2021	21575	34,3	17	9013	11,6	8	66
2021-2022	01/09-15/05	9111	14,5	4731	6,1	8	58
	15/05-01/09	2011	3,2	8795	11,3	75	-253

Tableau 3 Récapitulatif des flux de matières en suspension pour les stations amont et aval pour les 7 années de suivi.

La relation linéaire entre le flux spécifique annuel de MES et la lame d'eau écoulée a été décrite dans le précédent rapport et les points de cette année y ont été ajoutés (Figure 12). Pour rappel, la pente de la relation de Signy est beaucoup plus faible que celle de Virey à cause de la présence des barrages qui bloquaient une grande partie des MES. 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 à l'amont et à l'aval. On peut noter que les années avant et pendant les « travaux » ne se distinguent pas jusqu'ici sur ce graphique. Le barrage de la RQB a efficacement maintenu une fonction de sédimentation des sédiments amont, similaire à celle qui avait lieu lorsque les deux barrages étaient en fonction.

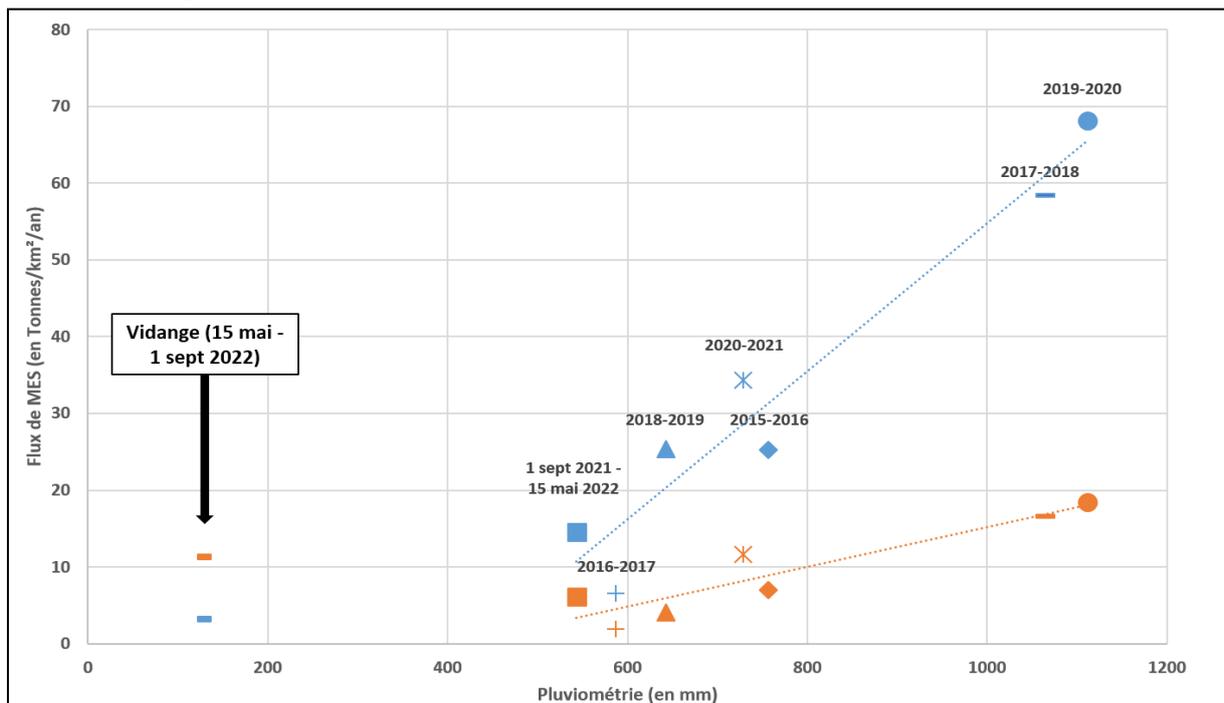


Figure 12 Pluviosité annuelle en fonction du flux spécifique de MES pour chaque année ($R^2_{Virey} = 0,94$; $R^2_{Signy} = 0,86$).

On peut déjà observer pour la période de vidange, que les flux à Signy étaient pour la première fois supérieurs à ceux de Virey, traduisant un déstockage de sédiments dans le tronçon entre Virey et Signy, qu'on peut supposer retenus jusqu'ici par le réservoir de la Roche-Qui-Boit.

La distribution annuelle du flux cumulé de sédiments est assez similaire entre les 2 stations (Figure 13) avec la majorité du flux transportée entre décembre et mai. On observe par contre des différences plus ou moins marquées entre les flux interannuels. Certains sont très irréguliers comme celui de 2016-2017 à Virey, avec une grande partie du flux qui transite lors de quelques épisodes. D'autres années, comme 2015-2016 à Virey ou 2018-2019 à Signy sont beaucoup plus lisses avec un transport

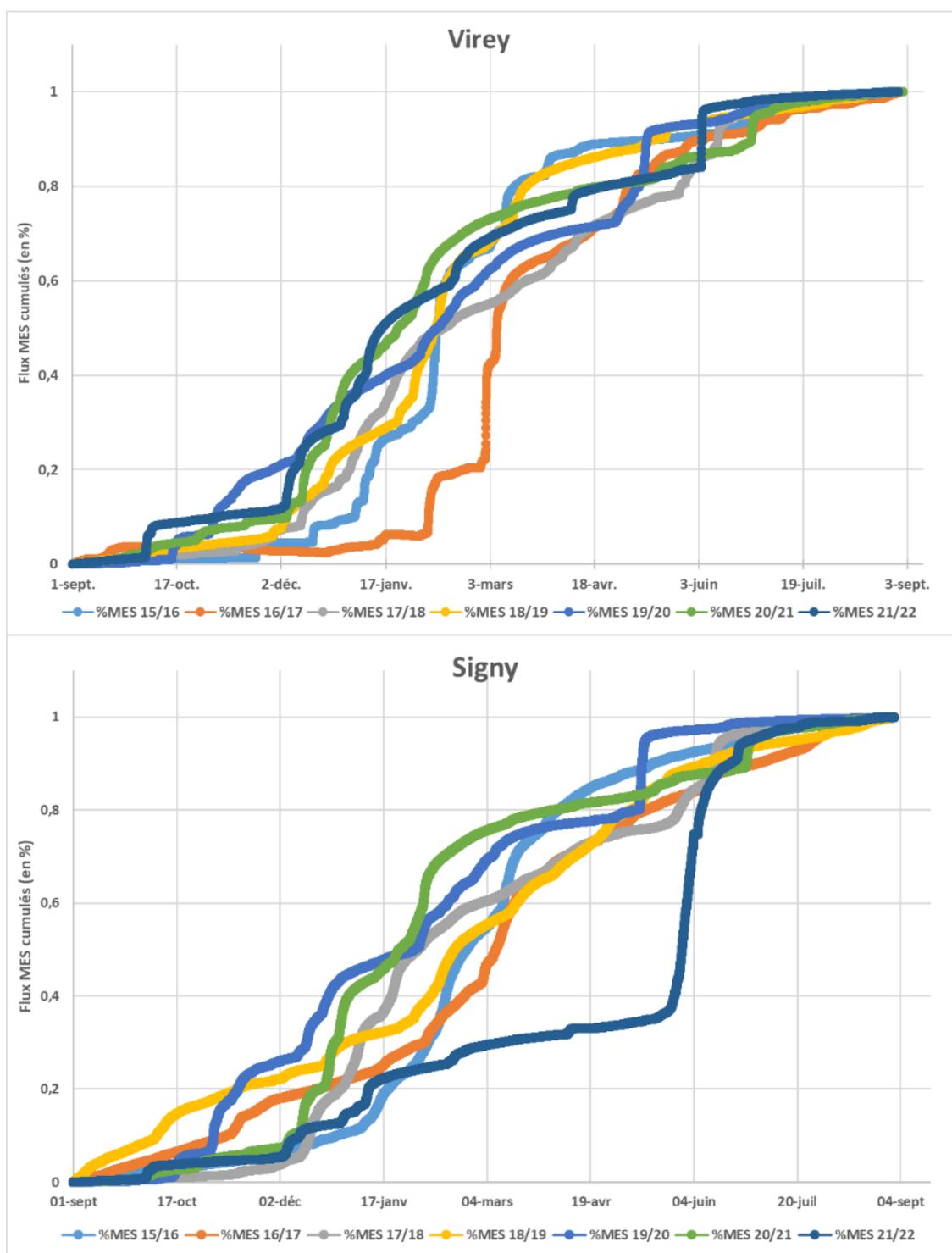


Figure 13 Flux cumulé de MES sur l'année pour les stations amont et aval.

sédimentaire mieux équilibré sur l'année. L'évènement de vidange ressort particulièrement bien sur le graphique de Signy avec presque 60% du flux annuel 2021-2022 transporté en quelques jours.

b. Flux chimiques

Dans les rapports précédents, il a été montré que 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 (Rapport AESN, 2021 ; Annexe 3).

Les flux spécifiques annuels des éléments chimiques ont été calculés pour toutes les années (Tableau 4). Les valeurs les plus élevées se retrouvent pendant les années les plus pluvieuses (2017-2018 et 2019-2020) ce qui indique un contrôle par le flux d'eau. On peut cependant remarquer que pour l'année sèche de 2021-2022, les flux de PO₄ et NO₃ sont très importants. Les travaux d'arasement ne sont pas en cause car on l'observe aux deux stations.

Virey	2015-2016		2016-2017		2017-2018		2018-2019		2019-2020		2020-2021		2021-2022	
	Flux (T/km ² /an)	Imprécision (%)												
Ptotal	28	10	8	10	65	10	11	10	53	10	32	10	34	10
P-PO4	6	5	2	5	12	5	3	5	11	5	6	5	10	5
N-NO3	1927	8	636	8	2681	8	1118	8	2741	8	1929	8	5557	8
SO4	2671	7	1075	7	3798	7	1747	7	4248	7	2769	7	1813	7
Si	1999	7	669	7	2318	7	1062	7	2563	7	1772	7	1222	7
Cl	6267	4	3109	4	7707	4	4763	4	9235	4	6225	4	4224	4

Signy	2015-2016		2016-2017		2017-2018		2018-2019		2019-2020		2020-2021		2021-2022	
	Flux (T/km ² /an)	Imprécision (%)												
Ptotal	12	17	5	17	49	9	14	9	58	9	35	9	43	9
P-PO4	5	19	2	19	11	7	5	7	8	7	9	7	12	7
N-NO3	2409	6	858	6	3545	7	1383	7	3107	7	2744	7	7310	7
SO4	3655	6	1659	6	5418	6	2399	6	5273	6	4337	6	2573	6
Si	2419	8	714	8	3078	6	1288	6	2876	6	2437	6	1539	6
Cl	8302	3	4054	3	10598	3	5484	3	10156	3	8855	3	5523	3

Tableau 4 Récapitulatif des flux spécifiques des éléments chimiques mesurés, avec les imprécisions interannuelles associées. Pour l'année 2021-2022, l'ensemble de l'année a été considéré pour les calculs.

