



Dynamique fluviale (Volet 1) : Flux hydriques, sédimentaires et chimiques [Programme Sélune - Phase pré-arasement. Rapport bilan 2018-2019]

Mamadou Ndom, Ophélie Fovet, Alain Crave, Nicolas Gilliet

► To cite this version:

Mamadou Ndom, Ophélie Fovet, Alain Crave, Nicolas Gilliet. Dynamique fluviale (Volet 1) : Flux hydriques, sédimentaires et chimiques [Programme Sélune - Phase pré-arasement. Rapport bilan 2018-2019]. [Rapport de recherche] Agence de l'Eau Seine-Normandie. 2020, pp.39. hal-03381951

HAL Id: hal-03381951

<https://hal.inrae.fr/hal-03381951>

Submitted on 18 Oct 2021

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



Programme Sélune

Phase « Travaux d'arasement »

Rapport bilan 2018-2019

Dynamique fluviale

Volet 1

Flux hydriques, sédimentaires et chimiques

Auteurs

Mamadou NDOM¹, Ophélie FOVET¹, Alain CRAVE² et Nicolas GILLIET¹

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

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

Octobre 2020

1. Introduction

1.1. Contexte

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. 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 dynamiques 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 biologique 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).

1.2. Objectifs

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 d'acquérir une bonne connaissance des flux et de 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 (variabilité saisonnière, événementielle et interannuelle) afin i) d'identifier l'origine des flux, les processus de transfert associés et ii) de distinguer leurs déterminants climatiques des conséquences de l'arasement des barrages. La caractérisation de la dynamique géomorphologique passe elle par i) la mesure du transport de sédiments grossiers, et ii) des suivis topographiques à haute résolution spatiale, au niveau du lac de Vezins notamment, pour suivre les stocks sédimentaires fins aujourd'hui exondés et la stabilité des versants de la retenue dans le contexte des opérations de vidange.

1.3. Rappels sur la chronologie du suivi dans la thématique « Dynamique fluviale »

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, Fév 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 2019 est caractérisée par le début des travaux de suppression du barrage de Vezins et la libre circulation des eaux à l'amont de ce barrage.

1.4. Réalisations 2018-2019 et contenu du rapport

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

- L'embauche d'un ingénieur d'étude (M. Ndom) à temps plein pour la collecte, l'analyse et le traitement des données, qui assure aussi la gestion des stations de suivis multi-paramètres sur le Fleuve Sélune, et participe à des campagnes de terrain diverses (traçage des sédiments grossiers, mesures LIDAR, prélèvement synoptiques affluents, campagne d'inter calibration de capteurs INRAE-EDF, 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 4 années hydrologiques pour le volet flux hydriques, sédimentaires et chimiques sur la période 2015-2019 et dans le contexte des travaux de vidanges du barrage de Vezins (amorçés en avril 2017) suivis des travaux de démantèlement du barrage de Vezins en 2019. Le bilan des quatre années hydrologiques comprend la comparaison interannuelle des paramètres suivis (prolongée ici pour une année de travaux) et les calculs des flux annuels de sédiments fins, des éléments chimiques, et des incertitudes associées. Les résultats de campagnes de prélèvements sur le tronçon amont/aval des barrages sont également présentés : l'une porte sur la caractérisation des principaux affluents sur le tronçon des barrages et l'autre sur la granulométrie des sédiments sur ce même tronçon.

Les résultats de la période « pré-arasement », présentés en détails dans les précédents rapports, ont également fait l'objet d'un article scientifique (Fovet *et al.*, 2020) publié dans la revue River Research and Applications. Cet article traite de l'état initial, sous l'angle de la comparaison amont/aval des signatures hydrochimiques, à l'échelle saisonnière et des événements de crue.

Sommaire

1. Introduction	1
1.1. Contexte	1
1.2. Objectifs	1
1.3. Rappels sur la chronologie du suivi dans la thématique « Dynamique fluviale »	1
1.4. Réalisations 2018-2019 et contenu du rapport	2
2. Méthodes	6
2.1. Dispositifs et protocole de suivi des flux	6
2.1.1. Localisation des stations	6
2.1.2. Equipement des stations	7
2.1.3. Protocole de prélèvement et analyses	9
2.2. Traitement des données	11
2.3. Methodes de calcul des flux	11
2.3.1. Calcul des flux annuels sédimentaires	11
2.3.2. Calcul des flux annuels de nutriments	13
2.3.3. Estimation de l'incertitude sur le flux (méthode DWC)	14
2.4. Campagnes physico-chimique sur les affluents	14
2.5. Campagne granulométrique	17
3. Résultats	18
3.1. Estimation des temps de résidence moyen dans les lacs (période pré-arasement) et évolution des réservoirs avec les travaux	18
3.2. Dynamique saisonnière et en crue des paramètres hydrologiques, sédimentaires et physico-chimiques dans le contexte des travaux d'arasement	18
3.2.1. Hydrologie	19
3.2.2. Température de l'eau	20
3.2.3. Matières en suspension	21
3.2.4. Phosphore	22
3.2.5. Anions majeurs et silice dissoute	22
3.2.6. Nitrites et ammonium	23
3.2.7. Ratio C/N des matières en suspension	24
3.3.1. Station amont	25
3.3.2. Station aval	25
3.4. Calcul des flux annuels de nutriments	27
3.5. Caractérisation des MES (nature, composition)	28
3.6. Concentrations des affluents	29
4. Conclusion et perspectives	32
Annexes	33
Bibliographie de références	39

Table des illustrations

Figure 1 : Localisation des stations de suivi multi-paramètres sur le bassin versant de la Sélune	7
Figure 2 : Photo de la station aval (Station INRA)	8
Figure 3 : Station amont (EDF-INRAE)	9
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)	10
Figure 5 : Préparation au laboratoire des échantillons d'eau prélevée en vue des différentes analyses	10
Figure 6 : Relation entre la turbidité et la concentration de MES sur la station amont de Virey (Eq.4)	12
Figure 7 : Relation entre la turbidité et la concentration de MES sur la station aval de Signy (Eq.8)....	12
Figure 8 : L'Occupation du sol sur le bassin versant de la Sélune....	16
Figure 9 : Localisation des points de prélèvements de la campagne granulométrique sur la Sélune ..	17
Figure 10 : Evolution de la cote des retenues des barrages sur la Sélune de 2014 à 2019	18
Figure 11 : Lamé d'eau écoulee à l'amont et à l'aval en fonction des précipitations.....	19
Figure 12 : Distribution en boxplot des débits moyens journaliers sur les stations amont (Virey) et aval (Signy) par année hydrologique	20
Figure 13 : Chronique des températures moyennes journalières des stations EDF et INRA sur la Sélune	21
Figure 14 : Distribution en boxplot de l'amplitude thermique hebdomadaire et des températures moyennes journalières des stations de la Sélune de 2015 à 2019	21
Figure 15 : Boxplot des concentrations de MES par an (en crue à droite, hors-crue à gauche).....	22
Figure 16 : Distribution en boxplot des concentrations de phosphore dissous et total en fonction des années hydrologiques, en crue et en écoulement de base	22
Figure 17 : Distribution en boxplot des concentrations chlorures, nitrates, sulfates et silice dissoute par année hydrologique, en période de crue et en écoulement de base.....	23
Figure 18 : Distribution en boxplot des concentrations de nitrites et d'ammonium par année hydrologique, en période de crue et écoulement de base	24
Figure 19 : Boxplot du rapport Carbone/Azote mesuré sur les MES en période de crue et hors-crue	25
Figure 20 : Estimation des flux de sédiments en fonction des précipitations	27
Figure 21 : Portion de sédiment par échantillon.....	29
Figure 22 : Histogramme des proportions de sédiments par échantillon.....	29
Figure 23 : Concentrations des éléments dissous et particuliers en basses et hautes eaux sur les affluents de la Sélune.....	31

Tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des paramètres mesurés sur les stations de la Sélune.	9
Tableau 2 : Caractéristiques des bassins hydrographiques des points de prélèvements sur la Sélune	15
Tableau 3 : Résumé des équations Turbidité-MES calibrées pour chaque station selon les périodes considérées.....	26
Tableau 4 : Récapitulatif des flux calculés de MES avec les différentes équations à l'amont et à l'aval.	26
Tableau 5 : Flux (en T/km ² /an) et imprécisions annuelles des nutriments à l'amont et à l'aval.	28

Table des annexes

Annexe 1 : Error nomograph parameters for different sampling intervals and reporting periods.....	33
Annexe 2 : Chronique des débits en fonction des précipitations à l'amont et à l'aval des barrages ...	33
Annexe 3 : Amplitude thermique journalière des stations sur la Sélune.....	34
Annexe 4 : Comparaison des flux annuels spécifiques de nutriments (en mg/L) estimés avec les méthodes SRC ₅₀ , IRC et DWC.....	35
Annexe 5 : relation log Q/log Ptotal pour la station de Signy en 2014-2017 (IRC)	36
Annexe 6 : relation log Q/log Ptotal pour la station de Signy en 2017-2019 (IRC)	36
Annexe 7 : relation log Q/log Ptotal pour la station de Virey en 2014-2019 (IRC)	36
Annexe 8 : relation log Q/log Cl pour la station de Signy en 2014-2019 (IRC).....	37
Annexe 9 : relation log Q/log Cl pour la station de Signy en 2017-2019 (IRC).....	37
Annexe 10 : relation log Q/log PO4 pour la station de Signy en 2014-2017 (SRC ₅₀).....	37
Annexe 11 : relation log Q/log PO4 pour la station de Signy en 2017-2019 (SRC ₅₀).....	38
Annexe 12 : relation log Q/log PO4 pour la station de Virey en 2015-2019 (SRC ₅₀)	38

2. Méthodes

2.1. Dispositifs et protocole de suivi des flux

2.1.1. Localisation des stations

Le suivi des flux est basé sur plusieurs stations (Figure 1). La station 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. Cette station permet de mesurer les flux entrants à l'amont des barrages. L'acquisition des données y est effective depuis début février 2015. EDF a installé deux stations de mesure à l'aval immédiat de chaque barrage : la station de Dorière en aval du barrage de Vezins 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



Figure 1 : Localisation des stations de suivi multi-paramètres sur le bassin versant de la Sélune

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 INRA)
Stations de Virey, Dorière et La Roche Qui Boit

EDF a financé et équipé les trois stations 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 (pour 3 stations sur 4). Nous avons accès à l'ensemble de ces données à un pas de temps horaire depuis février 2015 via un serveur FTP, mis à disposition par EDF et permettant le téléchargement hebdomadaire des données.

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



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

Paramètres mesurés	Stations de mesure			
	Virey	Dorière	Roche-Qui-Bolt	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	0	X	
Niveau d'eau (m)	X	0	X	X
Débit (m^3/s)	X		X	X
Chlorophylle totale ($\mu\text{g}/\text{L}$)				X
Cyanobactéries ($\mu\text{g}/\text{L}$)				X

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

X : paramètres mesurés par les équipes de recherche et/ou transmis par EDF ; 0 : paramètres mesurés par EDF.

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 (Figure 4) asservi au niveau d'eau a été installé sur les deux stations. 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. Ce seuil 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 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 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.

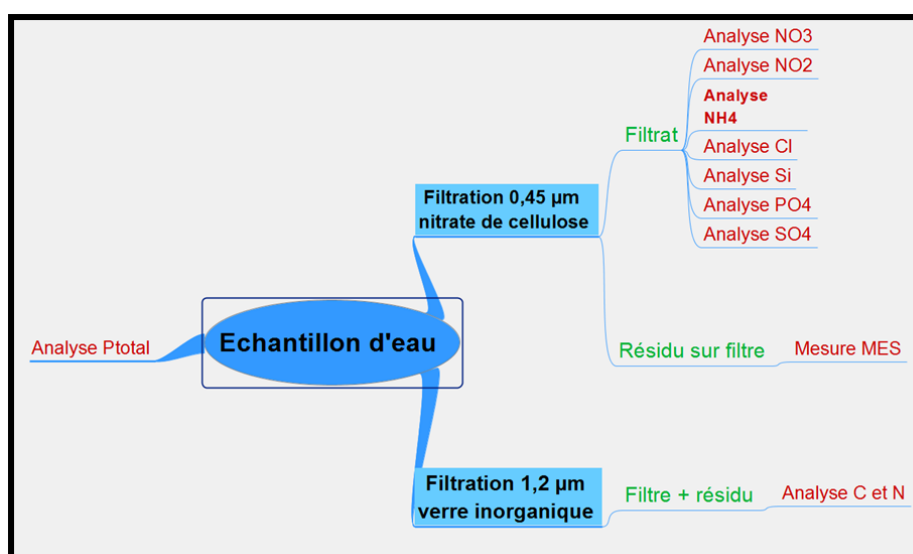


Figure 5 : Préparation au laboratoire des échantillons d'eau prélevée en vue des différentes analyses

2.2. 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 St Hilaire du Harcouet (50484002) nous sont transmises au pas de temps horaire, par MétéoFrance dans le cadre de la convention Météo France – INRA.

