



Dynamique fluviale (Volet 1) : Flux hydriques, sédimentaires et chimiques [Programme Sélune - Phase pré-arasement. Rapport bilan 2017-2018]

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 2017-2018]. [Rapport de recherche] Agence de l'Eau Seine-Normandie. 2019, pp.32. hal-03381929

HAL Id: hal-03381929

<https://hal.inrae.fr/hal-03381929>

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



INRA
SCIENCE & IMPACT



GEO SCIENCES
Rennes

Programme Sélune

Phase pré-arasement

Rapport bilan 2017-2018

Dynamique fluviale

Volet 1

Flux hydriques, sédimentaires et chimiques

Auteurs

Mamadou NDOM¹, Ophélie FOVET¹, Alain CRAVE² et Nicolas GILLIET¹

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

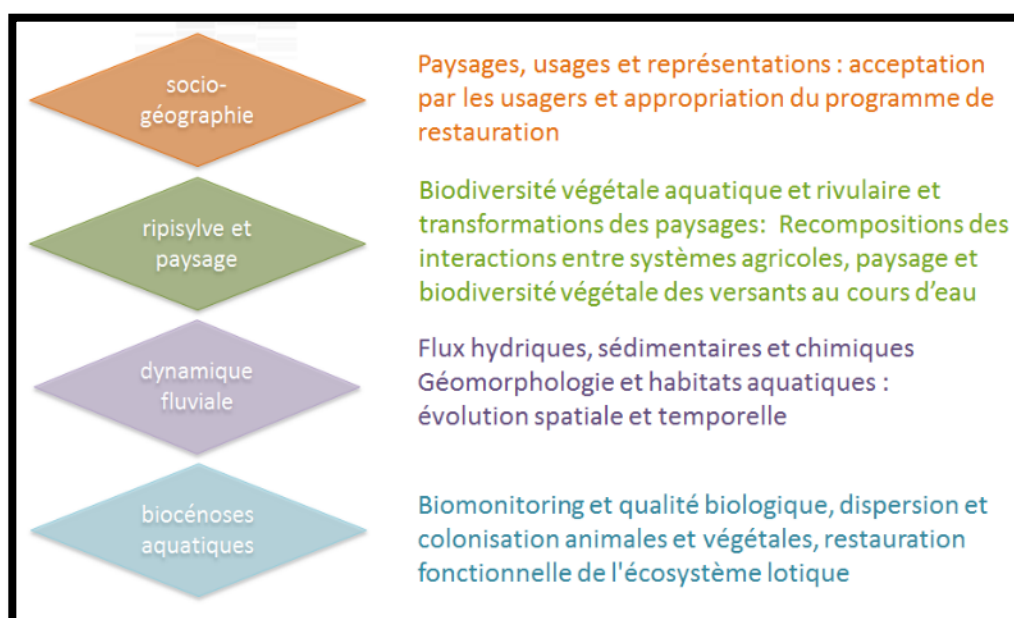
2 : UMR CNRS-Université de Rennes 1, Géosciences Rennes

Programme scientifique de suivi du fleuve Sélune -2015-2018-
Phase de travaux de vidange du barrage de Vezin

Volet « dynamique fluviale » : Etudes des flux hydriques,
Sédimentaires et chimiques

1. Contexte et objectifs de l'étude

Ce rapport s'inscrit dans le cadre du programme Sélune financé par l'agence de l'Eau Seine-Normandie, ce financement a permis l'embauche d'un ingénieur d'étude à temps plein pour la collecte, l'analyse et le traitement des données ainsi que la gestion des stations de suivis multi-paramètres sur le Fleuve Sélune. Le programme scientifique du suivi de l'arasement des barrages sur la Sélune, coordonné par l'INRA, a débuté en 2012. Il est a été organisé en quatre thèmes interdépendants :



Le présent rapport concerne le thème Dynamique fluviale.

Les barrages constituant une barrière physique affectant diversement les flux hydriques, sédimentaires et chimiques, ainsi que la géomorphologie du fleuve Sélune. L'objectif du suivi est d'acquérir une bonne connaissance des flux, 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 (origine des flux, processus de transfert et conditions hydrodynamiques, variabilité saisonnière, événementielle et interannuelle) afin de distinguer leurs déterminants climatiques, des conséquences de l'arasement des barrages. L'impact des barrages sur la géomorphologie de la Sélune ne se réduit pas à la zone ennoyée. Leur rôle dans la régulation des débits et du transport solide a des conséquences directes, particulièrement à l'aval, sur les processus fluviaux et les structures sédimentaires grossières, qui façonnent la morphologie du lit. Ces aspects sont étudiés par le thème « Dynamique fluviale » du programme, et en particulier l'étude des flux hydriques, sédimentaires et chimiques présentée ici. Le thème « Dynamique fluviale » implique 3 Unités Mixtes de Recherche : SAS (Rennes), Géosciences Rennes et LETG (Rennes, Caen).

Pour rappel, 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). L'année 2014 a permis de recueillir les premiers résultats qui correspondent à la phase de suivi pré-arasement du programme, essentiellement concernant les volets 1 et 2 (Rapport d'étape 2014). Concernant le volet 1, 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 intégrant de nouvelles études, en complétant les campagnes débutées en 2013 et 2014 (Rapport d'étape 2015).

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 et le rapport de 2018 donne un bilan rétrospectif des résultats sur les flux hydriques, sédimentaires et chimiques sur la période 2014-2017. Les suivis ont été poursuivis en 2018, tandis que les travaux de vidange et de gestion sédimentaire associée débutaient en avril 2017. L'année 2018, a aussi été marquée par une opération d'inter-comparaison des capteurs de turbidité des différentes stations en collaboration avec l'équipe d'EDF.