Le rapport C/N permet de jugé 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 indicateur d'une origine plutôt aquatique de la matière organique et un rapport C/N supérieur à 8 est plutôt signe une origine terrigène (Bohlin et al, 2006). On observe à Signy une hausse progressive des valeurs, qui tendent vers celles de l'amont (Figure 14). Cette augmentation peut s'expliquer par une baisse des apports de la production planctonique associée aux lacs de retenue (Fovet et al., 2020). En effet, ces apports aquatiques ont un rapport C/N plus faibles que les apports terrestres et leur disparition entraîne donc une hausse du rapport global de l'eau. Les valeurs à Virey sont relativement stables depuis 2015, avec une moyenne de 9,75.

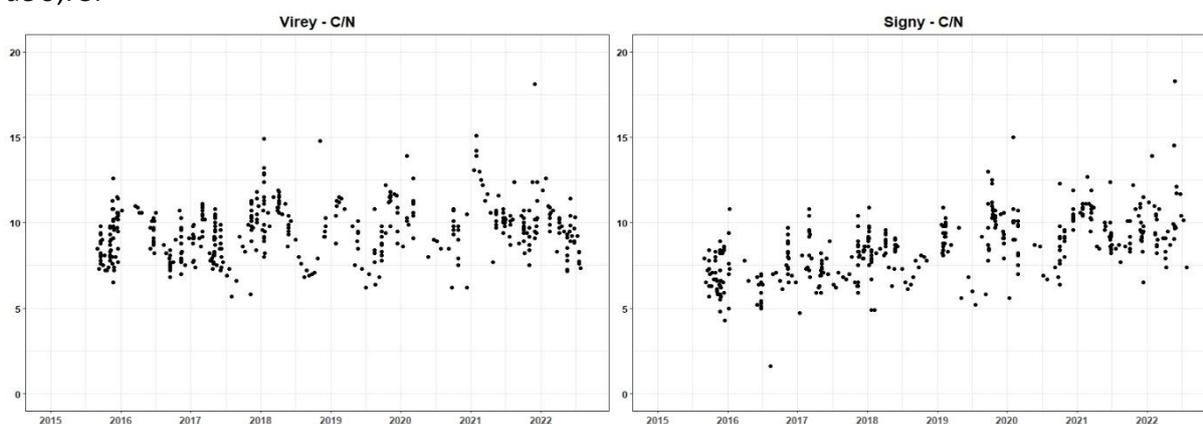


Figure 14 Evolution temporelle du rapport C/N entre le 01/09/15 et 01/09/22.

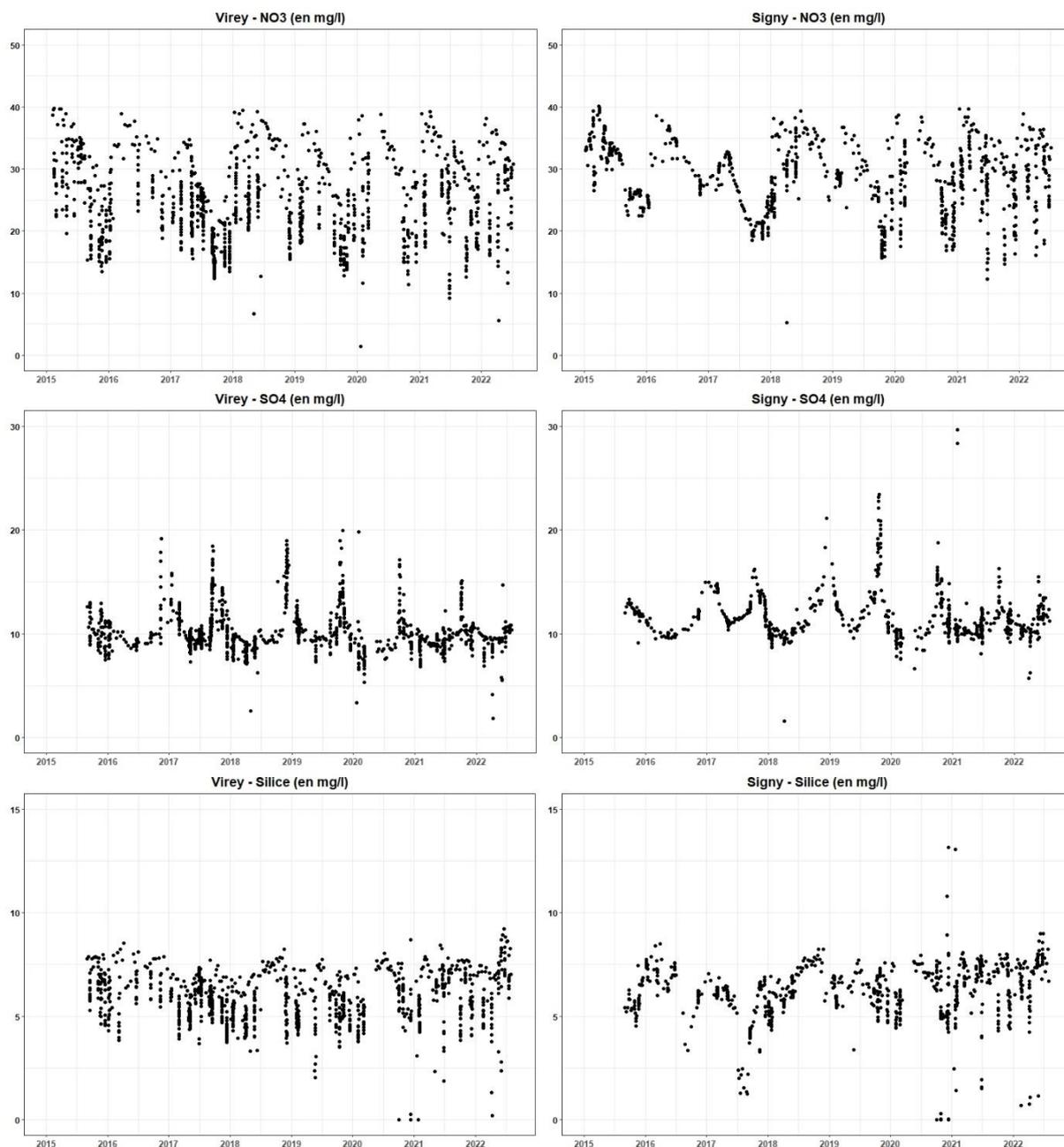


Figure 15 Evolution temporelle des nitrates (NO3), des sulfates (SO4) et de la Silice entre le 01/09/15 et 01/09/22.

Le suivi des concentrations depuis 2015 (Figure 15) permet de remarquer que depuis le début des travaux, on voit une dynamique de crue beaucoup plus marquée à Signy, et qui est semblable à celle de la station amont. En présence des barrages, les stations amont et aval avaient des comportements différents pendant la période pré-arasement, avec des variations beaucoup lissées à l'aval (Fovet et al., 2020).

c. Evènement de vidange du barrage de la Roche-Qui-Boit

Initialement prévu au printemps 2023, cette vidange a finalement commencé le 15 mai 2022. Malgré les travaux de gestion sédimentaire réalisée au préalable, de très grandes quantités de sédiments se sont déversées en aval sur plusieurs kilomètres. Les prélèvements hebdomadaires ont permis de mesurer un pic en matières en suspension de 50,7 g/L le 26/05/22 (Figure 16).

Associées à ces MES, les quantités de phosphore total ont également atteint un maximum avec 92,8 mg/L mesuré le même jour (Figure 16). On peut remarquer que ces gammes de valeurs n'avaient jamais été mesurées depuis 2015 et qu'elles dépassent largement celles de la station amont. Cette forte hausse est très limitée dans le temps et les concentrations redescendent rapidement.

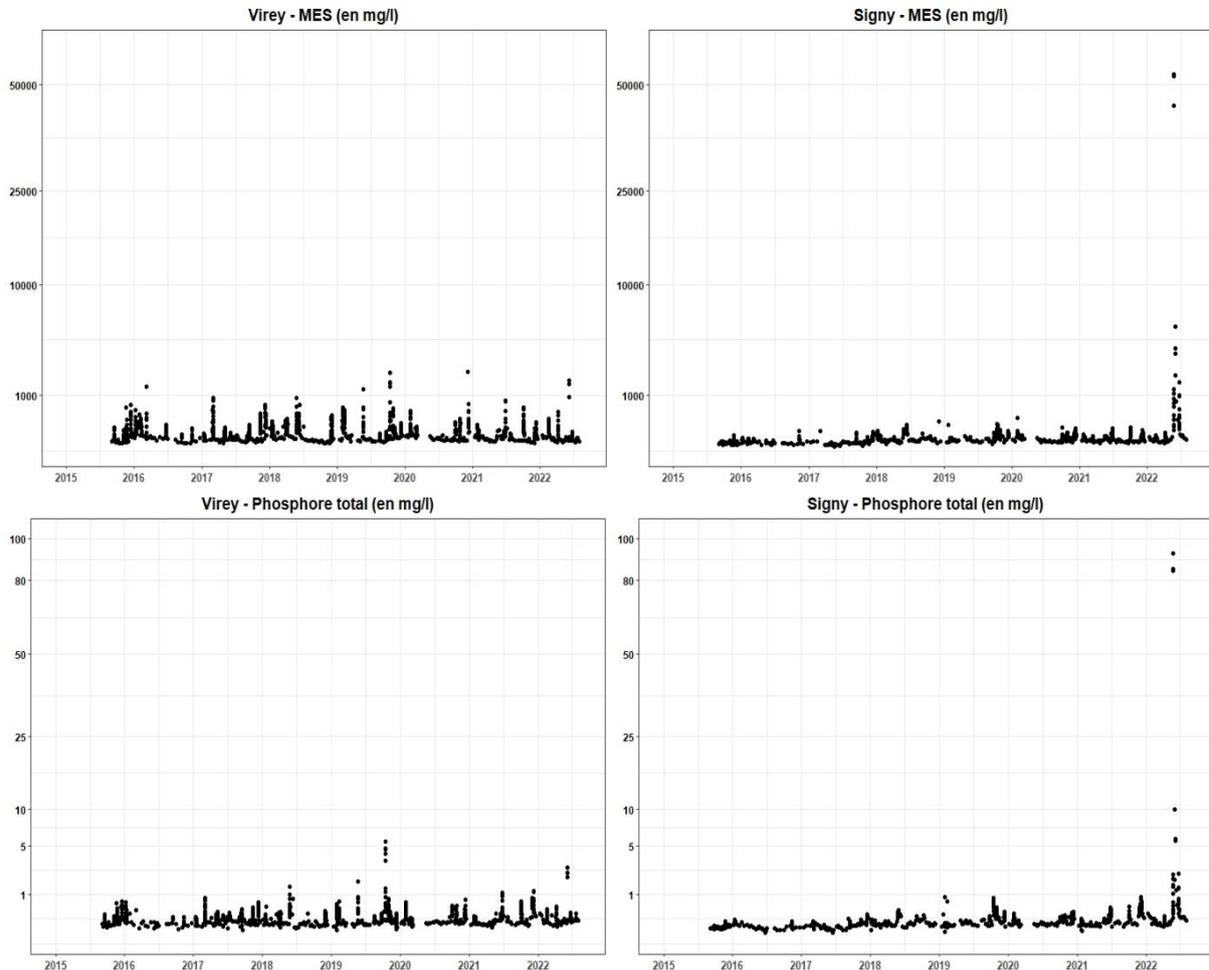


Figure 16 Evolution temporelle des MES et du phosphore total entre le 01/09/15 et le 01/09/22. Les ordonnées sont en échelle log.