NB : Le système d'information du programme Sélune est actuellement en cours de construction. Une première version du plan de gestion des données a été rédigé.

2.3. Methodes de calcul des flux

2.3.1. Calcul des flux annuels sédimentaires fins

Les flux de sédiments fins sont suivis de deux manières : par des mesures haute fréquence de la turbidité et par 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 grossières. 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 l'équation de calibration entre la turbidité et les MES, une régression linéaire simple a été utilisée sur les stations amont et aval :

$$\text{Signy : } MES \text{ (mg/L)} = a \times \text{Turbidite (NTU)} + b$$

$$\text{Virey : } MES \text{ (mg/L)} = a \times \text{Turbidite (FNU)} + b$$

a et b sont les coefficients de l'équations de calibration Turbidité/MES.

Les régressions sont calibrées par station, et par souci de continuité avec les précédents rapports et pour repérer d'éventuelles évolutions avec les travaux, les relations établies en intégrant les données 2017-2018 sont comparées à celles établies avec les données 2015-2017 (précédents rapports). Pour établir la relation d'étalonnage Turbidité/MES pour la station en amont des barrages, on dispose de 46 crues échantillonnées et pour lesquelles la turbidité mesurée est qualifiée de fiable, soit 632 couples de points sur la période 2015-2019 (Figure 6). Les crues ont été triées selon la qualité (estimée via le R^2 , coefficient de détermination) des droites de régression calculées individuellement

pour chaque crue : on cherche à sélectionner des évènements pertinents pour calibrer la relation Turbidité/MES, le critère de sélection était $R^2 > 0,6$. On a ainsi obtenu 31 crues (soit 441 points), l'équation de calibration (Eq.4, tableau 3) a été calculée à partir de ces 31 crues.

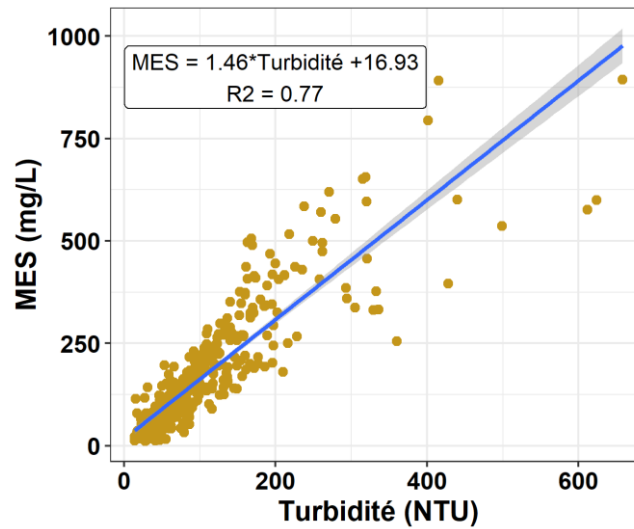


Figure 6 : Relation entre la turbidité et la concentration de MES sur la station amont de Virey (Eq.4). Le grisé donne l'intervalle de confiance à 95%.

Pour la station aval, la relation d'étalonnage Turbidité/MES (Eq.8) a été faite 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 320 couples de points) (Figure 7).

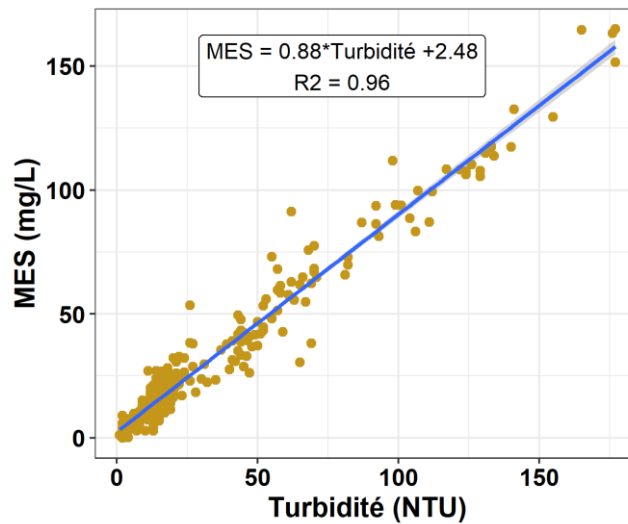


Figure 7 : Relation entre la turbidité et la concentration de MES sur la station aval de Signy (Eq.8). Le grisé donne l'intervalle de confiance à 95%.

La régression et le calcul des incertitudes associées ont été conduites à l'aide du package R Stats. L'incertitude de ces équations de calibration ont été calculée avec un intervalle de confiance de 95% pour les deux stations.

2.3.2. Calcul des flux annuels de nutriments

Pour estimer les flux de nutriments et d'éléments dissous (NO_3 , Cl , SO_4 , Si et NO_2) sur les stations à l'amont et l'aval des barrages, plusieurs méthodes de calculs ont été comparées : 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 (SRC_{50} pour *segmented rated curve*).

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.

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

Avec C_i la concentration (mg/L) des n échantillons réguliers (ici hebdomadaires), Q_i le débit instantané associé au prélèvement de l'échantillon (m^3/s), $\bar{Q}$ le débit moyen journalier (m^3/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.

La méthode IRC est une méthode de régression linéaire qui consiste à ajuster une relation concentration-débit pour reconstituer les concentrations manquantes, cette relation concentration-débit étant supposée linéaire dans le domaine log :

$$\text{Log } \hat{C} = a + b \log Q$$

$$\text{Flux annuel} = K \sum_{i=1}^{365-n} \hat{C}_i \times Q_i + K \sum_{i=1}^n C_i \times Q_i$$

avec $\hat{C}_i$ = Concentration estimée d'après la régression (mg/l) ; a et b = paramètre de la régression. Le flux annuel est ici calculé en faisant la somme du produit des débits et des concentrations reconstituées à l'échelle annuelle. Une correction (Ferguson, 1986) est apportée pour corriger la sous-estimation de la transformation logarithmique de la relation C-Q. La concentration corrigée se présente sous la forme :

$$\hat{C}_c = \alpha Q^\beta \times CF \text{ avec } a = \log \alpha \text{ et } b = \beta$$

$$CF = \exp(2.651 \sigma^2)$$

σ correspond à l'écart type des concentrations estimées.

Les relations log C- log Q ne sont pas toujours linéaires, la méthode SRC_{50} permet de segmenter le jeu de donnée en fonction du débit médian Q_{50} . La pente de la régression est calculée pour les valeurs en dessous ($b_{50\text{inf}}$) et au-dessus ($b_{50\text{sup}}$) du débit médian (Moatar *et al.*, 2013). Les concentrations sont estimées en fonction du débit en utilisant les régressions appropriées :

$$\text{Log } \hat{C} = a_{50\text{inf}} + b_{50\text{inf}} \log Q \text{ si } Q < Q_{50}$$

$$\text{Log } \hat{C} = a_{50sup} + b_{50sup} \log Q \text{ si } Q > Q_{50}$$

Les flux annuels sont ensuite calculés en faisant la somme du produit des débits et des concentrations à l'échelle annuelle. La correction de Ferguson comme pour les méthodes ci-dessus est ensuite appliquée aux deux régressions effectuées.

Les données utilisées pour faire les régressions log C-log Q (IRC ou SRC₅₀) proviennent des prélèvements hebdomadaires. Cependant les données utilisées dans le calcul des flux à l'aval (station de Signy) des régressions SRC50 et IRC ont été faits pour deux périodes : la période avant les travaux (2014-2017) et le début des travaux de vidange (2017-2019), en supposant que les travaux pouvaient modifier la relation concentration-débit pour certains éléments.

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 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 les coefficients r(d), (d), u(d) et v(d) sont déterminés à partir de l'abaque (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) décrit précédemment pour tous les flux de nutriments avec d=7 jours ici.

2.4. Campagnes physico-chimiques sur les affluents

Pour évaluer la contribution des affluents sur le cours principal de la Sélune entre nos deux stations amont/aval (Virey et Signy), des campagnes de prélèvements ont été réalisées (Figure 8). 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 deux campagnes, qui visaient respectivement les basses et hautes eaux, était donc d'explorer la variabilité spatiale de la chimie des affluents.

Les deux campagnes de prélèvements d'eau ont été effectuées en automne et au printemps 2019 de l'amont de la station de Virey à la station de Signy. Ces campagnes ont permis la mesure des concentrations de MES et de nutriments dissous (NO₃, Cl, SO₄, NO₂, Si, PT et PO₄) sur une douzaine d'affluents de la Sélune (Figure 6) dont les caractéristiques sont décrites dans le Tableau 2. Les surfaces des bassins versants des affluents ont été déterminées grâce à la boîte à outils *spatial analyst* sous le logiciel SIG Arcgis (version 10.6), et croisées avec la données d'occupation du sol (OCS_2018 Cesbio). Ces bassins affluents sont couverts de prairies (entre 27 et 60%), de cultures d'hiver (entre 3 et 29 %), de cultures d'été (entre 19 et 44%) et de surfaces minérales et urbaines (entre 9 et 27%). La localisation RD (rive droite) et RG (rive gauche) des affluents est faite par rapport au cours principale de la Sélune. Les analyses chimiques ont été effectuées au laboratoire de l'UMR SAS, selon les mêmes protocoles de filtration et d'analyse que pour les campagnes au long court conduites sur les stations de Virey et Signy.

Point de prélèvement	% Culture d'hiver	% Culture d'été	% Culture pérenne	% Forêts et Formation naturelles basses	% Prairies	% Urbain et surfaces minérales	Rang de Strahler	Bassin versant (ha)	Rive
Les Foucrais	4	21	0,2	5	40	27	2	121	RG
Lécusset	3	19	0,0	8	60	10	3	128	RG
RQB amont	3	39	0,0	5	42	11	3	158	RD
L'Isolant (RG)	21	40	0,0	2	29	9	3	215	RD
La fiéffé au roy Vezins	13	28	0,0	4	42	13	2	195	RD
La Bouffetière les Biards	23	30	0,0	1	31	15	2	161	RD
Pont de la république	29	23	0,0	2	29	18	3	351	RD
Route de Gaubardièrre	15	44	0,0	1	28	11	2	223	RG
Route Dougerus le fief	27	32	0,0	2	27	12	3	432	RG
L'Isolant (RD)	22	32	0,0	4	34	8	2	289	RD
Le Vauroux	15	27	0,1	7	42	10	4	1079	RG
Route de l'Yvrande	20	27	0,1	2	37	14	4	1652	RD
Le Lair (Pont Martin)	11	29	0,1	7	42	10	5	5035	RG
Aval STEP	10	32	0,1	5	41	11	6	27406	RG
Signy	12	29	0,1	7	40	10	7	77089	---
Virey	11,8	29,5	0,1	7	41	10	7	62669	---

Tableau 2 : Caractéristiques des bassins hydrographiques des points de prélèvements sur la Sélune

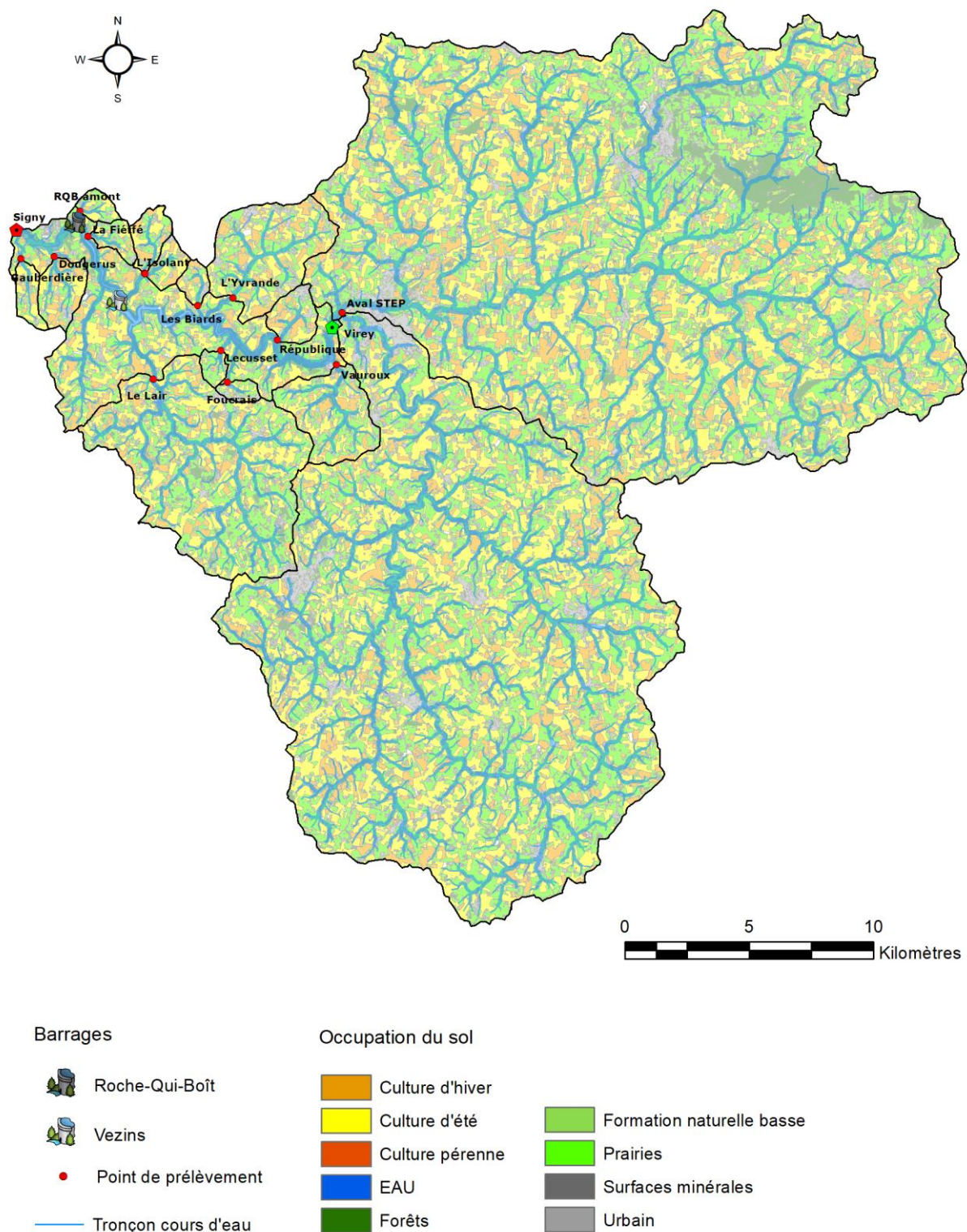


Figure 8 : L'Occupation du sol sur le bassin versant de la Sélune est composé de 39% de prairies et 43% de cultures (cultures d'hiver : céréales, colza, protéagineux ; cultures d'été : soja, tournesol, maïs et tubercules) et 6% de forêts . Les points de prélèvements des campagnes sur les affluents sont positionnés en rouge.