Le présent rapport propose un bilan comparatif des résultats des 3 années hydrologiques pour le volet flux hydriques, sédimentaires et chimiques sur la période 2015-2018 et dans le contexte des travaux de vidanges du barrage de Vezin amorcés en avril 2017. Le bilan des trois années hydrologiques comprend la comparaison interannuelle des paramètres suivis et les calculs correspondant des flux annuels en présence des barrages et lors des travaux de vidange. Une première partie rappelle la localisation des stations, le matériel et les paramètres suivis. Pour plus de détails sur la partie méthodologie, on pourra se référer aux rapports d'étape 2013 et 2014. La deuxième partie présente les résultats du suivi de débit, température, et des concentrations sur les stations installées sur le cours principal de la Sélune en amont et en aval des barrages. La troisième partie propose une estimation des flux sédimentaires fins et des flux dissous sur les deux stations (en amont et aval des barrages).

Les résultats sont ici exposés sous l'angle de la comparaison amont/aval des paramètres à deux échelles de temps : i) les dynamiques saisonnières et ii) leurs dynamiques en condition de crue, c'est-à-dire associée à un évènement hydrologique lui-même associé à un évènement de précipitation. On distingue donc « écoulement de base », pour les périodes sans variation hydrologique liées directement à des précipitations et « écoulement en crue », les périodes où un évènement de pluie induit une réponse hydrologique du fleuve même de faible ampleur. Les bilans annuels (calcul de flux) sont réalisés par année hydrologique et non civile en prenant comme date initiale le 1er septembre.

Sommaire

1.	Contexte et objectifs de l'étude	1
2.	Rappel : dispositifs et protocole de suivi des flux	5
2.1	Localisation des stations	5
2.2	Equipement des stations	6
2.3	Protocole de prélèvement et méthode d'analyse par paramètres	8
3.	Dynamique saisonnière et en crue des paramètres hydrologiques, sédimentaires et physico-chimiques dans le contexte des travaux de vidange	9
3.1	Une gestion des barrages visant un minimum d'impact sur l'hydrologie	9
3.2	Effet tampon des barrages sur la température	11
3.3	Abattement des matières en suspension	13
3.4	Effets des barrages sur les transferts d'éléments chimiques	14
3.4.1	Piégeage du phosphore avec les sédiments	15
3.4.2	Amortissement des dilutions en crue pour les anions majeurs et la silice dissoute	15
3.4.3	Evolution du matériel autochtone à l'aval	17
4.	Conséquences pour les flux sédimentaires et chimiques	18
4.1	Calcul des flux annuels de sédiments fins	18
4.2	Calcul des flux annuels de nutriments	22
5.	Conclusion et perspectives	25
	Annexes	26
	Bibliographie	31

Table des illustrations

Figure 1 : Localisation des stations de suivi multi-paramètres sur le bassin versant de la Sélune.....	5
Figure 2 : Photo de la station aval (Station INRA)	6
Figure 3 : Station amont (EDF-INRA), à gauche : le préleveur installé par l'INRA, À droite : les sondes et le dispositif de suivi installés par EDF.	7
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)	8
Figure 5 : Préparation au laboratoire des échantillons d'eau prélevée en vue des différentes analyses.	9
Figure 6 : Chronique des précipitations de 1969 à 2018 à Saint-Hilaire-du-Harcouët	10
Figure 7: Chronique des débits en fonction des précipitations à l'amont et à l'aval des barrages	10
Figure 8 : Courbe des débits classés (station de Virey (à gauche) et station de Signy (droite))	11
Figure 9 : Distribution en boxplot des débits moyens journaliers sur les stations amont et aval par année hydrologique	11
Figure 10 : Chronique des températures moyennes journalières des stations EDF et INRA sur la Sélune	12
Figure 11 : Distribution en boxplot de l'amplitude thermique hebdomadaire et des températures moyennes journalières des stations de la Sélune de 2015 à 2018	13
Figure 12 : Concentrations de MES mesurées sur la station amont et aval.....	14
Figure 13 : Distribution en boxplot d'évolution des concentrations de MES en fonction des années hydrologiques, en crue et en écoulement de base	14
Figure 14 : 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.....	15
Figure 15 : Distribution en boxplot des concentrations en chlorures (A), nitrates (B), sulfates (C) et silice dissoute (D) par année hydrologique, en période de crue et écoulement de base, NB : les échelles des boxplots sont différentes.....	16
Figure 16 : 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.	17
Figure 17 : Evolution du rapport carbone/azote particulaire par année hydrologique, en période de crue et d'écoulement de base.....	18
Figure 18 : Relation entre la turbidité et la concentration de MES (Eq.2)	19
Figure 19 : Relation entre la turbidité et la concentration de MES (Eq.3)	20
Figure 20 : Relation entre la turbidité et la concentration de MES (Eq.5)	20
Figure 21 : Relation entre la turbidité et la concentration de MES (Eq.6)	21
Figure 22 : Estimation des flux de sédiments en fonction des précipitations (à gauche les flux mensuels, à droite les flux annuels de sédiment)	22
Figure 23 : Flux annuels en éléments dissous (tonnes) exportés à l'amont et à l'aval des barrages. ..	24

Tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des paramètres mesurés sur les stations de la Sélune	7
Tableau 2 : Résumé des équations Turbidité-MES calibrées pour chaque station selon les périodes considérées	21
Tableau 3 : Tableau récapitulatif des flux calculés de MES avec les différentes équations à l'amont et à l'aval	22
Tableau 4 : Flux annuels spécifiques calculés pour les éléments dissous exportés essentiellement en écoulement de base.	23