i) Estimations des flux de MES

Les estimations des quantités de MES qui ont transitées entre le 15/09/22 et le 01/09/22 à la station EDF de la RQB ainsi qu'à la station de Signy sont reportées dans le Tableau 5. Cette période représente une durée de 109 jours pendant lesquels 123 mm d'eau sont tombés. Les flux à la RQB et Signy sont respectivement 6,5 fois et 4,3 fois plus importants que ceux de Virey. Le taux d'abattement entre Signy et Virey est d'ailleurs de -253% pendant la période des travaux à la RQB. A Signy, la quantité de MES exportée pendant ces 109 jours (8795 tonnes) est presque 2 fois plus importante que la quantité passée le reste de l'année hydrologique (4731 tonnes). Ces valeurs permettent d'estimer à environ 4442 tonnes les sédiments qui se sont déposés le long des 4 km de cours d'eau entre les stations de la RQB et Signy.

Il faut cependant noter que les incertitudes associées à ces résultats sont importantes. En effet, les fortes variations de turbidité de cette période sont difficiles à modéliser et beaucoup d'informations

ont été manquées à cause de problèmes techniques. On peut toutefois supposer que ces flux sous-estiment ce qui est réellement passé.

Station de mesure	Flux total (T/109 j)	Flux (T/km ² /109 j)	Incertitude (%)
Virey	2011	3,2	12
Roche-Qui-Boit	13237	17,6	78
Signy	8795	11,3	75

Tableau 5 Récapitulatif des flux totaux et spécifiques, ainsi que des incertitudes associées, pour les stations amont (Virey) et aval (RQB et Signy). Ces résultats prennent en compte les données du 15/05/22 au 01/09/22 (= 109 jours).

ii) Analyses des éléments métalliques

Pour évaluer la pollution en métaux lourds des sédiments retenus par les barrages, les concentrations de 5 éléments métalliques (Cuivre, Zinc, Cadmium, Nickel et Chrome) ont été mesurées dans l'eau et dans les sédiments de berge à la station de Signy depuis la vidange. Seuls les résultats concernant le Nickel sont présentés ici car ce sont les plus significatifs. Les concentrations des autres métaux suivent à peu près les mêmes variations.

Dans l'eau, on observe un pic de la concentration en Nickel juste après la vidange (Figure 17) qui dépasse la NQE-MA (Norme de Qualité Environnementale exprimée en valeur Moyenne Annuelle et définie dans la Directive cadre sur l'eau 2013/39/UE). Les concentrations diminuent ensuite fortement dans les semaines suivantes pour repasser sous ce seuil et retrouver le niveau avant arasement (mesuré le 20/07/21). Parmi les 5 éléments, nous avons observés un dépassement de cette NQE-MA seulement pour le Nickel, le Cadmium et le Chrome juste après la vidange (Annexe 4, Annexe 5, Annexe 6, Annexe 7).

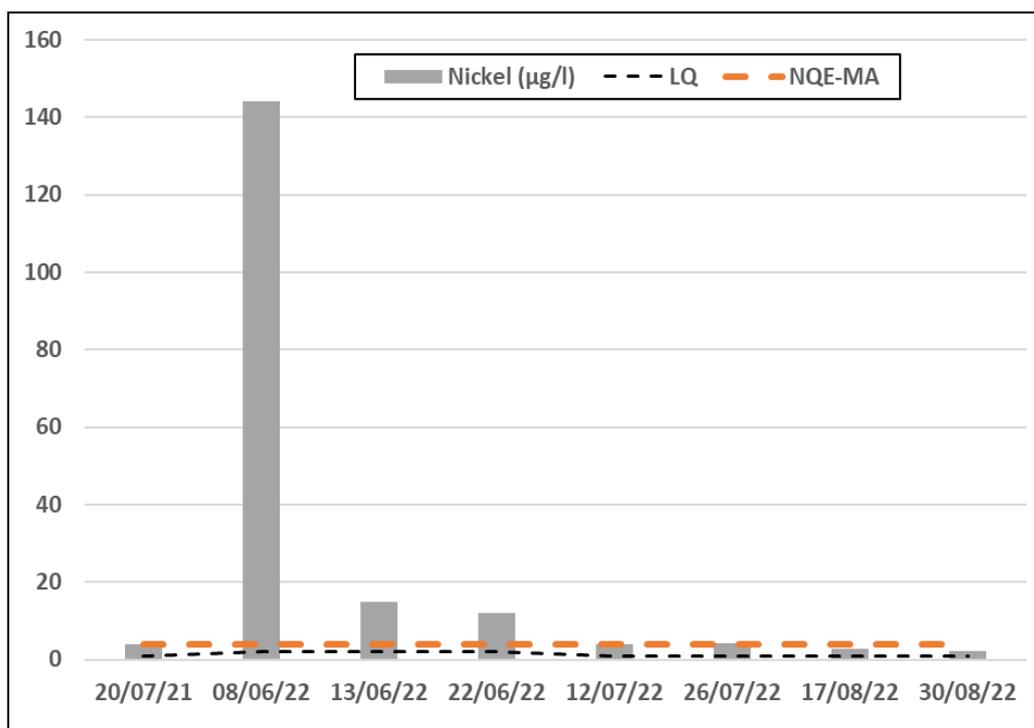


Figure 17 Concentrations en nickel dans la colonne d'eau à Signy.

Dans les sédiments de berge (Figure 18), on constate une variabilité avec toutefois une hausse progressive de la concentration qui amène à un dépassement du seuil S1 le 30/08/22. Cette hausse progressive suggère des dépôts successifs lors des 3 crues estivales (le 05/06, le 23/06 et le 21/07).

Parmi les 5 éléments mesurés, seuls le Nickel et le Cadmium approchent cette valeur. Elle est définie dans la nomenclature Loi sur l'eau de 2006 et correspond à la concentration maximale autorisée dans les boues épandues. Le « bruit » équivaut quant à lui au signal géochimique du bassin versant lié à la nature et la composition initiale des roches. Ces seuils ont été repris pour faire suite à une étude de 2011 sur la gestion des sédiments contaminés de la Sélune (IDRA Environnement, 2011), où les sédiments à la confluence de l'Yvrande dépassaient S1 pour le Nickel, le Cadmium et le Zinc.

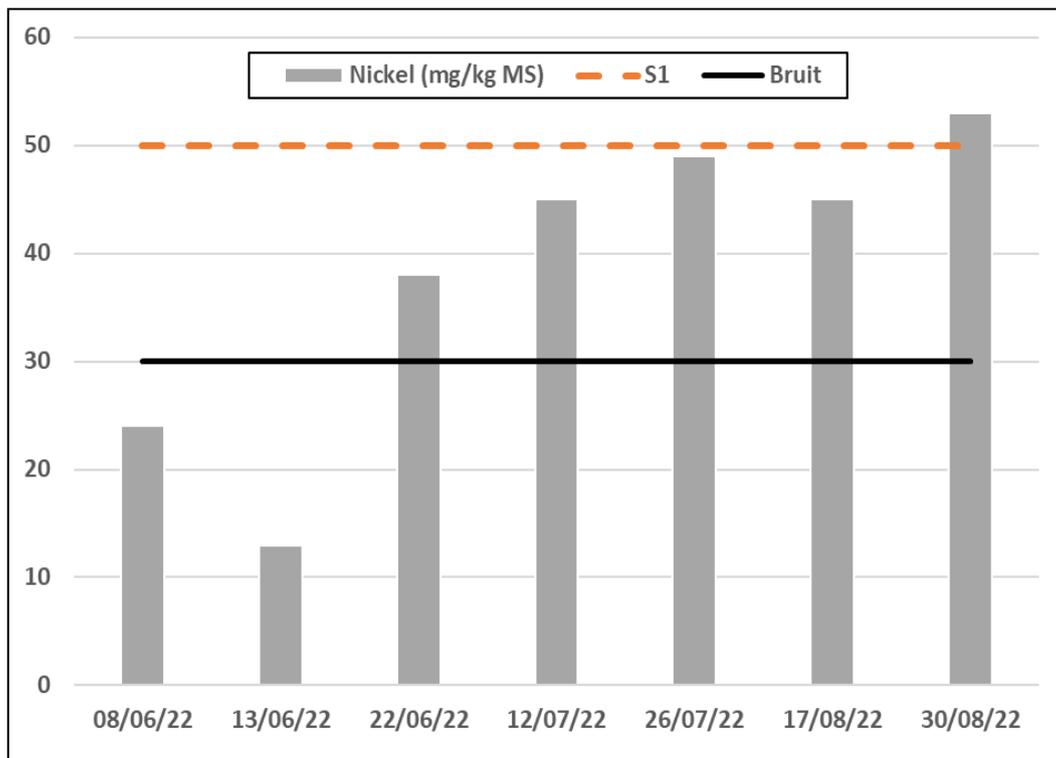


Figure 18 Concentrations en nickel dans les sédiments de berge à Signy.

Pour les carottages du 02/08/22 (Figure 19), il y a une forte variabilité entre les sites mais on remarque des concentrations élevées en profondeur, quand les premiers sédiments se sont déposés juste après la vidange. A Signy et au moulin de Quincampoix, les sédiments qui se sont déposés au fil du temps ont des concentrations plus faibles, ce qui correspondent à la baisse de la pollution observée dans l'eau. Là encore, seuls le Nickel et le Cadmium approchent du seuil S1.