2.5. Campagne granulométrique

Une campagne granulométrique des MES par prélèvement d'eau a été réalisée en octobre 2019 (Figure 9) pour caractériser la taille des sédiments par granulométrie laser. Le but de cette campagne était de déterminer les types de sédiments qui transitent de l'amont à l'aval des barrages et de caractériser également leurs distributions granulométriques. Ainsi 8 échantillons ont été prélevés de l'amont à l'aval de la Sélune, l'échantillon à l'aval du barrage de la Roche-Qui-Boit a été perdu lors de l'analyse. Le granulomètre laser utilisé pour faire les analyses est le modèle CILAS 1180 du Laboratoire d'Archéologie et Histoire Merlat (LAHM) à l'Université de Rennes 2.



Figure 9 : Localisation des points de prélèvements de la campagne granulométrique sur la Sélune

3. Résultats

3.1. Estimation des temps de résidence moyen dans les lacs (période pré-arasement) et évolution des réservoirs avec les travaux

Le temps de résidence des volumes d'eau dans les réservoirs des barrages a été estimé en faisant le rapport entre le volume d'eau (fourni par EDF) et la somme des flux de débit entrants dans le réservoir (calculé à Virey). On estime ainsi le temps de résidence moyen dans le réservoir de Vezins à entre 14,2 jours contre 1,3 jours pour la Roche-Qui-Boît (en hiver) et 46,6 jours contre 4,1 respectivement pour Vezins et la Roche-Qui-Boît (en été).

Les travaux de vidange entamé en avril 2017 ont entraîné la baisse progressive de la cote du réservoir de Vezins jusqu'à la vidange complète en septembre 2018 pour l'inspection de sécurité de l'ouvrage. Le réservoir a été rempli à l'approche de l'hiver au mois de novembre de 2018 pour des raisons de sécurité liées aux fortes crues durant cette période, la vidange complète du réservoir de Vezins a été amorcée en avril 2019 en vue du démantèlement du barrage (Figure 10).

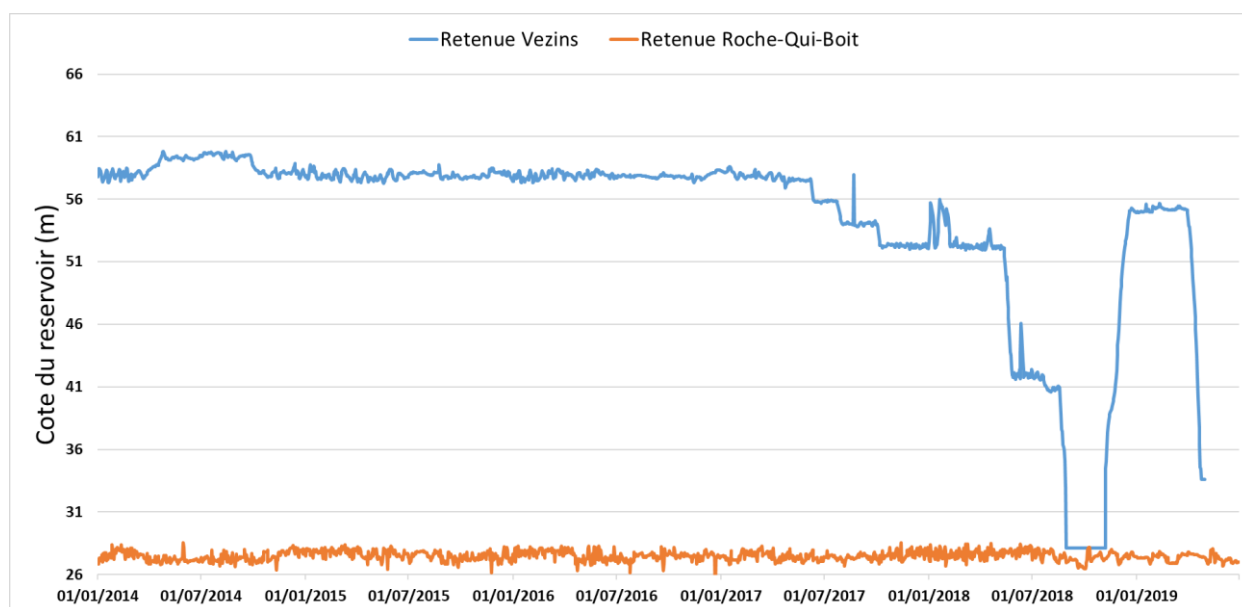


Figure 10 : Evolution de la cote des retenues des barrages sur la Sélune de 2014 à 2019 (données fournies par EDF).

3.2. Dynamique saisonnière et en crue des paramètres hydrologiques, sédimentaires et physico-chimiques dans le contexte des travaux d'arasement

L'influence des barrages sur les dynamiques événementielles et saisonnières des flux dans la phase pré-arasement a été détaillée dans les rapports précédents. On note principalement le stockage des sédiments et des éléments adsorbés dans les retenues (abattement important des flux de MES et P), un effet tampon sur les dynamiques événementielles des solutés dû au mélange avec le stock d'eau dans les retenues. Il y a également des effets source/puits saisonniers sur certains éléments chimiques (Si, PO₄) liés 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.

3.2.1. Hydrologie

La variation annuelle des débits est semblable à celle des précipitations (Figure 11, **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). L'année pluviométrique 2018-2019 tout comme l'année 2016-2017 est sèche : Le cumul annuel de septembre 2018 à aout 2019 est de 643 mm et la moyenne interannuelle de précipitations sur la période 1969-2019 est de 900mm. La lame d'eau écoulée représente 40% des précipitations pour l'année 2018-2019 contre 61% pour l'année la plus pluvieuse (2017-2018). La chronique de débit des stations amont et aval sur la période du 19/01/2015 au 31/08/2019 est très semblable (Annexe 2 : Chronique des débits en fonction des précipitations à l'amont et à l'aval des barrages). 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). Pour l'année 2018-2019, le débit maximum enregistré est égal à 31 m³/s contre 33 m³/s à l'aval qui draine un bassin versant plus vaste. Le débit moyen journalier enregistré pour 75% des mesures (3eme quartile) à l'amont est égale à 6,7 m³/s contre 7,8 m³/s (Figure 12).

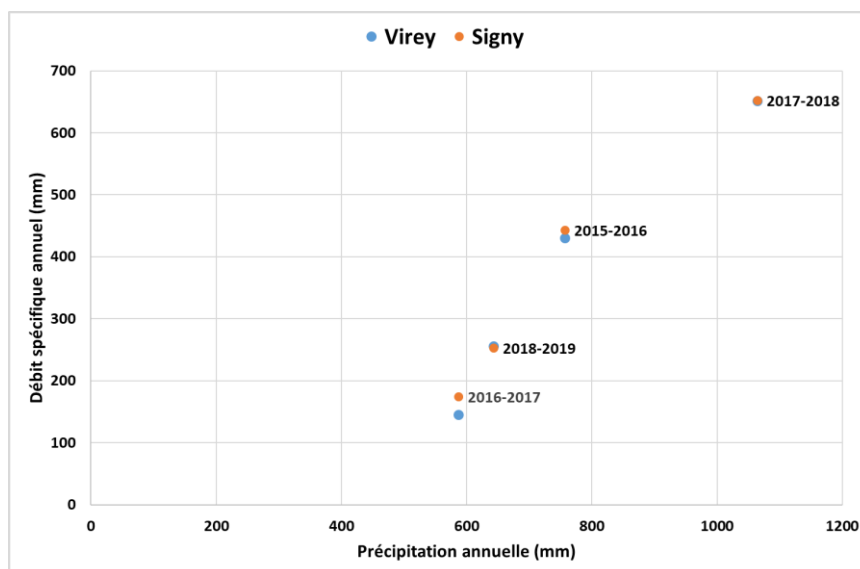


Figure 11 : Lame d'eau écoulée à l'amont et à l'aval en fonction des précipitations

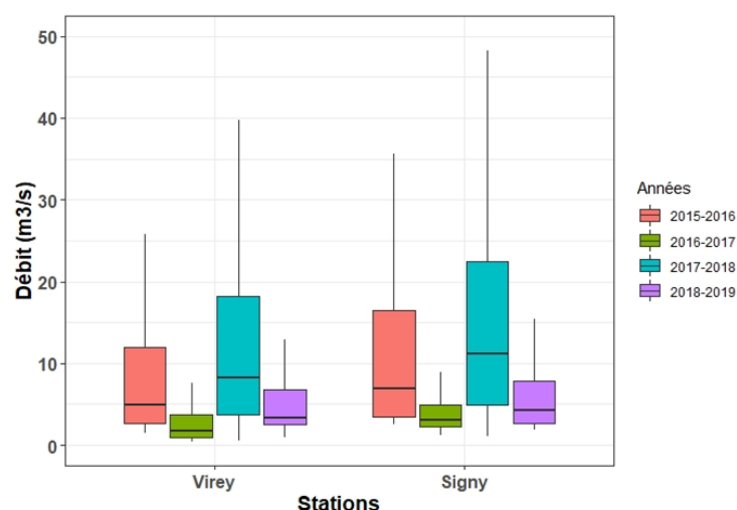


Figure 12 : Distribution en boxplot des débits moyens journaliers sur les stations amont (Virey) et aval (Signy) par année hydrologique

3.2.2. Température de l'eau

On observe une saisonnalité de la température des eaux de surface identique chaque année, une hausse progressive de la température à partir du printemps et de l'été et une chute des températures en hiver (Figure 13) en cohérence avec la variation saisonnière des températures de l'air et de l'ensoleillement. L'évolution interannuelle des températures moyennes journalières montrent globalement un réchauffement de la température des eaux de surfaces des stations à la sortie des barrages. La station de Dorière située à l'aval de l'ancien barrage de Vezins, présente des discontinuités dans les chroniques de données. Celles-ci correspondent à la phase des travaux de vidange et de démantèlement du barrage, le niveau de l'eau à cette station était trop faible pour permettre des mesures fiables. La température moyenne de 2015 à 2019 est de 12,3°C à la station de Virey, 13,1°C à la station de la Roche-Qui-Boit et 13°C à la station de Signy. **L'amplitude thermique hebdomadaire (Figure 14 et Annexe 3 pour l'amplitude thermique journalière) nous permet de voir que les variations de températures sont tamponnées à la sortie des barrages. Pour l'année 2018-2019, l'amplitude thermique hebdomadaire est de 3,8°C à Virey), 2,4°C à la Roche-Qui-Boit et 2,7°C à Signy.**