Table des annexes

Annexe 1: Comparaison des chroniques de concentrations de la station Amont des barrages au pont de Virey – St Hilaire du Harcouet avec la chronique AESN	26
Annexe 2 : Comparaison des chroniques de concentrations de la station Aval des barrages au pont de Signy – St Aubin de Terregatte avec la chronique AESN.	26
Annexe 3 : Concentration en phosphore dissous à l'amont et à l'aval des barrages	27
Annexe 4 : Concentration en nitrates à l'amont et à l'aval des barrages	27
Annexe 5 : Concentration en sulfates à l'amont et à l'aval des barrages	28
Annexe 6 : Concentration en chlorures à l'amont et à l'aval des barrages	28
Annexe 7: Concentration en silice dissoute à l'amont et à l'aval des barrages	29
Annexe 8 : Concentration en nitrites à l'amont et à l'aval des barrages	29
Annexe 9 : Pourcentage du carbone/azote de la phase particulaire	30
Annexe 10 : Granulométrie laser de sédiments prélevés à l'amont et à aval sur la Sélune	30

2. Rappel : dispositifs et protocole de suivi des flux

2.1 Localisation des stations

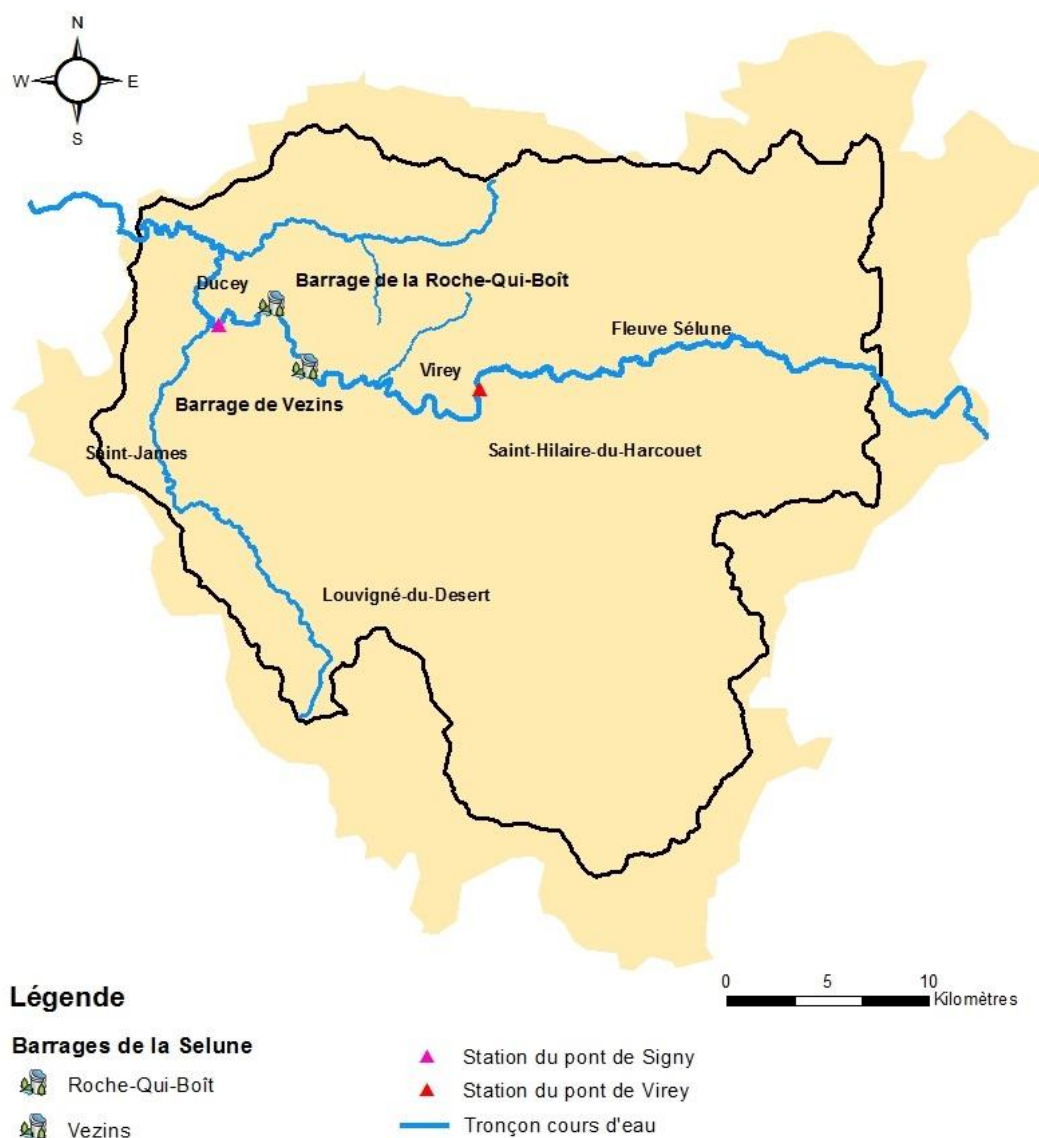


Figure 1 : Localisation des stations de suivi multi-paramètres sur le bassin versant de la Sélune.

De l'amont vers l'aval :

La station de mesure EDF-INRA 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.

EDF a installé deux stations de mesure à l'aval immédiat de chaque barrage (respectivement de l'amont à l'aval : la station de la Dorière en aval du barrage de Vézins et la station de la Roche-Qui-boit en aval du barrage de la Roche-Qui-boit).

La station de mesure INRA est installée en rive droite de la Sélune au niveau du pont de Signy (RD 178, limite communale DUCHEY/SAINT-AUBIN-DE-TERREGATTE). 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. Une

station de mesure de débit de la DREAL Basse-Normandie existait déjà à cet endroit (code I9221020 : La Sélune à Saint Aubin de Terregatte). Le débit y est mesuré par la DREAL depuis le 15/01/1990.

Pour comprendre l'impact des barrages sur la dynamique des concentrations et des flux hydriques, chimiques et sédimentaires, les stations qui nous intéressent particulièrement sont celles situées en amont des barrages (pont de Virey) et 4 km en aval de la Roche qui Boit (pont de Signy). L'acquisition des données pour la station INRA (pont de Signy) est effective depuis fin avril 2014, pour la station EDF-INRA (pont de VIREY) depuis début février 2015.