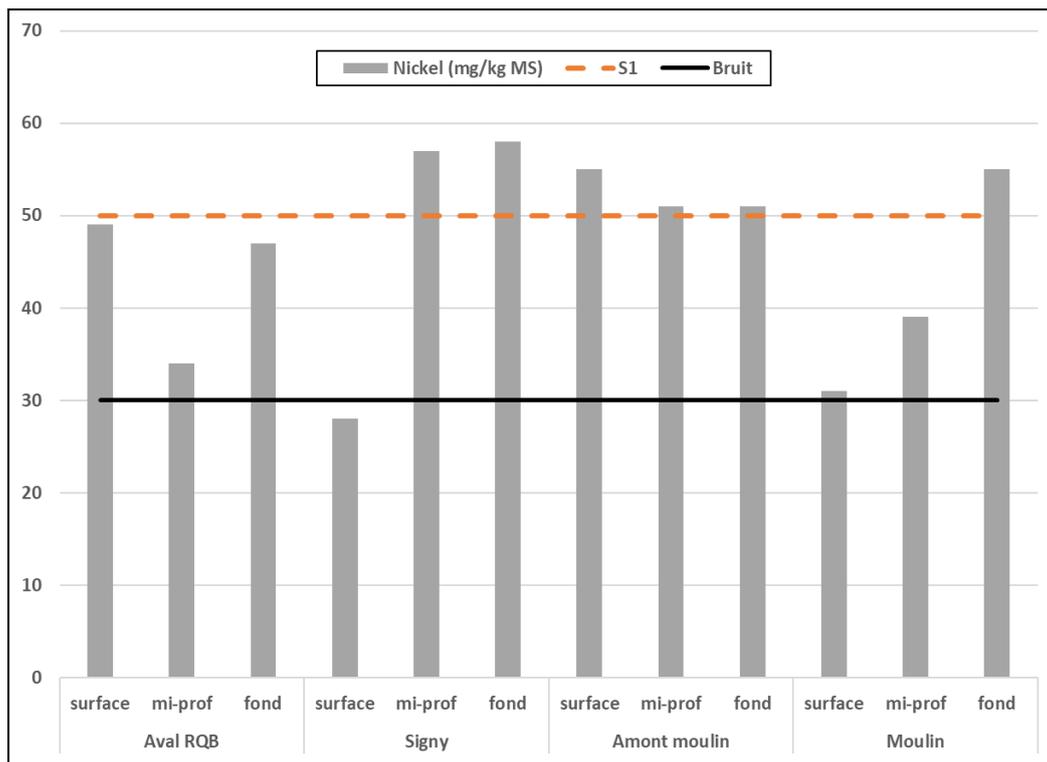


Figure 19 Concentrations en nickel des carottages effectués le 02/08/22.

3) Transport des sables

Les résultats de l'analyse granulométrique des pièges à sédiments montrent une différence entre amont et aval (Figure 20). Les stations aval de Signy et du Pont du Bateau (PDB) sont consultables en Annexe 8. On remarque que lors des échantillonnages précédant la vidange, les masses de sédiments très fins ($200\mu\text{m}$; $50\mu\text{m}$) et $< 50\mu\text{m}$) étaient plus importantes en amont. A partir du 1^{er} juin, c'est l'inverse avec des masses beaucoup plus élevées à la RQB.

On observe aussi que les fractions fines $200\mu\text{m}$; $50\mu\text{m}$) et $< 50\mu\text{m}$ sont très largement majoritaires juste après la vidange, mais qu'elles diminuent ensuite progressivement au profit des particules plus grossières. Pour les stations de la RQB et du pont du bateau, les derniers échantillonnages sont toujours dominés par les particules fines et la fraction sableuse ($> 500\mu\text{m}$) semble très minoritaire. Malgré ces résultats, il est plus que probable que des sables transitent en aval depuis la vidange, mais les quantités de sédiments fins libérées lors de cet événement étaient telles que les pièges se remplissaient très rapidement et le % de particules plus grossières faibles.

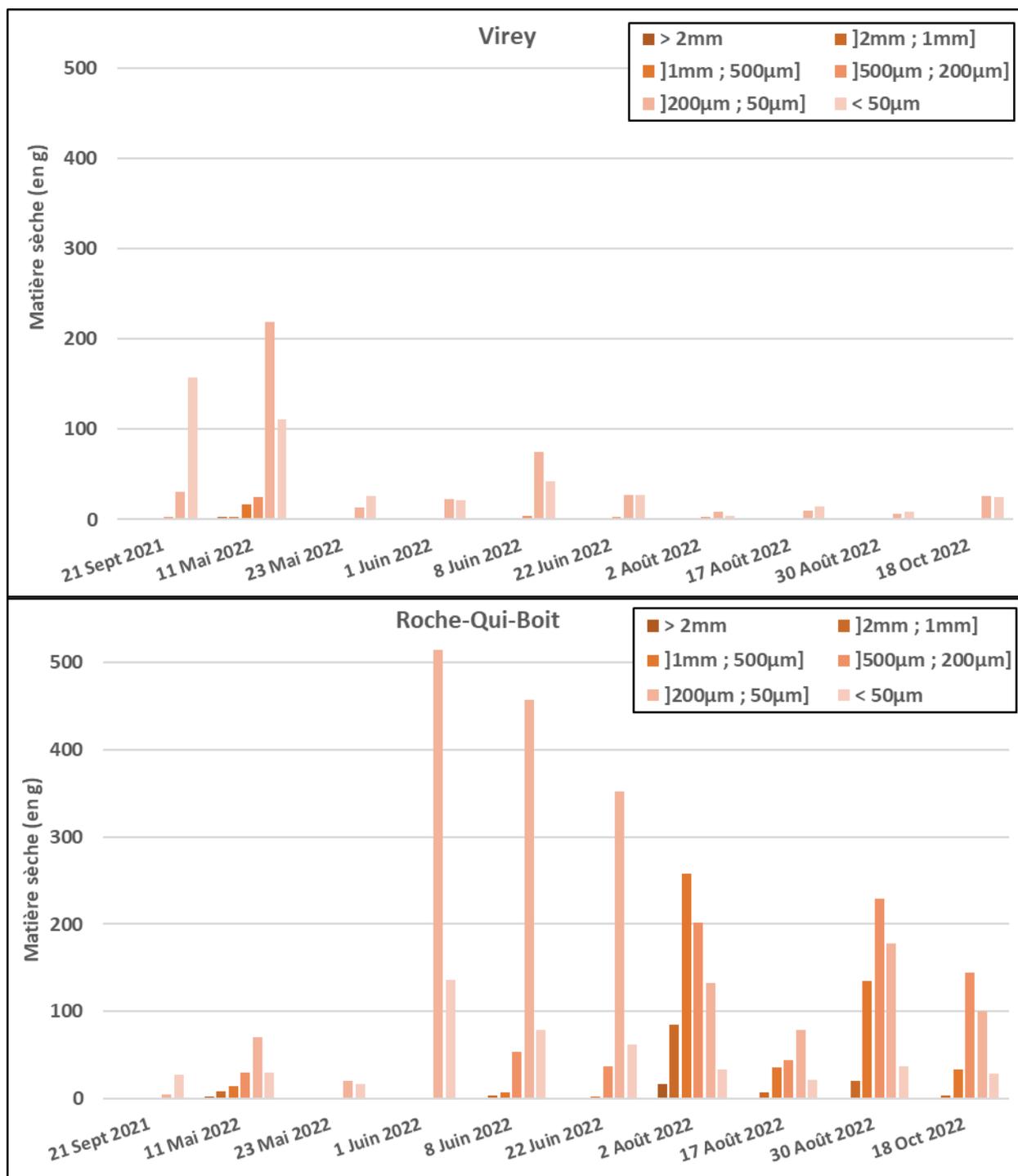


Figure 20 Evolution des masses de matières sèches des différentes fractions granulométriques mesurées entre le 21/09/21 et le 18/10/22 aux stations de Virey et de la RQB.

4) Déplacement des particules grossières

Depuis le début du traçage sédimentaire de la charge de fond, 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. La campagne de détection de cette année, réalisée le 26 septembre 2022 a mis en évidence une absence quasi-totale de mobilité des galets marquées. Ces résultats sont mis en perspectives avec les débits moyens

journaliers (Qjm) enregistrés durant les périodes de suivi. Ces débits sont issus de la banque hydro (station de Saint Aubin de Terregatte). L'année 2021-2022 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 36,7 m³/s (Figure 21) et le débit seuil de mise en mouvement des particules tracées n'a pas été dépassé.

Les taux de retour ont un peu diminué (perte de 2 ou 3 individus en fonction du transect considéré) sur le site en aval du pont de bateau du fait de la chute d'un arbre qui a compliqué les conditions de prospection et des accumulations de sédiments fins (libérés par la suppression des barrages en amont) parfois pluri-décimétriques qui interfèrent dans la communication entre l'antenne de détection et les traceurs.

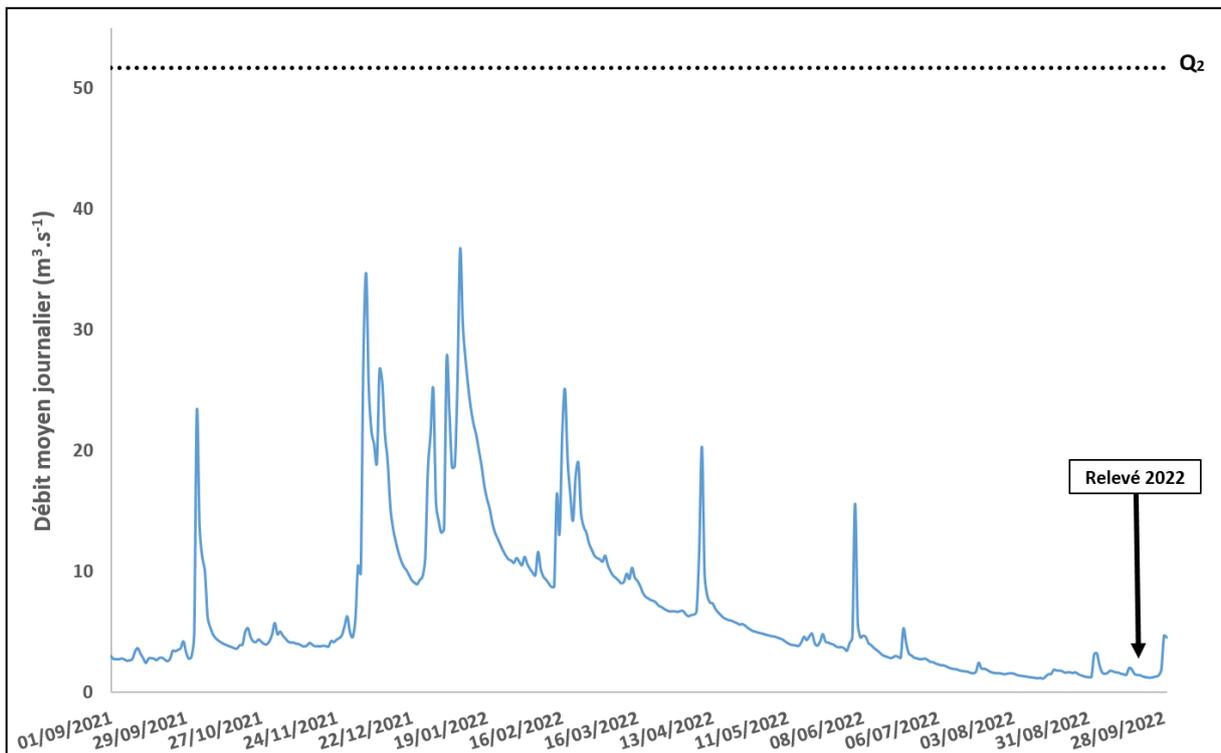


Figure 21 Chronique des débits de la Sélune à Saint-Aubin de Terregatte (banque HYDRO) entre 01/09/21 et 01/10/22. Le relevé de l'année hydrologique 2021-2022 a été indiqué.