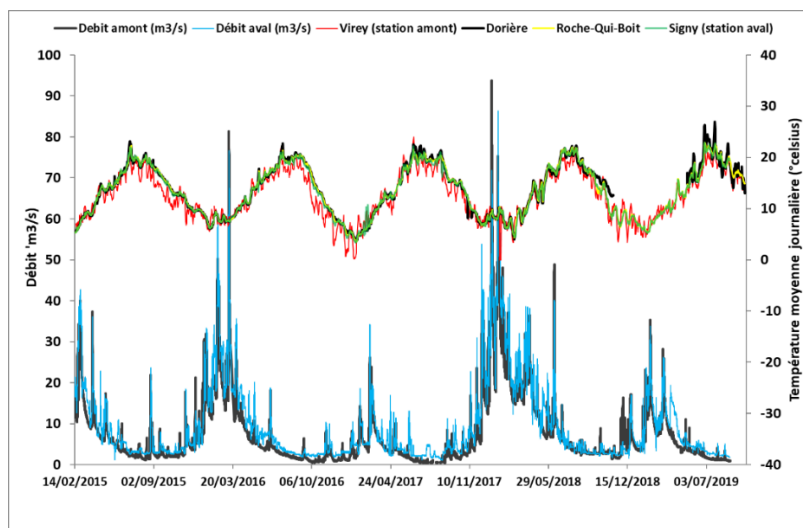


Figure 13 : Chronique des températures moyennes journalières des stations EDF et INRA sur la Sélune

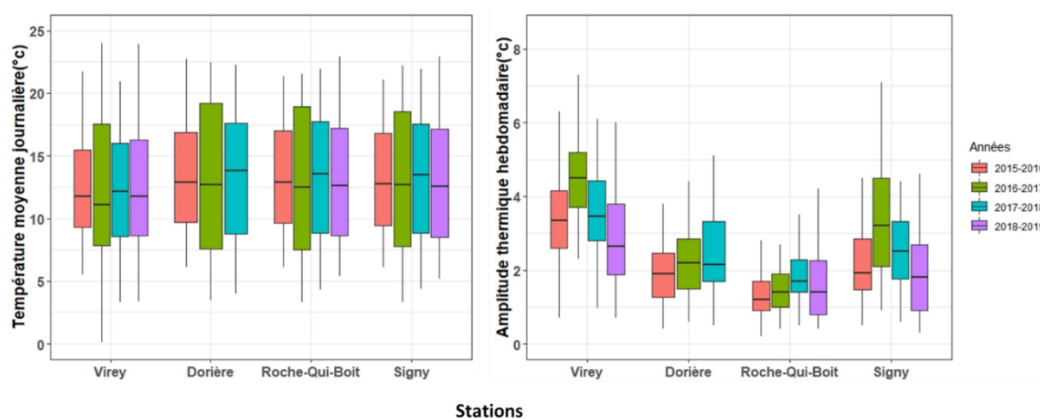


Figure 14 : Distribution en boxplot de l'amplitude thermique hebdomadaire et des températures moyennes journalières des stations de la Sélune de 2015 à 2019

3.2.3. Matières en suspension

Les concentrations de MES présentent classiquement des pics lors des événements de crue. Ces concentrations de MES à l'amont sont toujours supérieures à celles de l'aval avec l'abattement due à la présence des barrages (Figure 15). **Depuis le début des travaux de vidange, on note une hausse des concentrations de MES à l'aval en écoulement de base.** Pour cet écoulement de base, la concentration de MES à l'aval a augmenté de 20% alors qu'elle diminue de moitié à l'amont pour les 75% des échantillons prélevés (entre 2017 et 2019). En revanche, **ce n'est pas le cas encore pour les écoulements de crue** et c'est bien en crue que l'essentiel des MES est exporté. La concentration maximale de MES mesurée à l'amont est de 1241 mg/L contre 242 mg/L à l'aval (en période de crue pour 2018-2019). En écoulement de base, la concentration maximale de MES mesurée à l'amont est de 49 mg/L contre 64 mg/L à l'aval pour l'année 2018-2019.

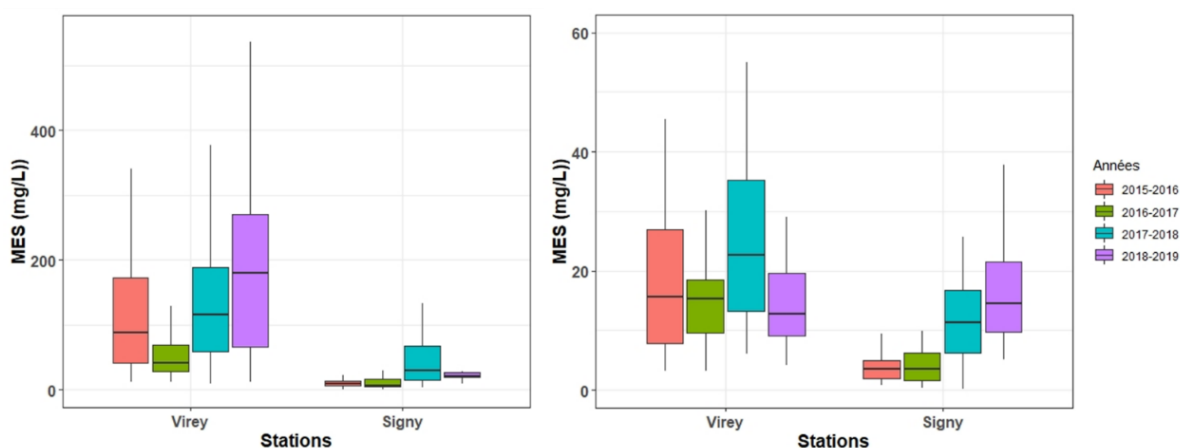


Figure 15 : Boxplot des concentrations de MES par an (en crue à droite, hors-crue à gauche)

3.2.4. Phosphore

Les concentrations de phosphore total (Ptotal) et dissous (PO4) présentent des pics similaires à ceux des concentrations de MES lors des événements de crue. Cependant **depuis le début des travaux de vidanges du barrage de Vezins, on note une hausse des concentrations de Ptotal et PO4 à l'aval durant l'écoulement de base** (Figure 16). Entre 2017-2018 et 2018-2019, la concentration de Ptotal a eu une hausse de 20% à l'aval contre 12% à l'amont pour 75% des échantillons prélevés en écoulement de base et pour le PO4, la concentration est de 18% à l'aval contre 10% à l'amont. La concentration maximale de Ptotal mesurée sur la période 2015-2019 est de 1,76 mg/L (21/05/2019) à l'amont contre 0,87 mg/L (31/01/2019) à l'aval. Et pour le PO4 la concentration maximale est de 0,714 mg/L (03/12/2018) à l'amont contre 0,717 mg/L (21/11/2018) à l'aval.

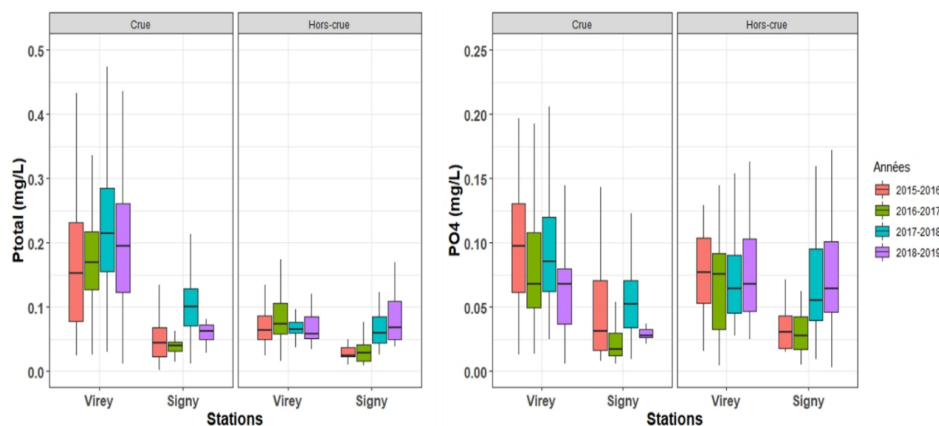


Figure 16 : Distribution en boxplot des concentrations de phosphore dissous et total en fonction des années hydrologiques, en crue et en écoulement de base, NB : l'échelle de mesure est différente sur les boxplots.

3.2.5. Anions majeurs et silice dissoute

Une dilution de la concentration est observée à l'amont des barrages lors des événements de crue pour les 3 anions majeurs : chlorures, nitrates, sulfates ainsi que pour la silice dissoute. Cette dilution associée aux événements de crue est assez fréquemment observée sur les bassins du Grand Ouest (rapport 2018). A l'aval, ces dilutions de concentrations sont fortement tamponnées (Figure 17), ceci s'explique par le mélange avec l'eau stockée au sein des deux réservoirs.

En écoulement de base, les ions nitrates, sulfates et chlorures ont des rythmes saisonniers synchrones à l'amont et à l'aval (voir rapport 2018). Les variations saisonnières de ces 3 concentrations sont à peu près synchrones entre elles puisque le maximum de NO₃ apparaît en même temps que les minimas de Cl et SO₄, et un léger retard par rapport au maximum de débit (voir rapport 2018). Ce **cycle saisonnier n'a pas été modifié par les barrages et les travaux de vidanges**.

Les **concentrations en écoulement de base de NO₃ et Cl** sont très **légèrement plus faibles à l'aval** (écart moyen d'1 mg/L pour NO₃ et Cl) **sauf pour l'année 2018-2019** où la concentration moyenne de NO₃ est supérieure à l'amont. A l'inverse, pour le SO₄ la concentration en écoulement de base est légèrement plus forte à l'aval avec une augmentation d'1,5 mg/L pour l'année 2018-2019 (l'écart moyen entre l'amont et l'aval est d'1,3 mg/L) (Figure 17). On note **également une légère augmentation** de la concentration de **silice dissoute** (<1 mg/L) à l'aval pour 75% des échantillons prélevés **depuis le début des travaux de vidange**.

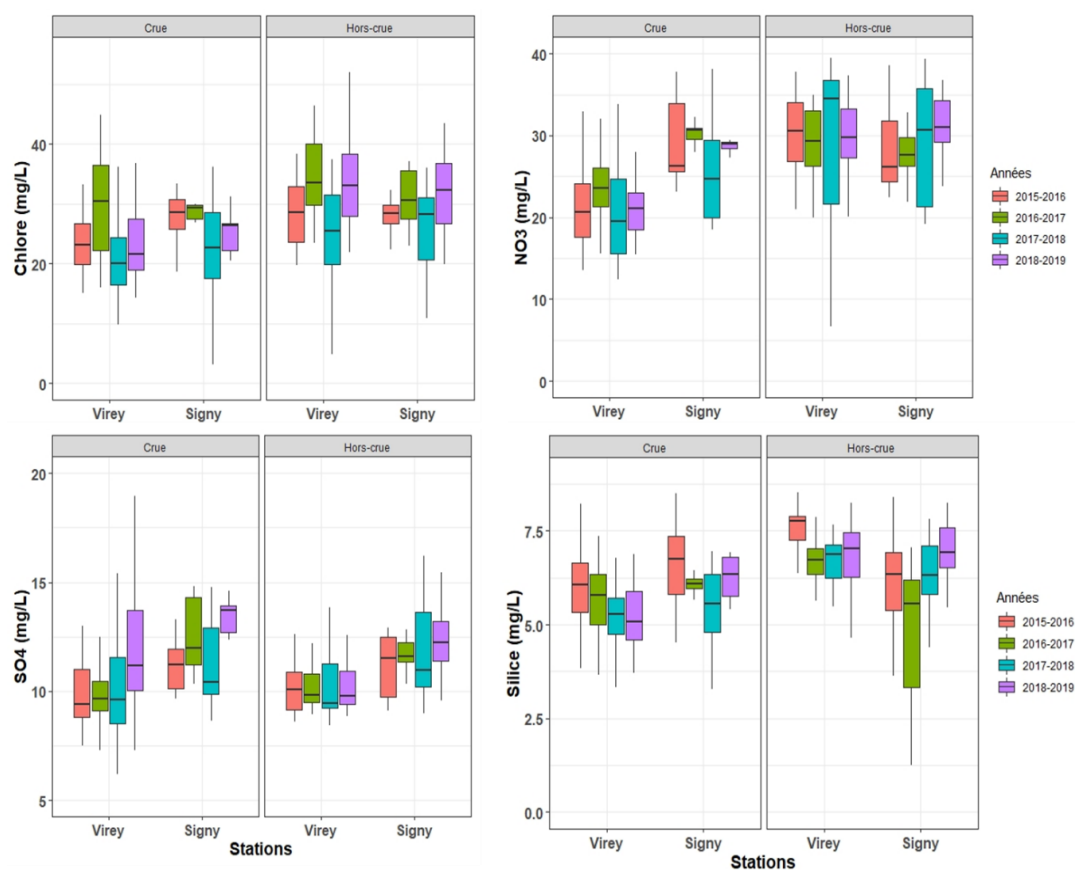


Figure 17 : Distribution en boxplot des concentrations chlorures, nitrates, sulfates et silice dissoute par année hydrologique, en période de crue et en écoulement de base, NB : les échelles des boxplots sont différentes.

3.2.6. Nitrites et ammonium

Le nitrite est présent systématiquement et l'ammonium quasi systématiquement à l'amont et à l'aval des barrages. **Les concentrations de nitrites à l'aval sont supérieures à l'amont depuis le début des travaux de vidange. Cependant pour la période 2018-2019, elles ont été réduites de 50% à l'aval**

pour 75% des échantillons prélevés **en période de crue**. En écoulement de base, la concentration de nitrite a baissée de 12% à l'aval pour 75% des échantillons prélevés (Figure 18).