2.2 Equipement des stations

Station INRA (Pont de Signy)



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

La station INRA 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. Il existe également une sonde optique permettant la mesure en continue de la *chlorophylle a* et la concentration de cyanobactérie depuis juin 2016. Cette sonde permet de quantifier le microphytoplancton total, en différenciant les cyanobactéries, pour mieux comprendre les dynamiques temporelles des concentrations en nutriments mesurées (en lien étroit avec le Thème Biomonitoring du programme).

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.

Stations EDF et EDF-INRA

EDF a financé et équipé trois stations « multi-paramètre » sur la Sélune. Une station qui se localise à l'amont des barrages (pont de Virey) et deux autres stations à l'aval immédiat des deux barrages (respectivement de l'amont vers l'aval : les stations de la Dorière et la Roche-Qui-Boit).

Ces 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. Le débit est calculé pour la station EDF-INRA (pont de Virey) grâce aux jaugeages réalisés par EDF et la DREAL.

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 EDF-INRA, en amont des barrages, L'INRA a installé depuis février 2015 un préleveur automatique (avec déclenchement sur niveau d'eau) pour le suivi des flux sédimentaires et chimiques en crue. 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.



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

Paramètres mesurés	Stations de mesure			
	Virey	Dorlière	Roche-Qui-Boit	Pont de Signy
Conductivité électrique (µg/cm)	X	X	X	X
Oxygène dissous (mg/L)	X	X	X	
Température (°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 (m3/s)	X		X	X
Chlorophylle totale (µg/L)				X
Cyanobactéries (µg/L)				X

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

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

2.3 Protocole de prélèvement et méthode d'analyse par paramètres

Le suivi et la quantification des flux sédimentaires et chimiques nécessitent des prélèvements réguliers d'échantillons d'eau de la Sélune, 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).

Lors de ces visites hebdomadaires, l'entretien des sondes est également effectué sur la station de Signy, afin de garantir la qualité des données. L'entretien des stations 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.

Généralement, les flux hydriques, sédimentaires et chimiques subissent des fluctuations importantes lors des crues, ici définies comme les événements hydrologiques en réponse à une pluie, d'intensité faible à forte. Pour l'échantillonnage en crue, un préleveur automatique asservi au niveau d'eau a été installé sur les deux stations. Le préleveur se déclenche 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 in situ 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 et défini par l'utilisateur (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 INRA en aval des barrages et en février 2015 pour la station INRA-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 ceux sont 11 paramètres qui sont analysés (figure 7), 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, NO_3 , NO_2 , SO_4 et Cl sont mesurés par chromatographie ionique ; PO_4 , P total, NH_4 , et Si par colorimétrie ; MES par filtration et pesée ; C et N sur la phase particulaire sont dosés par analyseur élémentaire. La phase dissoute est mesurée sur des échantillons filtrés à 0.45

μm ; la phase particulaire sur des résidus de filtration à ce même seuil de filtration, et le phosphore total sur eau brute.

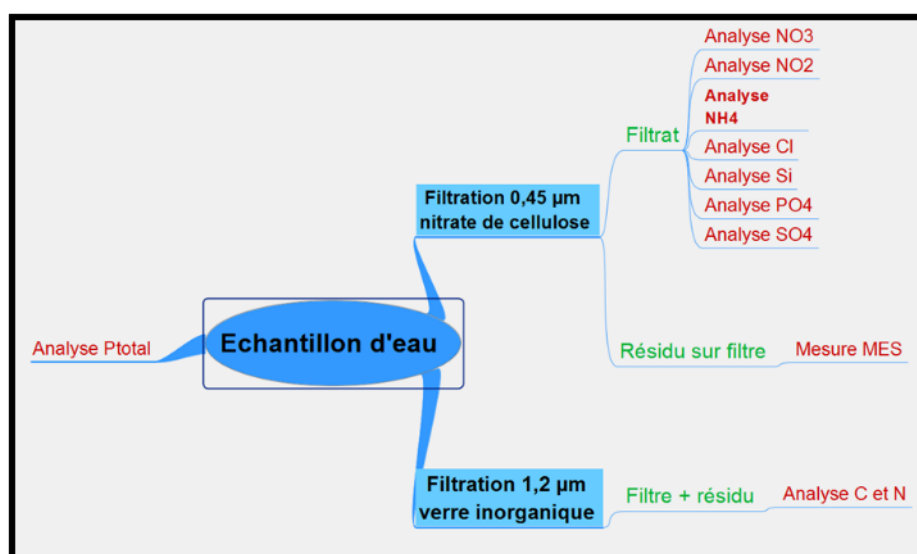


Figure 5 : Préparation au laboratoire des échantillons d'eau prélevée en vue des différentes analyses.

3. Dynamique saisonnière et en crue des paramètres hydrologiques, sédimentaires et physico-chimiques dans le contexte des travaux de vidange

3.1 Une gestion des barrages visant un minimum d'impact sur l'hydrologie

L'année 2018 a connu d'importantes précipitations par rapport aux trois dernières années, le cumul annuel de septembre 2017 à août 2018 est de 1064 mm. La moyenne interannuelle de précipitations sur la période 1969-2018 est de 905 mm, les années 2015 à 2017 sont en deçà de cette moyenne pluviométrique (2015-2016 = 757 mm, 2016-2017 = 587 mm) avec une année 2017 qui a été particulièrement sèche (figure 6). La chronique de débit (figure 7) pour comparer les stations amont/aval concerne la période du 19/01/2015 au 31/08/2018. 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).