Ces résultats sont donc cohérents avec les observations passées. La plupart des particules précédemment mobilisées semblent pour la plupart en position d'abris autour de bloc grossiers. Seuls des débits exceptionnels semblent en mesure de les remettre en mouvement.

5) Chimie des affluents

Depuis le dernier rapport, 2 campagnes affluents supplémentaires ont été menées (24/03/22 et 11/10/22). Les 15 points habituels ont été échantillonnés (Tableau 6), sauf pour le Vauroux où l'échantillonnage a été fait un peu plus en amont car la station initiale était inaccessible.

Les concentrations mesurées sur les affluents sont souvent du même ordre que celles mesurées sur la Sélune (Figure 22). On observe cependant une variabilité plus importante en nitrate et silice pour les petits et moyens bassins versants (< 100 km²). L'Yvrande (P7) affiche toujours des valeurs de chlorures et sulfates bien plus importantes, avec des maximums atteints lors de la dernière campagne (respectivement 153,5 mg/L et 55,3 mg/L). La station des Foucras (P5) présente des valeurs de

phosphore total, de phosphates et d'ammonium élevées. Enfin la station de la RQB amont (P13) présente des concentrations en MES bien plus fortes que les autres affluents.

Concernant l'Airon, les stations en amont (P1) et en aval de la STEP (P2) ne présentent pas de différences importantes entre elles et avec celles de Virey ou Signy.

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 Gauberdrière/la Larderie	289
Signy	Signy	77089

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

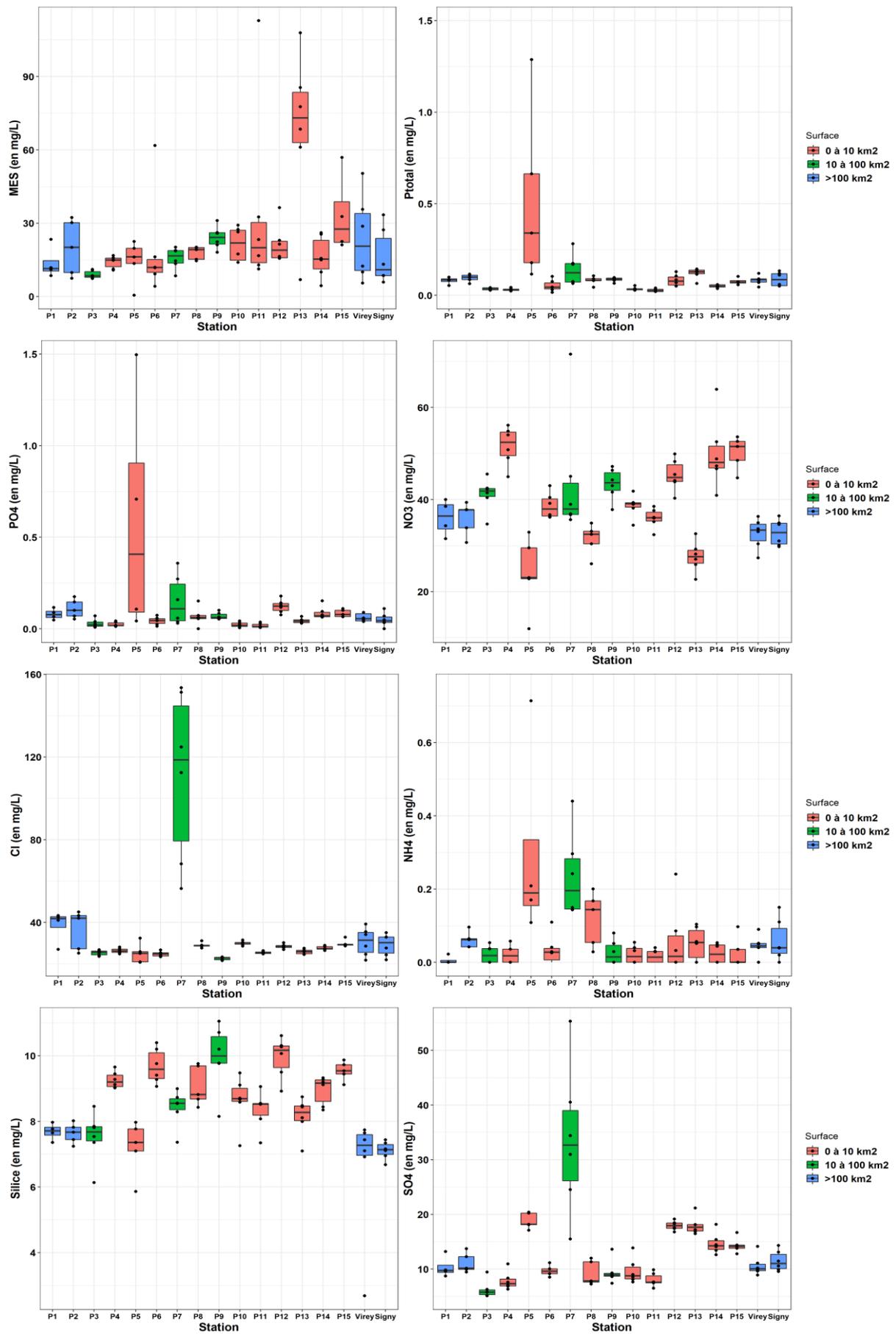


Figure 22 Concentrations des affluents en éléments dissous et particulaires aux différentes dates de prélèvement.

Conclusions

Cette année 2021-2022 marque la fin de la période de travaux d'effacement des barrages de la Sélune qui avait commencé en 2017. Jusqu'à présent, les conséquences de la gestion sédimentaire et des vidanges du barrage de Vezins avaient été tamponnées en grande partie par la présence du barrage de la Roche-Qui-Boit. Depuis le 15 mai 2022 et la vidange de la retenue, les transferts amont/aval de sédiments ont été modifiés. Même si les travaux vont continuer jusqu'au printemps 2023, la continuité amont-aval de la Sélune a été restaurée et la dernière phase de suivi post-arasement peut commencer.

Comme depuis le début de ce suivi, les débits spécifiques de cette année 2021-2022 sont semblables à l'amont et à l'aval et dépendent directement de la lame d'eau précipitée. Cette année est parmi les années les plus sèches depuis 2015.

Les flux spécifiques en matières en suspension pré-vidange étaient toujours plus importants à l'amont qu'à l'aval, mais avec un taux d'abattement cette année faible (58%). Ces flux, directement liés aux débits, sont dans la gamme des autres années sèches (2016-2017 et 2018-2019).

Les flux spécifiques en phosphore total, anions majeurs et silice dissoute sont aussi directement dépendants des débits et donc des précipitations annuelles. Mais ceux de cette année se sont révélés importants pour certains éléments malgré une pluviométrie faible. Comme cette augmentation est présente aux stations amont et aval, l'origine de ces flux n'est a priori par liée aux travaux. En revanche, depuis le début de la phase de travaux, la dynamique de crue des concentrations en nitrates, sulfates et silice retrouve un signal typique de rivière non impactée par des retenues, comme sur la station amont.

Depuis la vidange, les quantités de MES transportées à la RQB (13 237 t) et à Signy (8 795 t) sont nettement supérieures à celle de Virey (2 011 t). Ces exports se sont faits principalement pendant le mois qui a suivi l'ouverture et beaucoup de sédiments se sont déposés sur les berges en aval en formant des banquettes (Annexe 9). Nous avons estimé qu'environ 4442 t de sédiments se sont déposées entre la RQB et Signy et sont susceptibles d'être remobilisés lors d'épisodes de crues et d'impacter les flux de l'année suivante. Du côté des polluants métalliques, les sédiments largués suite à l'ouverture du barrage aient des concentrations en cadmium et nickel plus élevées que le signal de fond des sédiments de la Sélune. Ces dépassements ont été observés jusqu'à l'ancien moulin de Ducey, presque 8 km en aval du barrage de la RQB.

Les pièges à sédiments n'ont pas mis en évidence un transport des sables (> 500 µm) très important à partir de la vidange. Seuls les résultats de la station de la RQB ont montré une présence importante des sables à partir du 2 août. Pour le reste, la majorité des particules transportées sont fines (< 200 µm). Une des limites de ce suivi est que, même si des sables transitent dans la colonne d'eau, les pièges ont tendance à vite se remplir avec des particules fines, notamment en crue et maintenant que le tronçon aval possède des stocks importants sur ses berges.

Pour le suivi des particules grossières, aucune mobilité n'a été observée, ce qui n'est pas étonnant car aucune crue cette année n'a dépassé le débit biennal, signe d'un faible hydrodynamisme.

En ce qui concerne les affluents, les campagnes de 2021-2022 confirment la variabilité spatiale et temporelle qui existe entre ces différents bassins versants notamment entre ceux inférieurs à 100 km². Deux affluents se distinguent : l'Yvrande du point de vue des concentrations en sulfates et chlorures, et le Foucrais du point de vue des concentrations en phosphore.

Perspectives

Suite à l'arasement du barrage de la RQB et aux nombreux dépôts sur les berges, un projet pour suivre l'évolution de ces sédiments avant et après les crues hivernales a commencé. Une première campagne a été réalisée les 14 et 16 novembre 2022 pour cartographier ces banquettes de sédiments, avec des mesures de longueur et largeur pour estimer les quantités déposées. Une deuxième campagne est prévue en début d'été 2023 juger de leur évolution au cours de l'hiver.

Suite au départ d'EDF à la fin des travaux à la Roche-Qui-Boit, les instruments de leur station de Virey et de la RQB vont devoir être transmis. Notre équipe est un candidat potentiel à cette reprise. En effet le maintien de ces stations est nécessaire pour le suivi de la phase post-arasement, où l'on attend un retour vers un nouvel état d'équilibre, après que le déstockage des sédiments s'étant déposés entre la Roche-Qui-Boit et Signy. Un travail d'estimation des coûts de reprise de ces stations a été mené et est résumé en Annexe 10.