La concentration maximale de nitrite mesurée à l'aval est de 1,37 mg/L (04/09/2018) contre 0,71 mg/L (21/05/2019) à l'amont sur la période 2015-2019. Pour l'ammonium, on note le retour à des concentrations moyennes de saison (0,09 mg/L) plus faible à l'aval comparé au début des travaux de vidange (0,35 mg/L) (rapport 2018).

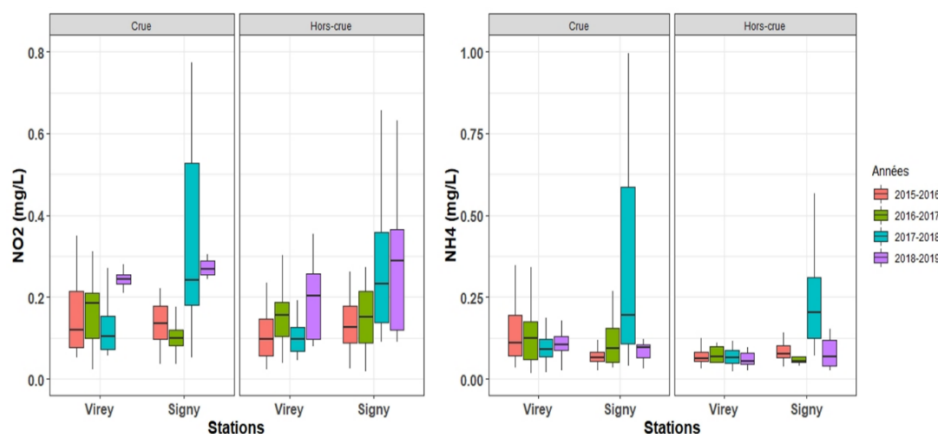


Figure 18 : Distribution en boxplot des concentrations de nitrites et d'ammonium par année hydrologique, en période de crue et écoulement de base, NB : les échelles des boxplots sont différentes.

3.2.7. Ratio C/N des matières en suspension

Le rapport du carbone particulaire sur l'azote particulaire (C/N) est un indicateur du degré de dégradation de la matière organique et de son origine. Un rapport C/N inférieur à 8 est indicateur d'une origine plutôt aquatique de la matière organique et un rapport de C/N supérieur à 8 indique plutôt une origine terrigène matière organique (rapport d'étape, 2016).

La variabilité interannuelle du C/N est différente entre Virey et Signy. A l'amont, la matière organique est terrigène car provenant des versants, la moyenne de C/N (2015-2019) est de 10,5 en crue (période correspondant à des exports de particules) et 9,7 en écoulement de base pour 75% des échantillons (Figure 19). A l'aval, le C/N est faible (surtout en 2015-2016) mais ces valeurs augmentent et se rapprochent de celles de l'amont. Le C/N moyen est de 7,5 en écoulement de base contre 8,9 en période de crue pour la période 2015-2019.

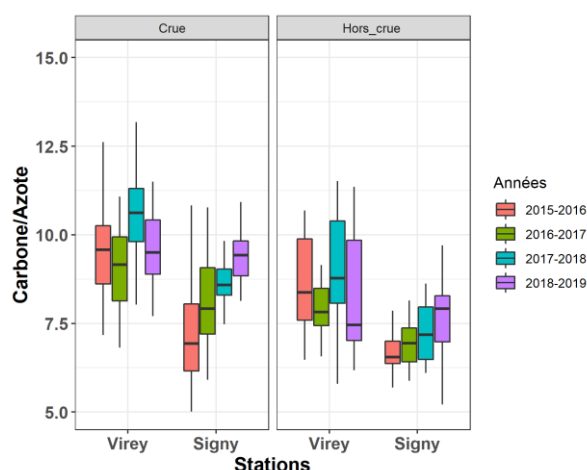


Figure 19 : Boxplot du rapport Carbone/Azote mesuré sur les MES en période de crue et hors-crue

3.3. Calculs des flux de sédiments fins

3.3.1. Station amont

Pour la période 2015-2019, la régression linéaire Turbidité/MES donne une pente $a = 1,458$ associée à une gamme d'incertitude $[1,415 ; 1,504]$ et une ordonnée à l'origine $b = 16,933$ associée à la gamme d'incertitude $[6,846 ; 21,017]$. Le flux annuel à l'amont est ainsi estimé à 15172 tonnes soit environ 24,1 tonnes/km² pour l'année hydrologique 2018-2019 avec une incertitude de 19 % (Tableau 4).

Les équations de régression établies entre 2015-2019 (Tableau 3) à Virey montre une pente assez stable entre 2015-2018. Pour l'année 2018-2019, la pente de l'équation a baissé ce qui pourrait être expliquer par un changement dans la granulométrie des sédiments exportés à l'amont dû aux conditions hydrométéorologiques sèches de cette année: la capacité de transport (débit) et les évènements érosifs (nombre de crues) étant réduits, les MES seraient plus fines, donc les concentrations en MES plus faibles pour des valeurs de turbidité identiques (le turbidimètre étant plus sensible aux particules les plus fines). Les estimations de flux annuels (Tableau 4) sont toutefois cohérentes entre les équations (donc la relation MES-Turbidité est relativement robuste sur cette station) avec une incertitude autour de 20%.

3.3.2. Station aval

Pour la période 2017-2019, la régression linéaire Turbidité/MES donne une pente $a = 0,877$, dans une gamme d'incertitude $[0.870 ; 0.893]$ et pour l'origine $b = 2,480$, dans la gamme d'incertitude $[1.323 ; 2.671]$. Le flux annuel à l'aval est ainsi estimé à 3167 tonnes soit environ 4,07 tonnes/km² pour la période 2018-2019 avec une incertitude de 10% (Tableau 4).

La pente des régressions à l'aval (Tableau 3) s'est stabilisée depuis 2018, cette période est marquée par la vidange du barrage amont. En effet, on a enregistré à partir de cette période des valeurs de turbidité plus importantes, alors qu'en état pré-arasement on n'enregistrait à l'aval qu'un bruit de fond, à partir duquel il était difficile d'établir une relation turbidité-MES. Les estimations de flux à l'aval sont cohérentes pour les équations 6, 7 et 8 avec une incertitude entre 10 et 20%.

Virey	Période	a	b	R²
EQ-1	2015-2017	1,909	-16,512	0,96
EQ-2	2015-2018	1,995	-22,228	0,95
EQ-3	2017-2018	2,145	-22,463	0,96
EQ-4	2015-2019	1,458	16,933	0,77
Signy	Période	a	b	R²
EQ-5	2015-2017	3,359	-8,202	0,84
EQ-6	2015-2018	0,8442	7,045	0,88
EQ-7	2017-2018	0,8917	1,972	0,96
EQ-8	2017-2019	0,8774	2,4800	0,96

Tableau 3 : Résumé des équations Turbidité-MES calibrées pour chaque station selon les périodes considérées. Les EQ-1, 2, 5 et 6 font références aux équations présentées dans les rapports précédents, les EQ-4 et 8 en sont une actualisation en intégrant les données de la période 2018-2019 ; les EQ-3 et 7 sont établies uniquement sur la période où les travaux de vidange ont débuté (avril 2017).

	Flux (T/km²/an)	Incertitude %	Flux (T/km²/an)	Incertitude %	Flux (T/km²/an)	Incertitude %	Flux (T/km²/an)	Incertitude %
Virey	2015-2016		2016-2017		2017-2018		2018-2019	
EQ-1	26,1	12	6,5	14	46	24	21,7	21
EQ-2	25,2	10	6,1	15	45	21	21,4	19
EQ-3					50	25	23,3	22
EQ-4	32,6	21	8,5	26	55	20	24,1	19
Signy	2015-2016		2016-2017		2017-2018		2018-2019	
EQ-5	11,6	39	1,25	75	52,1	27	11,3	32
EQ-6	6,95	17	1,89	21	19	12	5,1	15
EQ-7					16,5	21	4	20
EQ-8	5,08	11	1,13	18	16,63	7	4,07	10

Tableau 4 : Récapitulatif des flux calculés de MES avec les différentes équations à l'amont et à l'aval. Les équations sont détaillées dans le tableau 3.

Les estimations de flux de sédiments fins confirment : i) l'augmentation du flux annuels exportés (à l'amont et à l'aval) avec le flux d'eau annuel et les précipitations annuelles (Figure 20), ii) l'abattement des flux de sédiments fins par les barrages étant donné les différences entre l'amont et l'aval (79% pour l'année 2018-2019 contre 55% en moyenne pour la période 2015-2018).

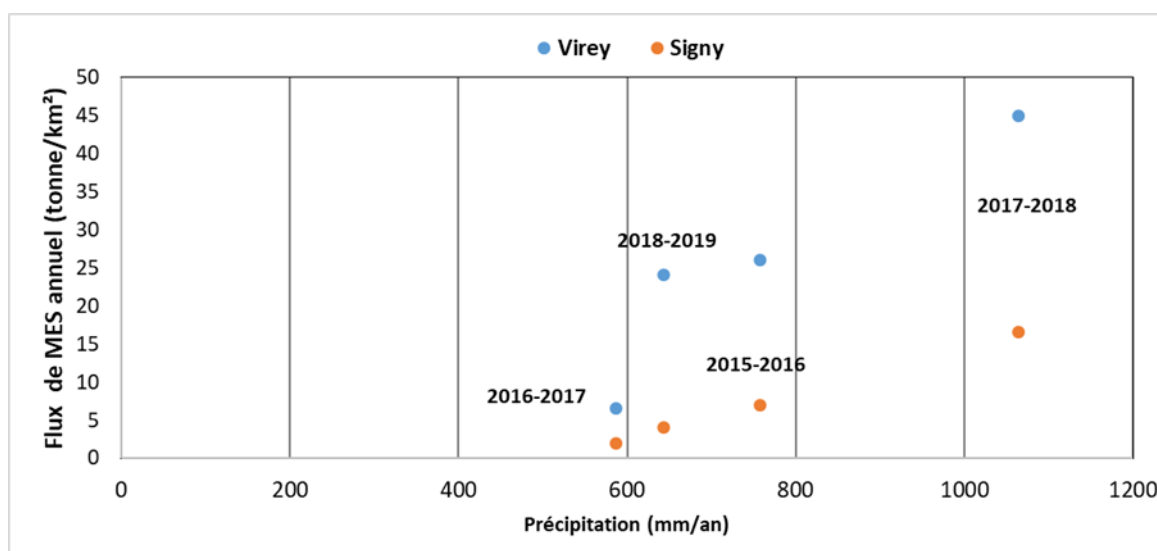


Figure 20 : Estimation des flux de sédiments en fonction des précipitations

3.4. Calcul des flux annuels de nutriments

On note une différence notable sur les résultats entre la méthode SRC₅₀ et les méthodes IRC et DWC (Annexe 4) : les flux calculés avec la régression segmentée (SRC₅₀) sont surestimés comparés aux deux autres méthodes (IRC et DWC). En revanche, les résultats de calcul de flux avec IRC ET DWC convergent bien sauf pour le phosphore où l'on note des flux plus élevés sur le calcul DWC. L'allure des droites de régressions segmentées et intégrales montre une importante dispersion autour des régressions concentrations-débit (Annexe 5 à Annexe 12). Ainsi la méthode des concentrations pondérées par le débit (DWC) est la méthode retenue ici comme la plus appropriée pour l'estimation des flux car elle ne dépend pas de la qualité des régressions linéaires et elle permet l'estimation de l'incertitude associée.

Les estimations de flux annuels de nutriments (

Tableau 5) montrent un premier contrôle des flux à l'amont comme à l'aval par le flux d'eau. Les flux de phosphore total sont plus importants à l'amont sur la période 2015-2018 avec une imprécision de 11%. A l'aval, on note une hausse des flux de phosphore total (hausse de plus 35% par rapport à l'amont) pour la période 2018-2019 (période correspondant à la phase de vidange du barrage) et les incertitudes associées à ces flux aval sont estimées à 17% pour la période avant travaux (2015-2017) et à 9% durant la période des travaux (2017-2019). Pour les éléments dissous, les flux (et flux spécifiques) sont plus importants à l'aval (sauf pour le P-PO₄ en 2017-2018) avec une incertitude de 3 à 7% (contre 4 à 10% à l'amont). Les incertitudes des calculs de flux de nutriments sont globalement satisfaisant, elles se situent entre 1 et 11% à l'amont et 4 et 19% à l'aval. Les incertitudes à l'aval se sont améliorées après travaux pour le Phosphore surtout et la silice un peu également.