La courbe des débits classés (figure 8) nous permet d'observer la valeur atteinte ou dépassée par le débit horaire en fonction du pourcentage du temps sur les stations de Virey et Signy de 2015 à 2018. On observe une variabilité interannuelle des débits avec une année 2016-2017 extrêmement sèche, pour plus de 90% du temps les valeurs de débits sont inférieures à 10 m³/s à l'amont comme à l'aval des barrages. L'année 2017-2018 étant la plus pluvieuse, pour 20% du temps le débit est égal ou supérieur à 26 m³/s à Signy et 21 m³/s à Virey. Cette variabilité interannuelle des précipitations et débits souligne l'intérêt d'un suivi sur plusieurs années hydrologiques pour la caractérisation des flux. Le flux hydrique spécifique annuel est de 651 mm à la station amont et 652 mm à la station aval pour l'année hydrologique 2017-2018.

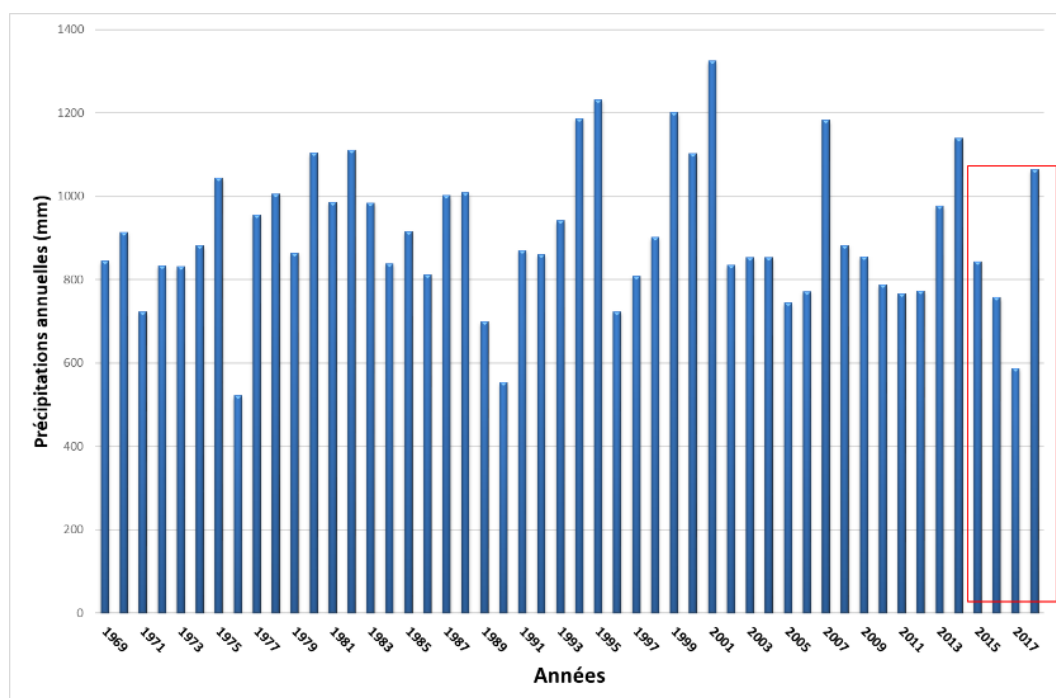


Figure 6 : Chronique des précipitations de 1969 à 2018 à Saint-Hilaire-du-Harcouët

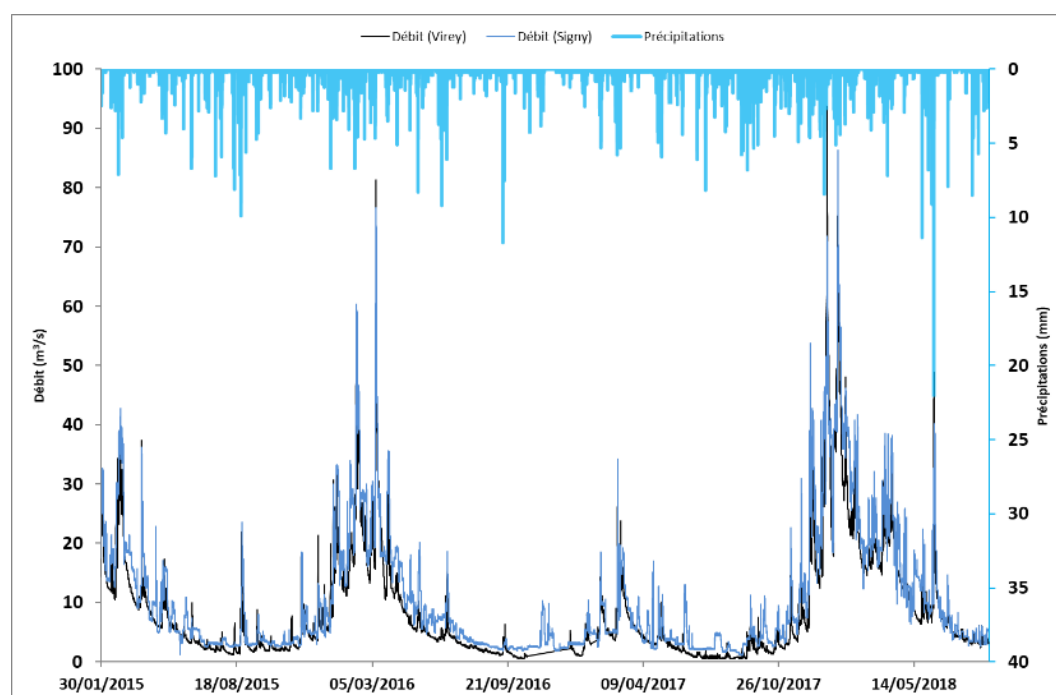


Figure 7: Chronique des débits en fonction des précipitations à l'amont et à l'aval des barrages