Le travail sur les données affluents doit être maintenant exploité, pour estimer les contributions des bassins versants les plus importants sur les flux de la Sélune. L'utilisation complémentaire de la base Naiades (pour les données chimiques) et de la banque HYDRO (pour les débits) est à l'étude, ainsi que les options d'estimations des débits provenant des plus petits affluents.

Un nouvel axe de travail dans cet observatoire des flux, porté par L. Jeanneau (*Géosciences Rennes*) a pour objectif d'identifier les sources de MES de la Sélune en utilisant les signatures moléculaires de la matière organiques particulaires. La composition moléculaire de la matière organique charriée change en fonction des organismes vivants qui produisent cette même matière, ainsi un sol aura une signature moléculaire caractéristique de végétaux terrestres alors qu'un sédiment aura une signature moléculaire correspondant au mélange des contributions terrestres et aquatiques. L'utilisation de marqueurs moléculaires spécifiques de ces contributions permettra d'identifier les sources et potentiellement de hiérarchiser leur contribution au flux de matière en suspension. Des prélèvements de matière sont déjà réalisés depuis avril 2022 au niveau des stations de Virey, la RQB et Signy, a une fréquence bimensuelle. Un stage de master 2, est prévu en début d'année 2023 pour commencer à traiter ces échantillons.

Compte tenu de la faible mobilité de la charge grossière mesurée depuis 2014 une thèse est menée en ce moment sur l'impact des lamproies dans la mobilité de la charge du fond, pour identifier les causes de déplacement des sédiments grossiers. Elle est co-dirigée par A-J. Rollet, S. Dufour (UMR LETG Rennes) et E. Lasne (UMR DECOD) dans le cadre du projet « rôle des espèces ingénieures dans la restauration des habitats » du programme Sélune.

Références

- Assemblée nationale et Sénat. (2006). Loi n° 2006-1772 du 30/12/06 sur l'eau et les milieux aquatiques. Récupéré sur <https://aida.ineris.fr/reglementation/loi-ndeg-2006-1772-301206-leau-milieux-aquatiques>
- 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.
- 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. *Rever Research and Applications*. doi: <https://doi.org/10.1002/rra.3618>
- IDRA Environnement SAS. (Avril 2011). Effacement des barrages de la Sélune - Synthèse des résultats d'analyse.
- INRAE. (2022). Programme Sélune. Récupéré sur <https://programme-selune.com/fr/>
- 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
- Météo France. (2022). « 2022, année la plus chaude jamais enregistrée en France ». Récupéré sur <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/climat/2022-annee-la-plus-chaude-jamais-enregistree-en-france>
- 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.
- Moatar, F., Floury, M., J. Gold, A., Meybeck, M., Renard, B., Ferreol, M., . . . Pinay, G. (2020). Stream Solutes and Particulates : a new framework to optimize their monitoring. *frantiers in Ecology and Evolution*.
- MTES. (2022). Hydro Portail : données publiques relatives à l'écoulement des cours d'eau. Récupéré sur <https://hydro.eaufrance.fr/>
- 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.
- Parlement européen. (2013, 08 12). DIRECTIVE 2013/39/UE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL - Annexe II. Journal officiel de l'Union européenne. Récupéré sur <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013L0039&from=fr>
- R Core Team (2020). R : A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Stubbe, V., Fovet, O., Crave, A., & Rollet, A.-J. (2022). Rapport AESN 2019-2021 - Volet dynamique fluviale.

Annexes

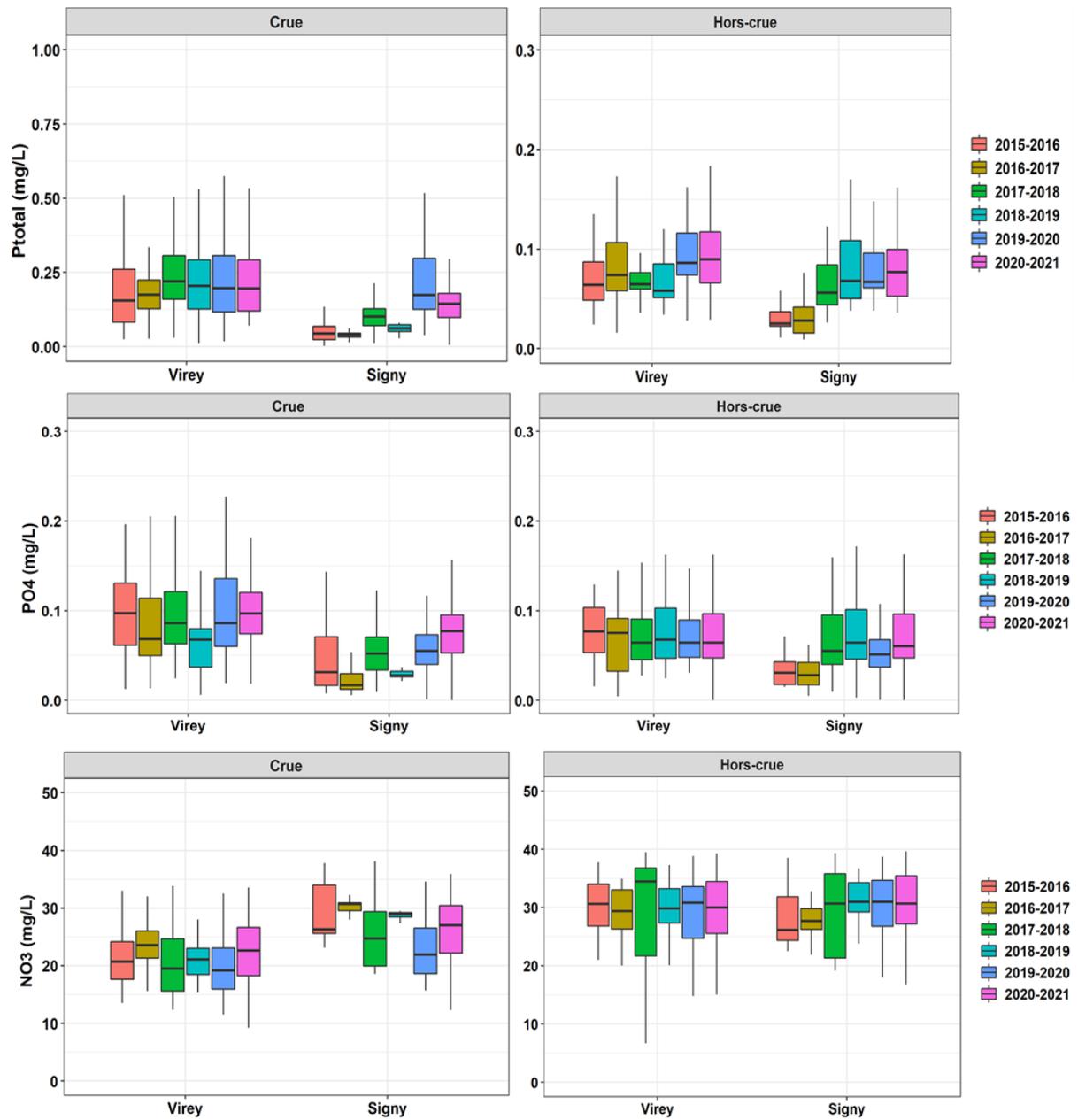
Virey	Période	a	b	R²
EQ-V1	2015-2017	1,91	-16,51	0,96
EQ-V2	2015-2018	1,99	-22,23	0,95
EQ-V3	2017-2018	2,14	-22,46	0,96
EQ-V4	2015-2019	1,46	16,93	0,77
EQ-V5	2015-2020	1,43	21,20	0,85
EQ-V6	2015-2021	1,46	19,15	0,85
EQ-V7	2015-2022	1,50	19,64	0,85
Signy	Période	a	b	R²
EQ-S1	2015-2017	3,36	-8,20	0,84
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
EQ-V7	2017-15 mai 2022	0,86	5,03	0,91

Annexe 1 Tableau des coefficients a et b pour les régressions linéaires entre MES et turbidité pour les différentes périodes et pour chaque station.

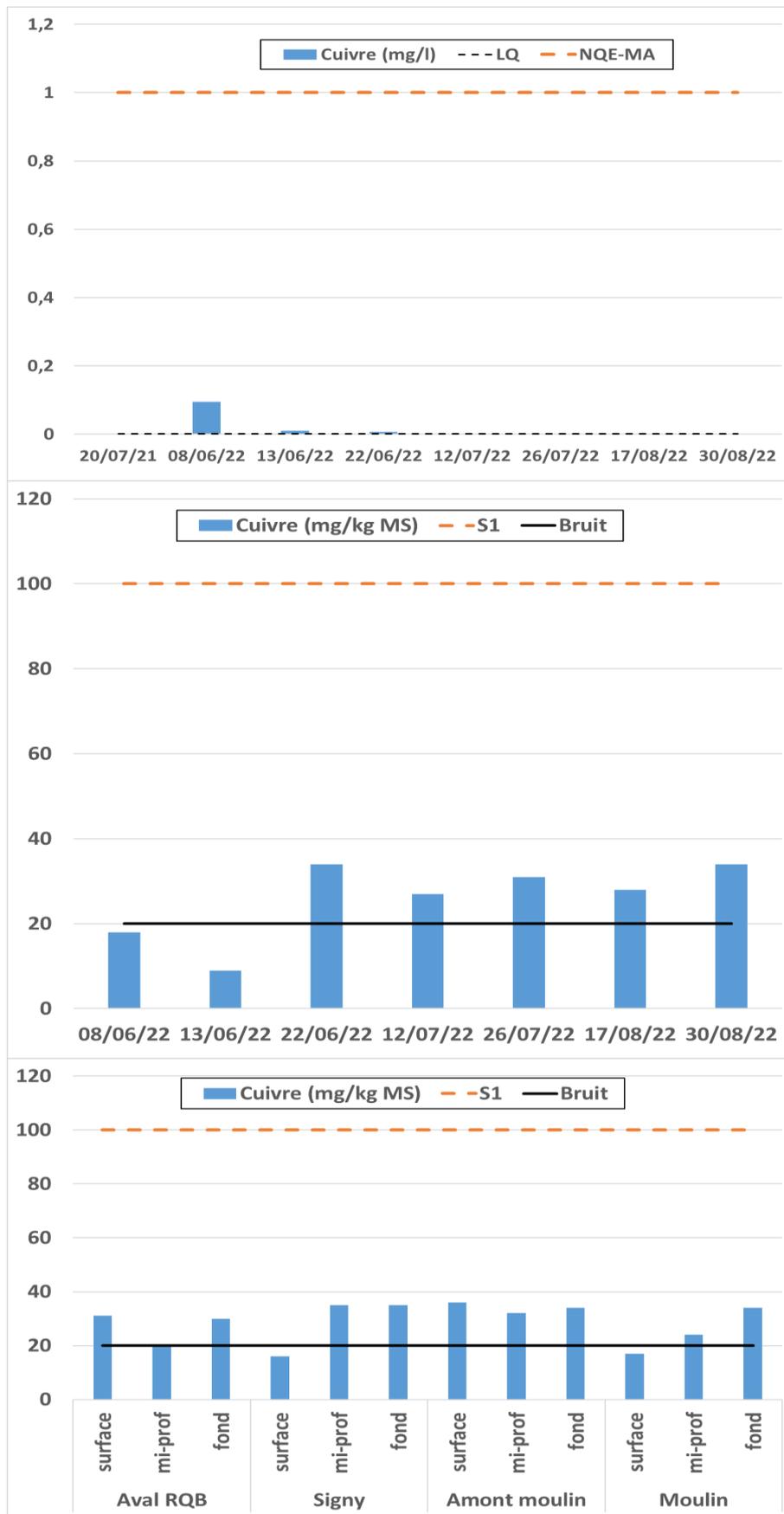
Bias for $b_{50sup} < 0$												Bias for $b_{50sup} < 0$											
d	1 year			3 years			5 years			1 year			3 years			5 years							
	μ	ν	R^2	μ	ν	R^2	μ	ν	R^2	μ	ν	R^2	μ	ν	R^2	μ	ν	R^2					
3	0	-0.0002	0.01	0	-0.0003	0.00	0	0.0007	0.04	-0.0008	0.0080	0.52	-0.0001	-0.0005	0.08	0.0000	-0.0087	0.07					
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					