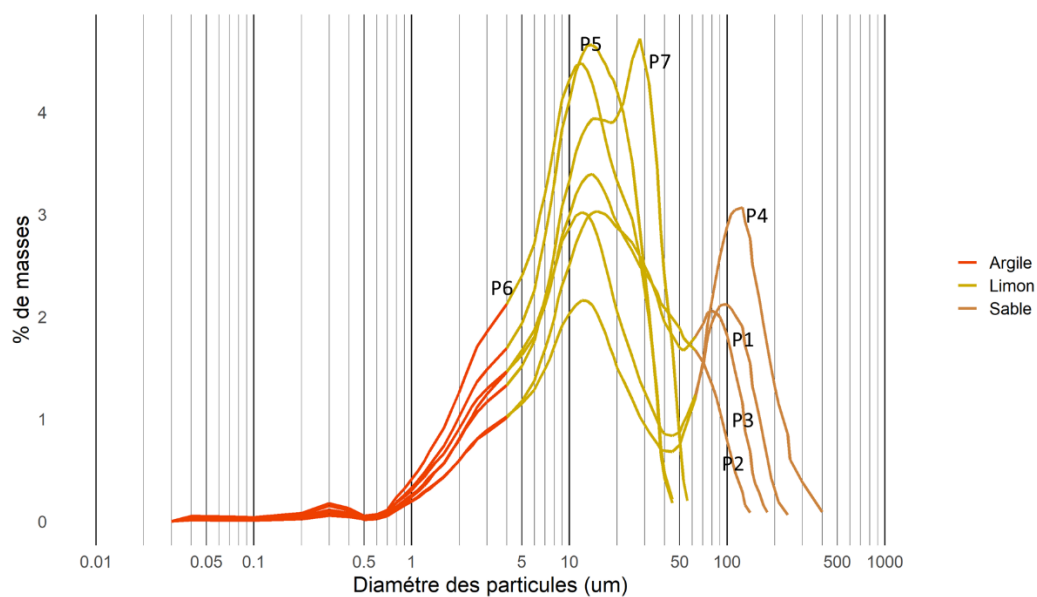
Virey	2015-2016		2016-2017		2017-2018		2018-2019	
	Flux	Imprécision (%)	Flux	Imprécision (%)	Flux	Imprécision (%)	Flux	Imprécision (%)
Ptotal	28	11	8	11	65	11	11	11
P-PO4	6	1	2	1	12	1	3	1
N-NO3	1927	10	636	10	2681	10	1118	10
SO4	2671	7	1075	7	3798	7	1747	7
Si	1999	8	669	8	2318	8	1062	8
Cl	6267	4	3109	4	7707	4	4763	4

Signy	2015-2016		2016-2017		2017-2018		2018-2019	
	Flux	Imprécision (%)	Flux	Imprécision (%)	Flux	Imprécision (%)	Flux	Imprécision (%)
Ptotal	12	17	6	17	49	9	14	9
P-PO4	5	19	2	19	11	4	5	4
N-NO3	2409	6	858	6	3545	7	1383	7
SO4	3655	6	1659	6	5418	5	2399	5
Si	2419	8	714	8	3078	5	1288	5
Cl	8302	3	4054	3	10598	3	5484	3

Tableau 5 : Flux (en T/km²/an) et imprécisions annuelles des nutriments à l'amont et à l'aval.

3.5. Caractérisation des MES (nature, composition)

La campagne granulométrique a permis de déterminer les portions granulométriques (argiles, limons et des sables fins) des sédiments qui transitent sur le cours de la Sélune (Figure 21). La détermination de la taille des particules présentes dans chaque échantillon analysé par granulométrie laser permet de caractériser le type de sédiment (Figure 22). Ces sédiments échantillonnés sont plus grossiers à l'amont de la Sélune et deviennent plus fins à l'approche de l'ancienne retenue du barrage Vezins. En effet, on note une proportion de sable très fin entre 5% et 35% (de Sélune amont à Pont de la république), une proportion de limon grossier entre 20% et 60% (de Sélune amont à Pont de Biards) et plus de 50% de limon très fin à fin à partir de la base de loisir à l'aval du barrage de Vezins. Ainsi les MES qui transitent à l'aval de Vezins sont essentiellement constitué d'argiles et de limons, les particules plus grossières étant retenues à l'amont des barrages.



Toponyme	Sélune amont	Step amont	Step aval	Pont de la république	Pont des Biards	Base de loisirs	Vezins
Point de prélèvement	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7

Figure 21 : Portion de sédiment par échantillon

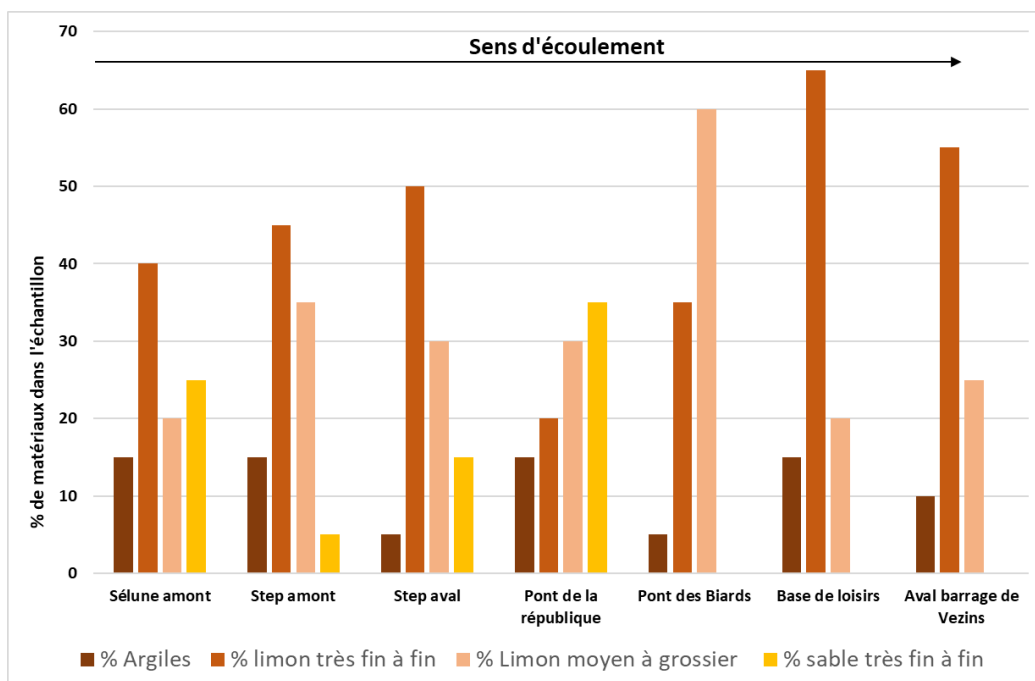


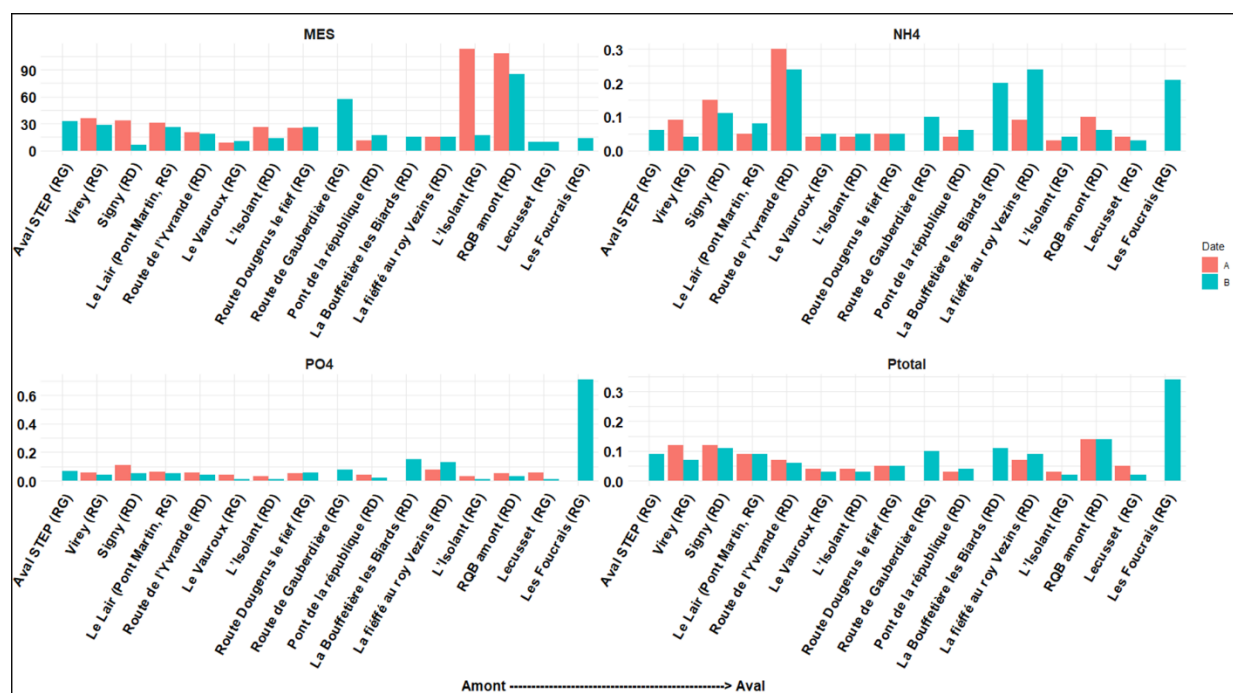
Figure 22 : Histogramme des proportions de sédiments par échantillon

3.6. Concentrations des affluents

L'analyse des concentrations d'affluents sur deux périodes (hautes et basses eaux) a permis de mettre en évidence des valeurs hautes de concentrations sur certains affluents (Figure 23). Les

concentrations de MES durant la période des basses eaux présentent des pics > 100 mg/L sur la rive droite de la Sélune notamment sur le bras gauche de l'Isolant (112 mg/L) et sur la Roche-Qui-Boît amont (107 mg/L) alors que la station amont enregistre 35 mg/L. Ces stations drainent les bassins où la proportion de surface en cultures d'été est plus importante (40 à 44%) ce qui pourrait expliquer une érosion plus importante. Pour le phosphore, la station des Foucrais se démarque avec une concentration de 0,33 mg/L contre 0,10 mg/L à la station amont sur la période de hautes eaux. Cette station draine un bassin où la proportion de surface urbanisée est relativement importante par rapport aux autres bassins (27%) et localisée à proximité d'une station d'épuration. Des concentrations élevées en ammonium sont également notées sur certains affluents, elles sont comprises entre 0,20 mg/L (les Foucrais et la Bouffetière les Biards) et 0,24 mg/L (l'Yvrande et la Fieffé au Roy Vezins) contre 0,03 mg/L à l'amont et 0,11 mg/L à l'aval. Pour les chlorures et les sulfates en basses eaux, seul l'Yvrande se démarque véritablement avec une concentration de sulfates trois fois plus importantes (34,3 mg/L) qu'à l'amont et l'aval (concentration moyenne de 10 mg/L) et cinq fois supérieures pour les chlorures (112 mg/L contre 28mg/L à l'amont).

La concentration des nitrates présente des valeurs un peu plus fortes à l'amont au pont de la République (44 mg/L contre 34 mg/L sur la station en amont) et à l'aval à Douguerus le fief (63,94 mg/L contre 34 mg/L sur la station en aval). Ces valeurs plus élevées sont a priori plutôt en relation avec des pratiques agricoles spécifiques qu'avec les caractéristiques générales d'occupation de ces bassins.



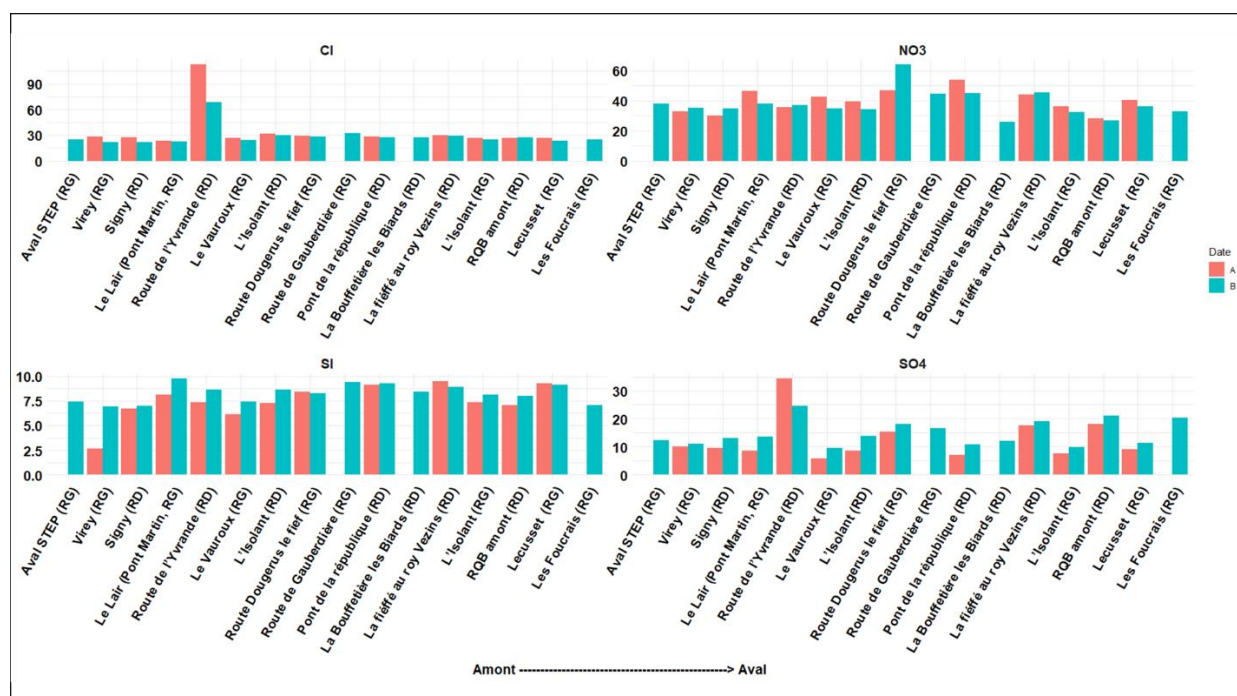


Figure 23 : Concentrations des éléments dissous et particuliers en basses et hautes eaux sur les affluents de la Sélune. NB : RD (rive droite), RG (rive gauche), A (22-05-2019), B (19-11-2019).