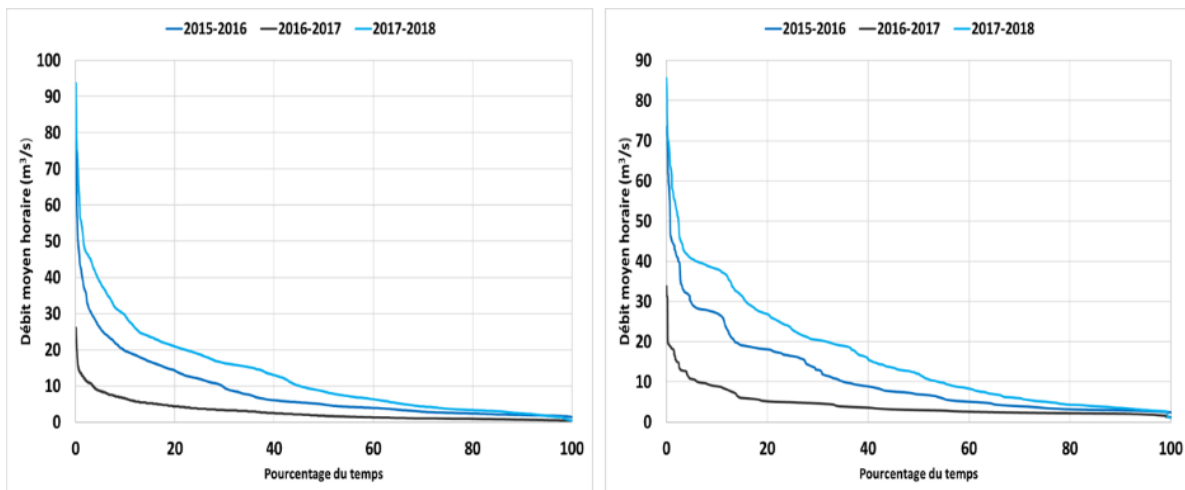


Figure 8 : Courbe des débits classés (station de Virey (à gauche) et station de Signy (droite))

La variation annuelle des débits est conforme à celle des précipitations. A la station amont, les débits moyens journaliers enregistrés pour 75% des mesures (3ème quartile) sont inférieurs à ceux de la station aval (station amont : 2015-2016 = 11,9 m³/s, 2016-2017 = 3,7 m³/s, 2017-2018 = 18,9 m³/s) qui draine un bassin plus vaste (station aval : 2015-2016 = 16,5 m³/s, 2016-2017 = 4,9 m³/s, 2017-2018 = 23 m³/s). Les débits maximums journaliers enregistrés entre 2015-2018 à l'amont (respectivement de 2015 à 2018 : 71,4 m³/s, 18,5 m³/s et 80,8 m³/s) sont supérieurs à l'aval sauf pour l'année 2017 correspondant à la période de début des travaux de vidange (respectivement de 2015 à 2018 : 67,6 m³/s, 25,7 m³/s et 77,8 m³/s) (figure 9).

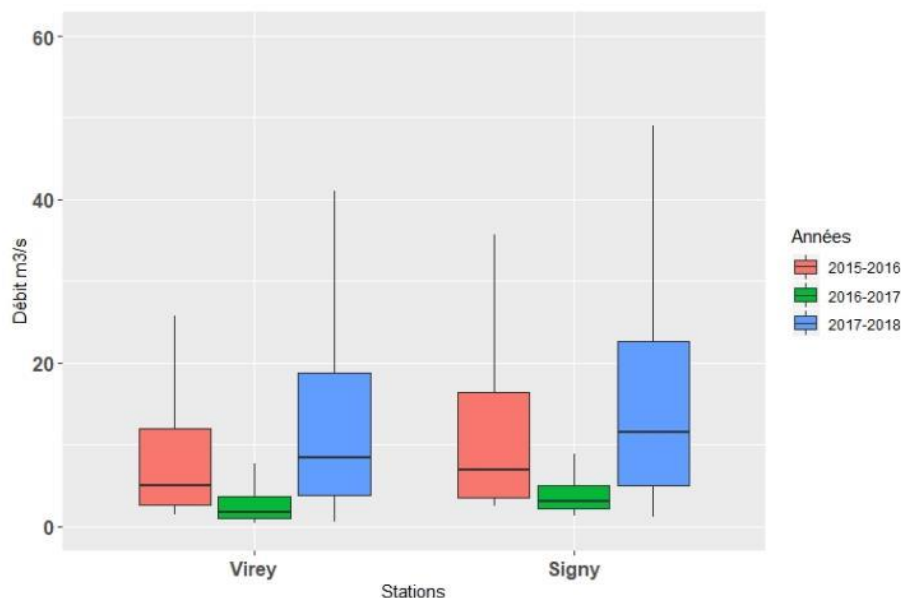


Figure 9 : Distribution en boxplot des débits moyens journaliers sur les stations amont et aval par année hydrologique

3.2 Effet tampon des barrages sur la température

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 10) 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 (figure 11). Pour l'année 2017-2018, la température moyenne journalière est respectivement de l'amont vers l'aval : 16,01°C (Virey), 17,50°C (Dorière), 17,7°C (Roche-Qui-Boit) et 17,5°C (Signy) pour 75% des valeurs mesurées. Ce réchauffement des eaux dans les réservoirs des barrages peut s'observer également sur l'amplitude thermique hebdomadaire, les variations de températures sont tamponnées à la sortie des barrages. Cependant pour l'année 2017-2018, les températures à la station de Dorière semblent moins tamponnées avec les travaux de vidange du barrage de Vezin. Ainsi de l'amont vers l'aval pour l'année 2017-2018, l'amplitude thermique hebdomadaire est : 4,4°C (Virey), 3,7°C (Dorière), 2,2°C (Roche-Qui-Boit) et 3,3°C (Signy).