10th imprecision percentile - e_{10}												90th imprecision percentile - e_{90}											
d	1 year			3 years			5 years			1 year			3 years			5 years							
	μ	ν	R^2	μ	ν	R^2	μ	ν	R^2	μ	ν	R^2	μ	ν	R^2	μ	ν	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					

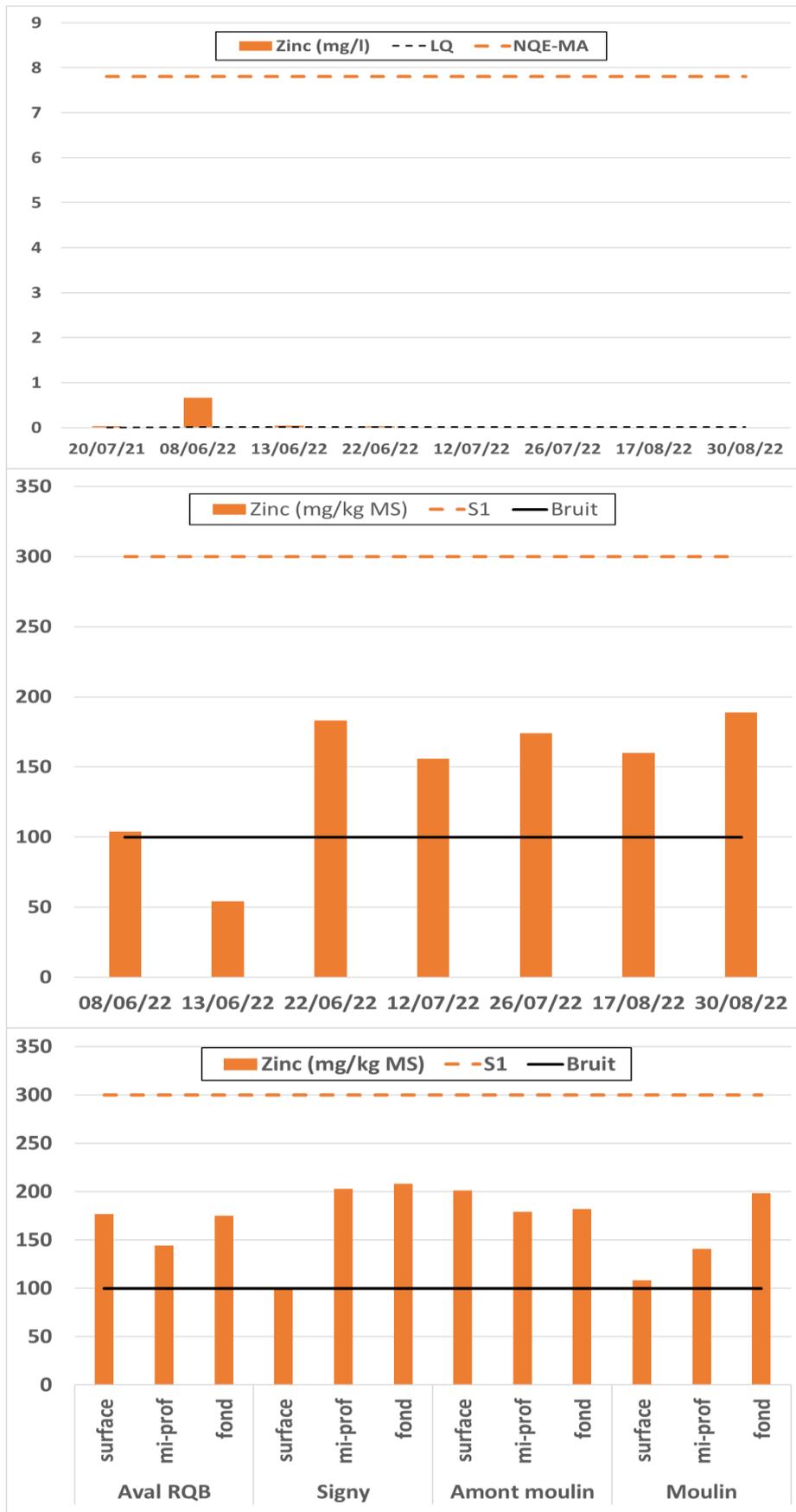
Annexe 2 Paramètres du nomographe d'erreur pour différents intervalles d'échantillonnage et périodes étudiées (1, 3 et 5 ans) : $y = ux^2 + vx$, où $x = M2\%$ et $y = e50$ (biais), $e10$ (10e percentile d'imprécision), $e90$ (90e percentile d'imprécision),



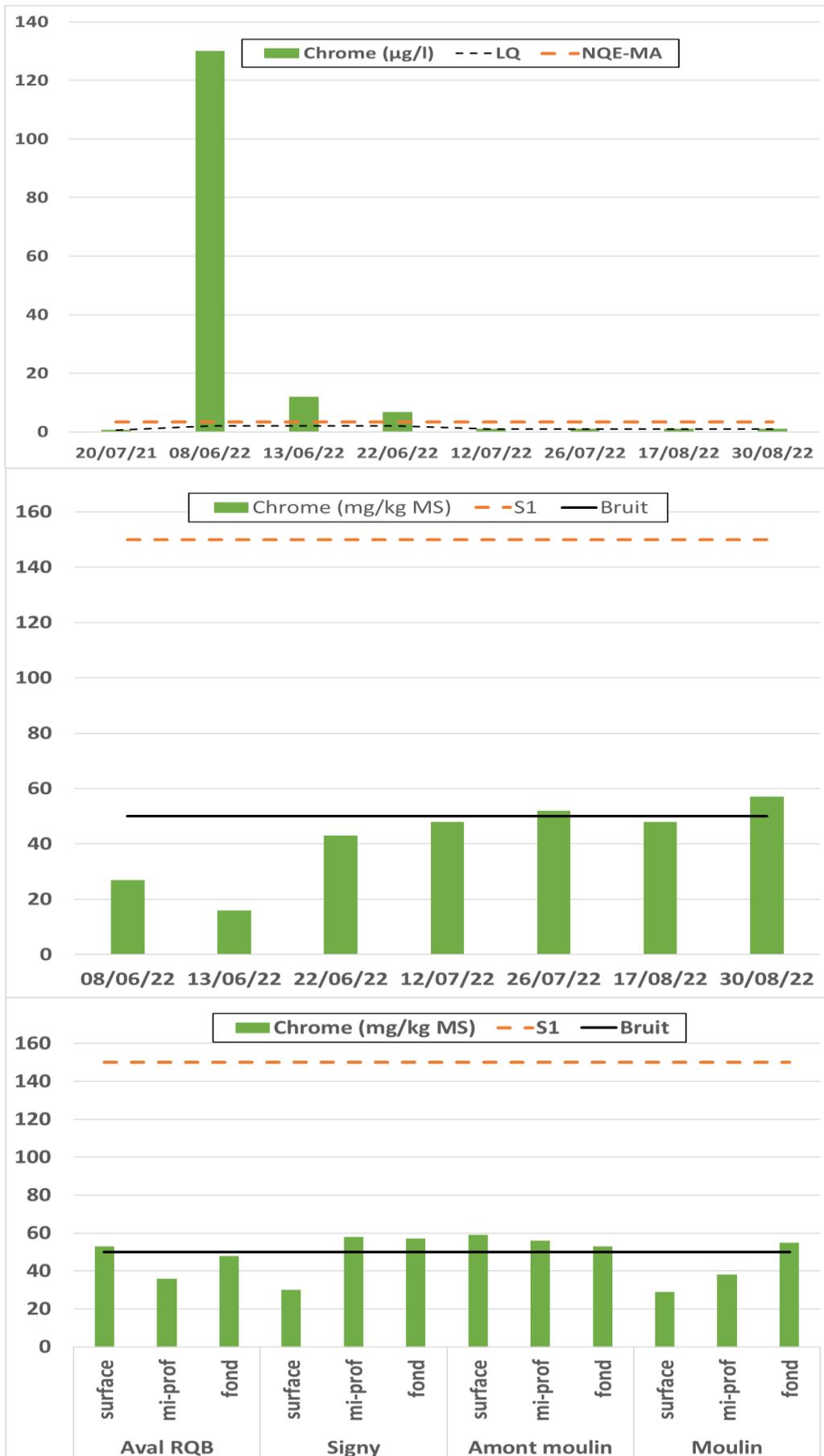
Annexe 3 Concentrations en Phosphore total (haut), en orthophosphates (milieu) et en nitrates (bas) pour les stations de Virey et Signy. Ces données proviennent du rapport AESN 2019-2021.