4. Conclusion et perspectives

Les quatre années hydrologiques de suivi des flux sédimentaires et hydro-chimiques sont marquées par une variabilité hydro-climatique et par les travaux de vidange et démantèlement du barrage Vezins sur les deux dernières années.

Les résultats majeurs de ces observations sont :

- La variabilité interannuelle des flux d'éléments liée à celle des flux d'eau
- Les flux aval plus importants pour les nutriments et plus faibles pour les MES et le phosphore, en particulier dans la situation initiale (avec les barrages en fonctionnement)
- L'augmentation des concentrations de MES et phosphore à l'aval depuis le début des travaux de vidange et le démantèlement du barrage de Vezins. Pour la dernière année 2018-2019, les flux de Phosphore à l'aval deviennent même plus importants que les flux à l'amont mais pas les flux de MES.

Le suivi des flux sur ces stations amont et aval se poursuit pour la deuxième phase des travaux qui concerne le barrage de la Roche-Qui-Boit.

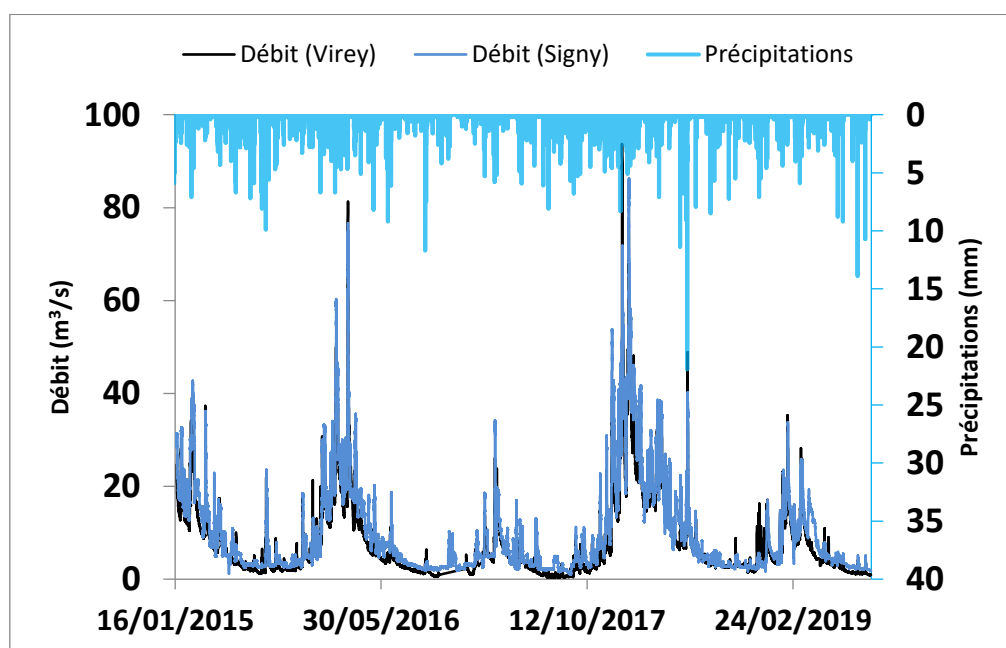
Deux campagnes de mesures sur les affluents ont permis d'explorer la variabilité spatiale de la chimie sur les affluents entre les barrages, celle-ci est relativement stable avec quelques points qui se démarquent pour certains éléments. Une campagne sur la granulométrie des MES a permis de caractériser les sédiments transitant de l'amont des barrages à l'aval.

Plusieurs perspectives sont en cours de réflexion, il apparaît pertinent de poursuivre ces campagnes (sur les affluents et granulométriques) pour suivre l'évolution de ces paramètres, une estimation des débits provenant de ces affluents par modélisation pourrait permettre d'estimer (avec moins de précision que sur les stations de Virey et Signy toutefois) l'ordre de grandeur des flux d'éléments apportés par ces affluents entre les 2 barrages. Par ailleurs, un projet sur le traçage de l'origine des sédiments par les marqueurs moléculaires de la matière organique particulaire est également à l'étude (stage de M2, projet LEARNS).

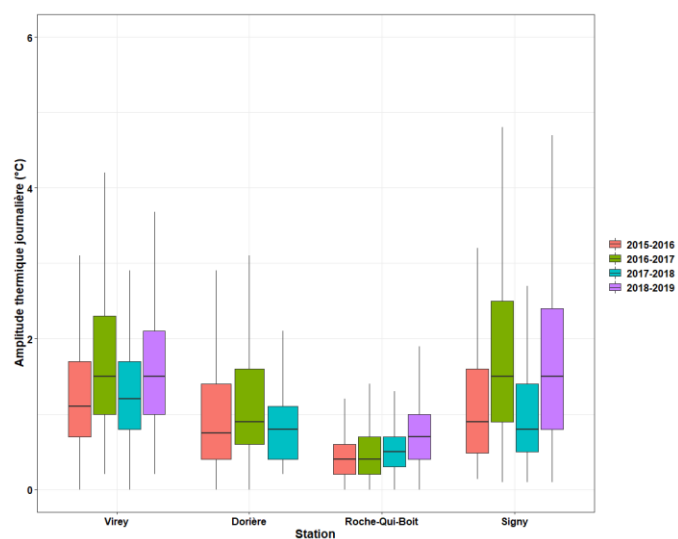
Annexes

Bias for $b_{50sup} < 0$										Bias for $b_{50sup} < 0$													
1 year				3 years				5 years				1 year				3 years				5 years			
d	u	v	R^2	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	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	-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	-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	-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	-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	-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	-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	-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	-0.007	-0.049	0.91		
10th imprecision percentile - e_{10}										90th imprecision percentile - e_{90}													
1 year				3 years				5 years				1 year				3 years				5 years			
d	u	v	R^2	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	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	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	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	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	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	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	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	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	0	1.095	0.76		

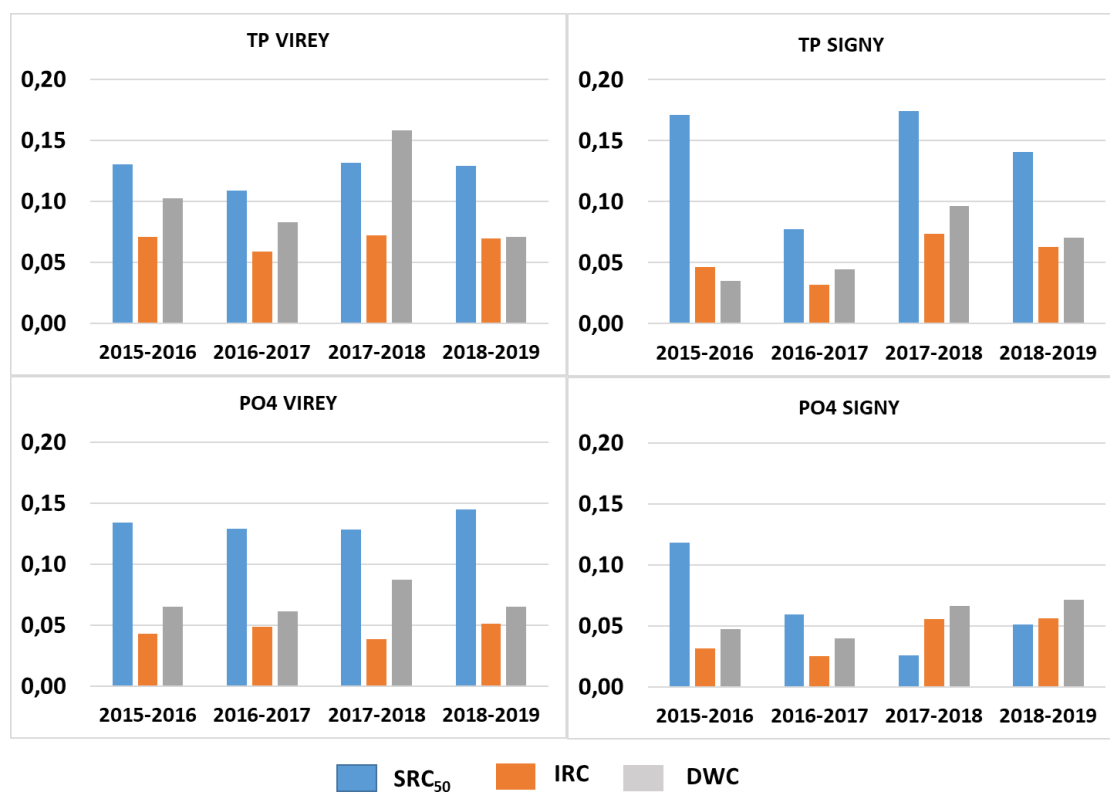
Annexe 1 : Error nomograph parameters for different sampling intervals and reporting periods (1, 3 and 5 years): $y = ux^2 + vx$, where $x = M_{2\%}$ and $y = e_{50}$ (bias), e_{10} (10th imprecision percentile), e_{90} (90th imprecision percentile)

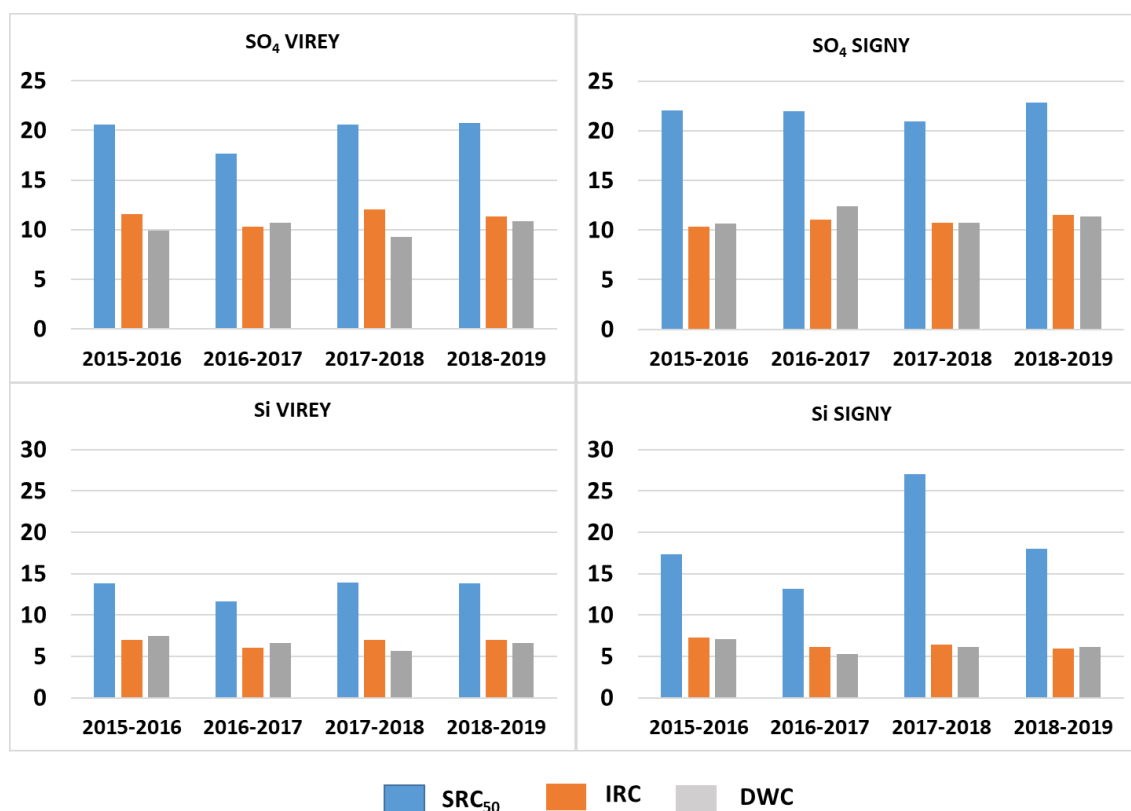
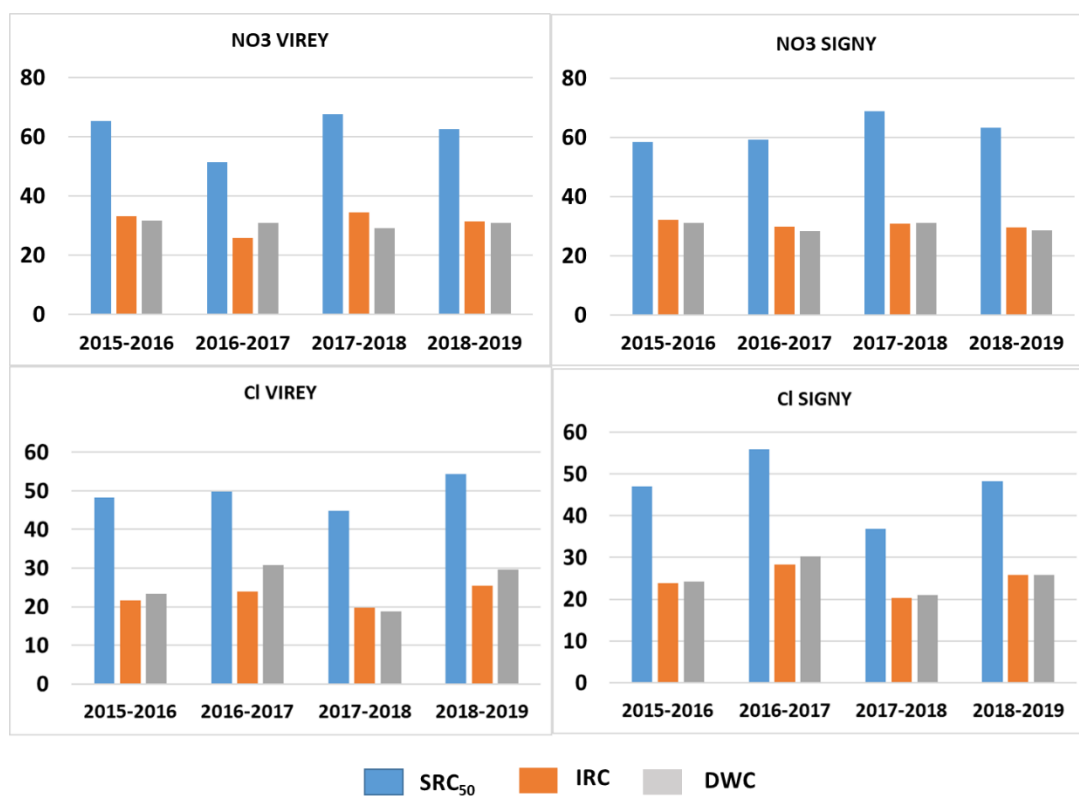