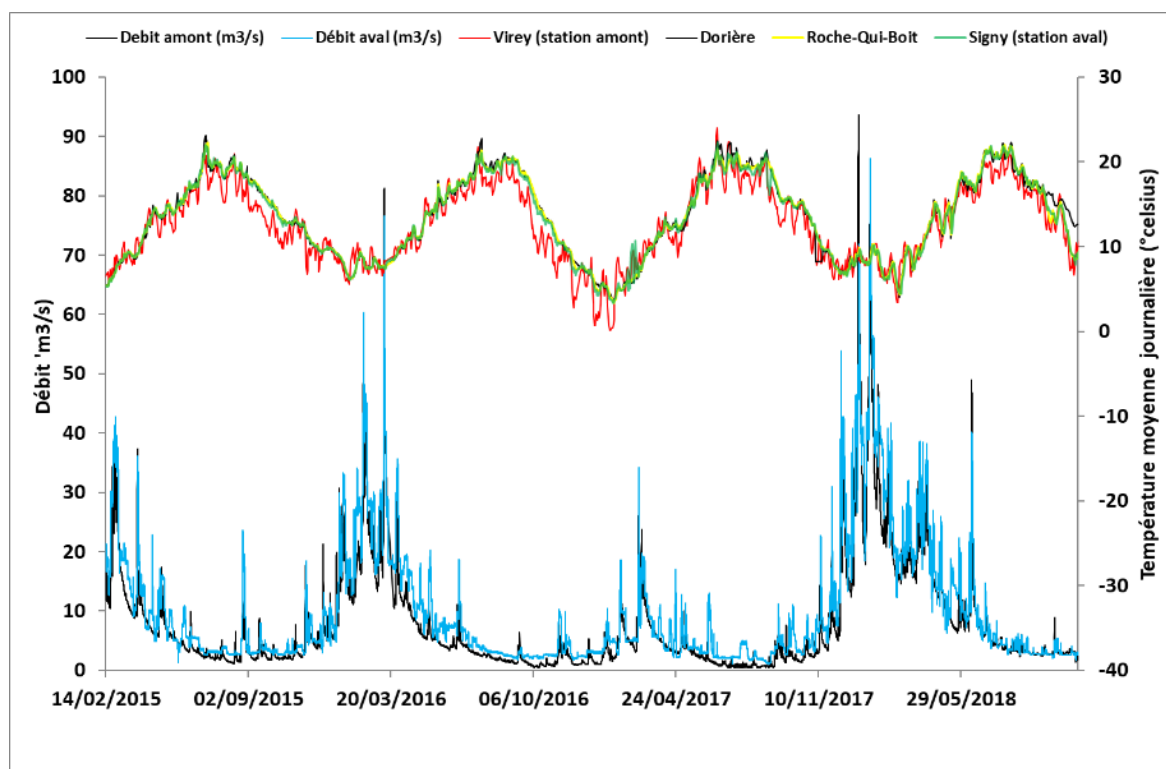


Figure 10 : Chronique des températures moyennes journalières des stations EDF et INRA sur la Sélune.

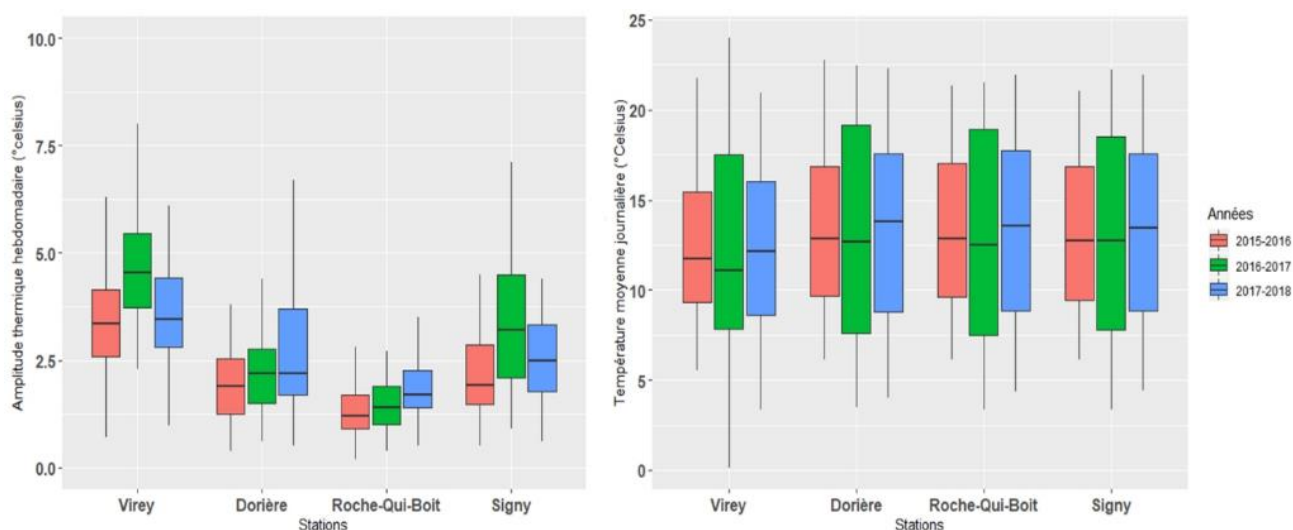


Figure 11 : Distribution en boxplot de l'amplitude thermique hebdomadaire et des températures moyennes journalières des stations de la Sélune de 2015 à 2018

3.3 Abattement des matières en suspension

Les concentrations de MES suivent l'évolution des flux hydriques annuelles (figure 12) et présentent classiquement des pics de concentration lors des événements de crues. Ces concentrations de MES à l'amont sont toujours supérieures celles à l'aval avec l'abattement des sédiments due à la présence des barrages. Les conditions hydro-météorologiques de cette année pluvieuse (2017-2018), plus favorable à l'export de MES (érosion des versants et capacité de transport du réseau hydrographique plus importantes) ont permis une augmentation des concentrations de MES à l'amont. Ainsi les travaux de vidange du barrage de Vezin ont favorisé l'augmentation des concentrations de MES transitant vers l'aval (figure 12 et 13). L'évolution de la concentration de MES à l'aval entre 2015 et 2018 est de : 12,9 mg/L (2015-2016), 17 mg/L (2016-2017) et 66,7 mg/L (2017-2018) pour 75% des échantillons prélevés en période de crue. En écoulement de base, la concentration de MES a presque triplé entre 2017 et 2018 ; la concentration de MES est passée de 6,2 mg/L à 17,6 mg/L pour 75% des échantillons prélevés. Et la concentration maximale de MES mesurée à l'amont est de 1380 mg/L (07/04/2016) contre 242 mg/L à l'aval (05/12/2018)