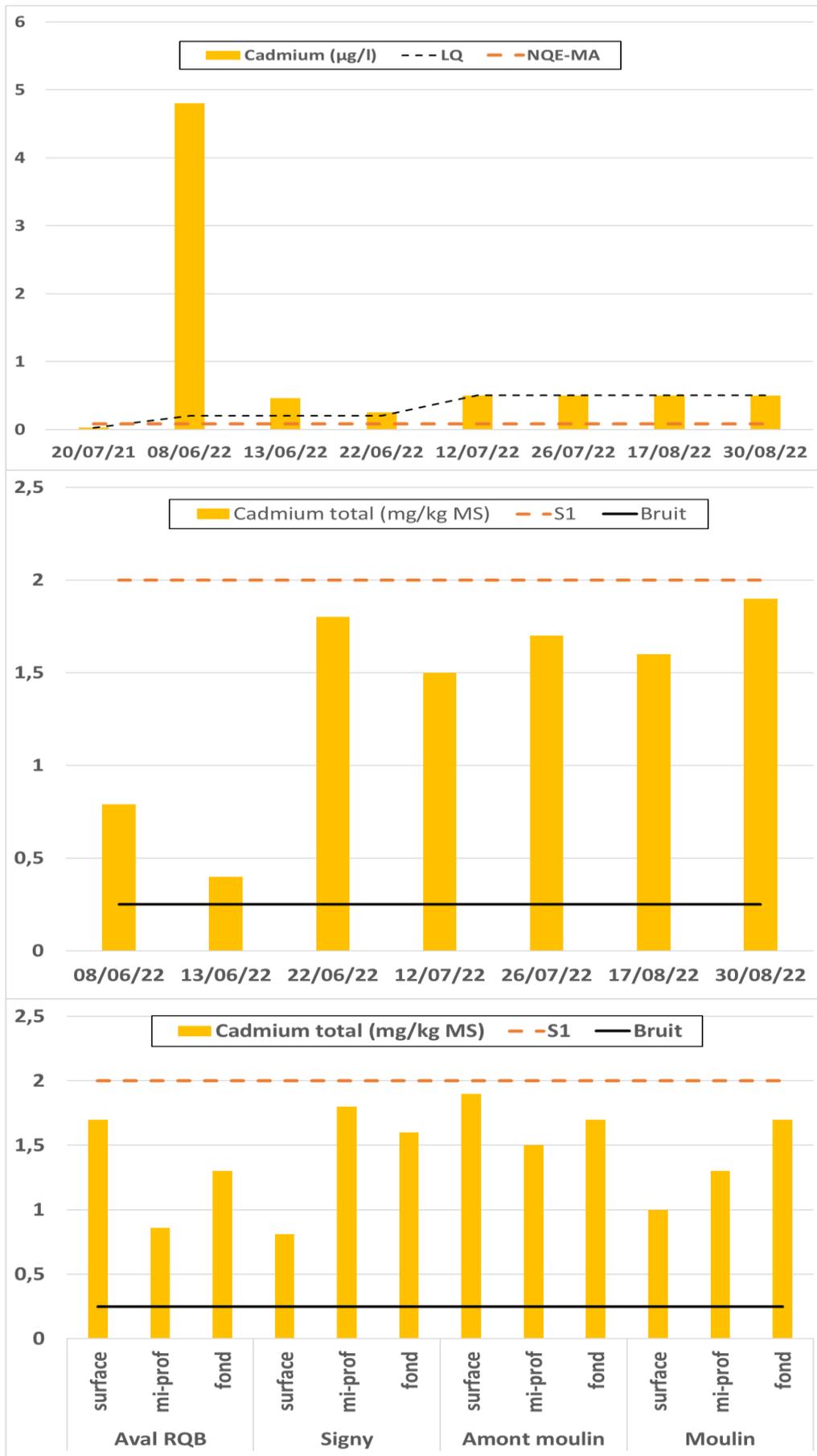
Annexe 4 Concentrations en cuivre dans la colonne d'eau (graphe du haut) et dans les sédiments de berge (graphe du milieu) à Signy. Concentrations en cuivre des carottages effectués le 02/08/22.



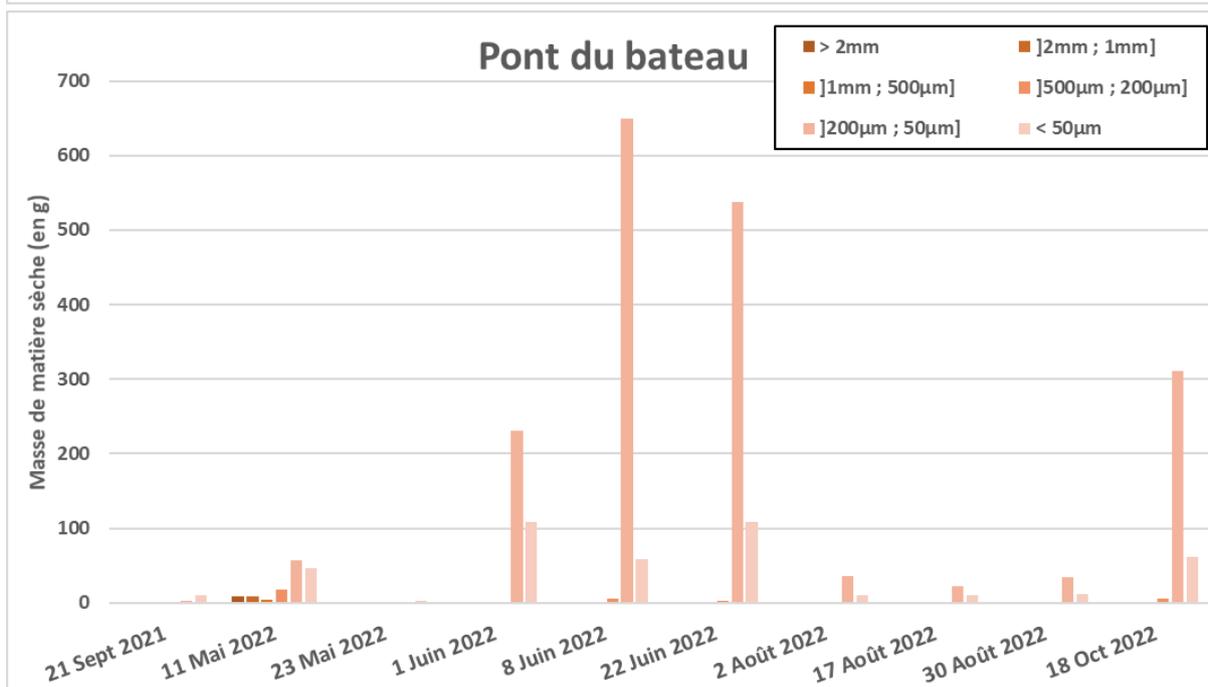
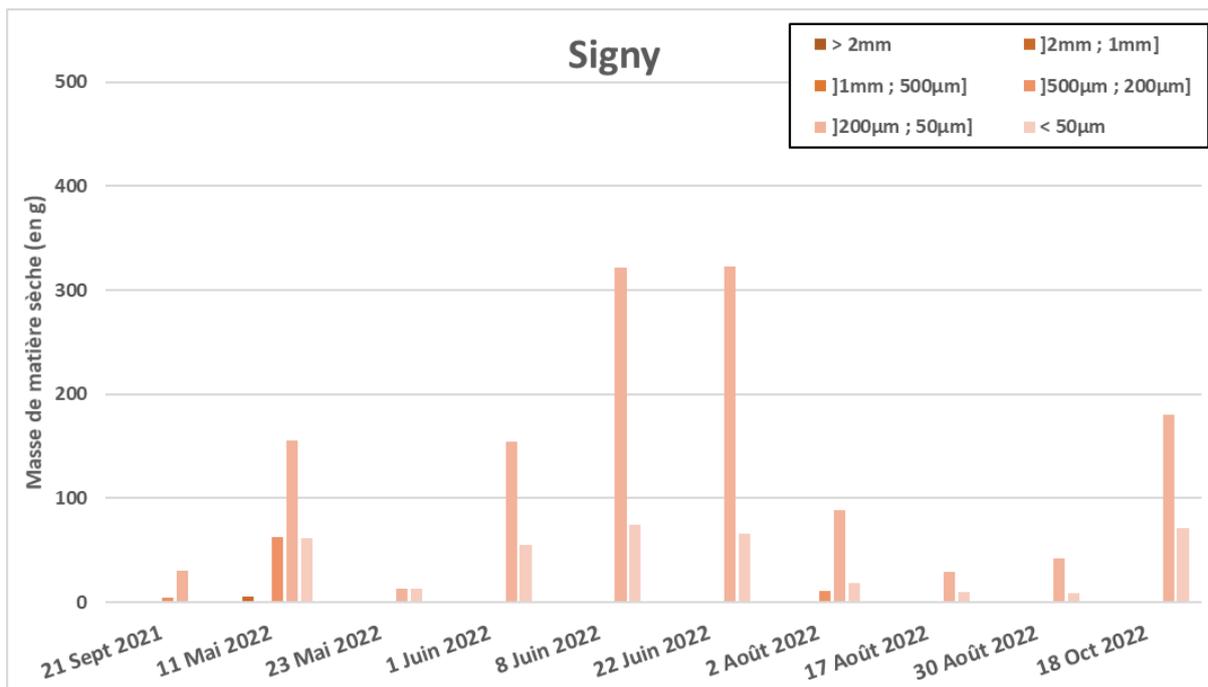
Annexe 5 Concentrations en zinc dans la colonne d'eau (graphe du haut) et dans les sédiments de berge (graphe du milieu) à Signy. Concentrations en zinc des carottages effectués le 02/08/22.



Annexe 6 Concentrations en chrome dans la colonne d'eau (graphe du haut) et dans les sédiments de berge (graphe du milieu) à Signy. Concentrations en chrome des carottages effectués le 02/08/22.



Annexe 7 Concentrations en cadmium dans la colonne d'eau (graphe du haut) et dans les sédiments de berge (graphe du milieu) à Signy. Concentrations en cadmium des carottages effectués le 02/08/22.



Annexe 8 Evolution des masses de matières sèches des différentes fractions granulométriques mesurées entre le 21/09/21 et le 18/10/22 aux stations de Signy et du pont du bateau (attention : l'échelle des ordonnées du graphique du pont du bateau est plus grande).



Annexe 9 Banquettes de sédiments déposées dans les semaines qui ont suivies la vidange de la RQB : à l'aval immédiat du barrage (en haut à gauche) et au pont du bateau (eu haut à droite et en bas)

	Matériel	Virey	RQB
Jouvence / remplacement matériel	centrale d'acquisition NetDL (montant HT)	3 000 €	3 000 €
	batterie + moduleur	500 € max	500 € max
	modem et antenne GPRS	600 €	?
	1 sonde turbidité SOLITAX	6 500 €	
	1 sonde PLS-C OTT (taxes comprises)	3 000 €	
	1 sonde O2 FDO 800 WTW	4 000 €	
	1 sonde pH/Eh WTW	1000 €	
	tubes		?
Consommables	capuchon O2	153 €/an	153 €/an
	sonde pH	200 €/an	200 €/an
Contrat électrique		200 €/an	200 €/an
Contrôle conformité électrique		?	?
Déplacement pour maintenance		pas de surcoût	
		15 765 €	5 765 €
TOTAL		21 530 €	

Annexe 10 Récapitulatif des coûts de reprise estimés des stations EDF de Virey et la RQB par l'INRAE.