Annexe 2 : Chronique des débits en fonction des précipitations à l'amont et à l'aval des barrages

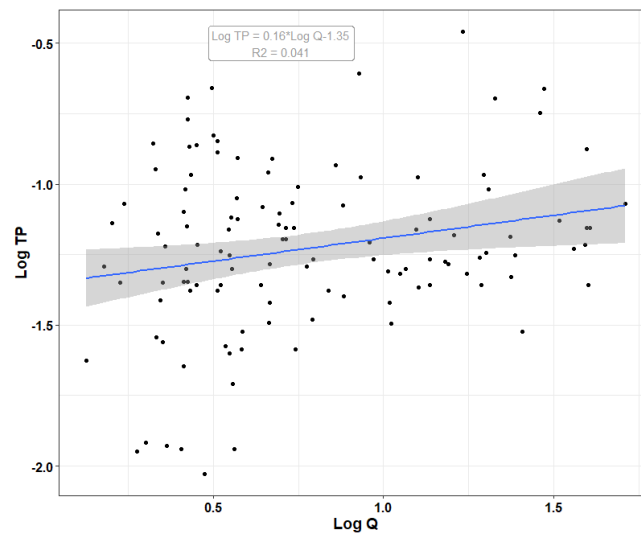


Annexe 3 : Amplitude thermique journalière des stations sur la Sélune

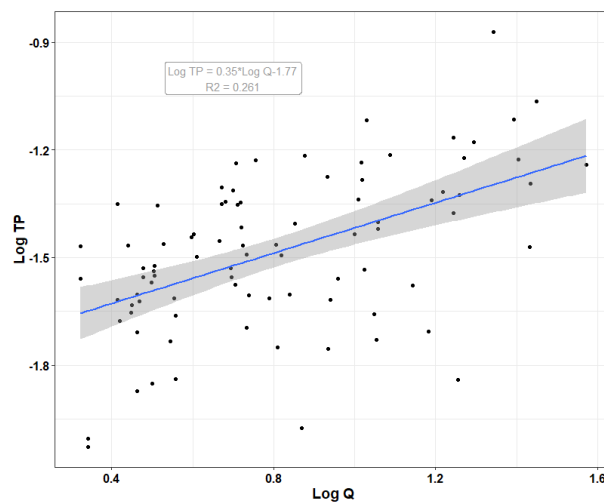




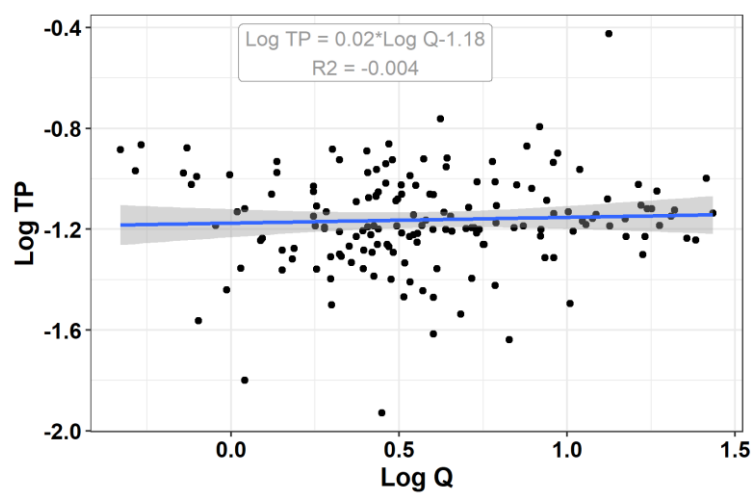
Annexe 4 : Comparaison des flux annuels spécifiques de nutriments (en mg/L) estimés avec les méthodes SRC₅₀, IRC et DWC



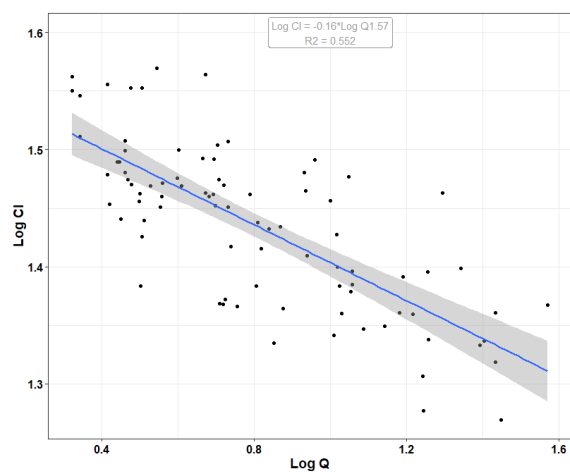
Annexe 5 : relation log Q/log Ptotal pour la station de Signy en 2014-2017 (IRC)



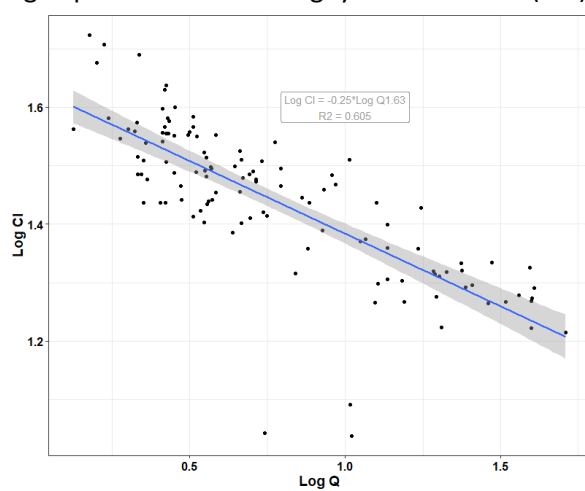
Annexe 6 : relation log Q/log Ptotal pour la station de Signy en 2017-2019 (IRC)



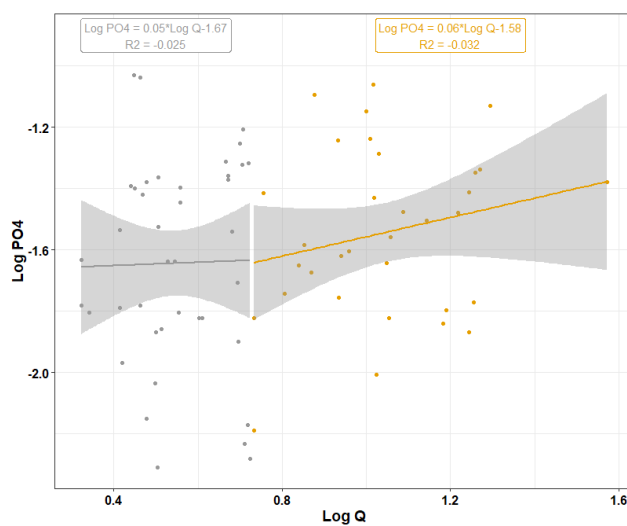
Annexe 7 : relation log Q/log Ptotal pour la station de Virey en 2014-2019 (IRC)



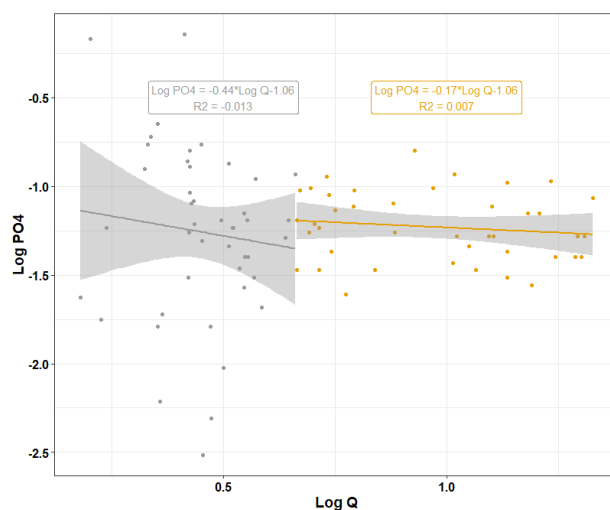
Annexe 8 : relation log Q/log CI pour la station de Signy en 2014-2019 (IRC)



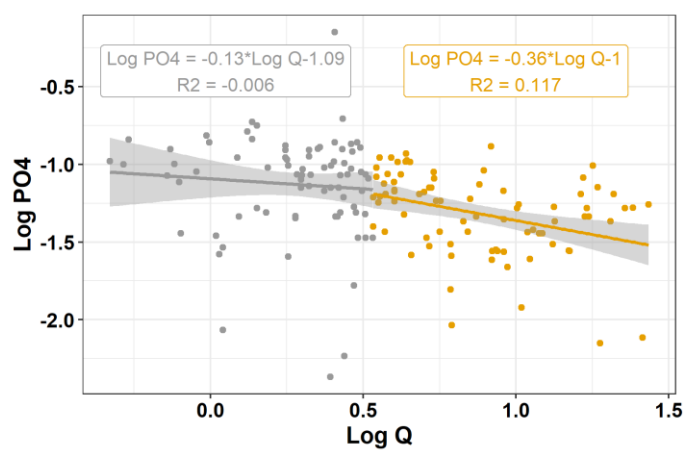
Annexe 9 : relation log Q/log CI pour la station de Signy en 2017-2019 (IRC)



Annexe 10 : relation log Q/log PO4 pour la station de Signy en 2014-2017 (SRC₅₀)



Annexe 11 : relation log Q/log PO4 pour la station de Signy en 2017-2019 (SRC₅₀)



Annexe 12 : relation log Q/log PO4 pour la station de Virey en 2015-2019 (SRC₅₀)

Bibliographie

- Dupas, R., Minaudo, C., Abbott, B.W., 2019. Stability of spatial patterns in water chemistry across temperate ecoregions. *Environmental Research Letters* 14.
- Ferguson, R.I., 1986. RIVER LOADS UNDERESTIMATED BY RATING CURVES. *Water Resour. Res.* 22, 74-76.
- Fovet, O., Ndom, M., Crave, A., Pannard, A., 2020. Influence of dams on river water-quality signatures at event and seasonal scales: The Selune River (France) case study. *River Res. Appl.*, 12.
- 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.
- 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., 2007. Riverine fluxes of pollutants: Towards predictions of uncertainties by flux duration indicators. *C. R. Geosci.* 339, 367-382.
- Moatar, F., Meybeck, M., Raymond, S., Birgand, F., Curie, F., 2013. River flux uncertainties predicted by hydrological variability and riverine material behaviour. *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.