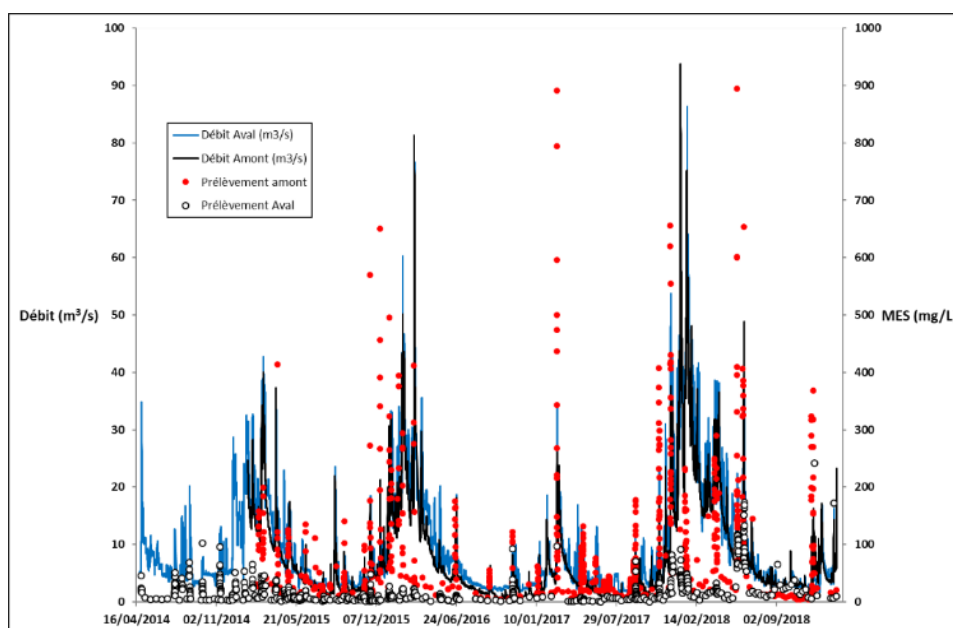


Figure 12 : Concentrations de MES mesurées sur la station amont et aval

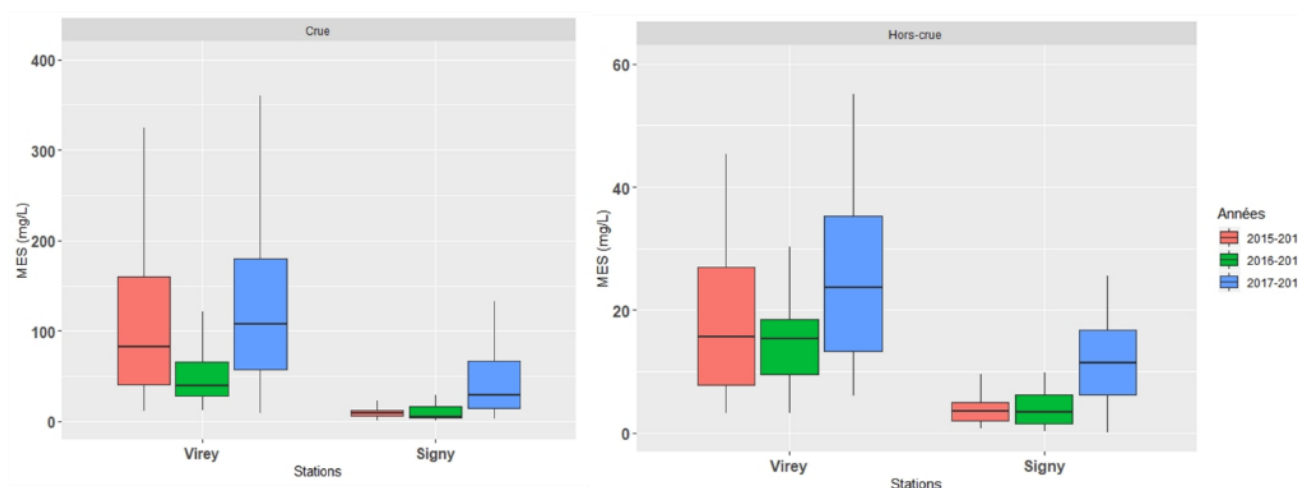


Figure 13 : Distribution en boxplot d'évolution des concentrations de MES en fonction des années hydrologiques, en crue et en écoulement de base

3.4 Effets des barrages sur les transferts d'éléments chimiques

Une comparaison avec les données bancarisées par l'AESN (QualitéEau) pour les stations de surveillance de la qualité chimique de l'eau a été réalisée, en particulier pour les stations « La Sélune à St Hilaire du Harcouet » (3272040) et « La Sélune à St Aubin de Terregate » (3272685). Les différences sur les valeurs de concentrations mensuelles obtenues entre les 2 protocoles sont bien inférieures aux incertitudes analytiques. La comparaison montre aussi l'intérêt du suivi à fréquence fine dans le cadre de cette étude spécifique (voir annexe 1 et 2).

3.4.1 Piégeage du phosphore avec les sédiments

Lors des évènements hydrologiques, la concentration en phosphore dissous (PO_4) et total (P_{total}) présente des pics, similaires à ceux des concentrations en MES, ces pics sont néanmoins amortis à l'aval par les barrages (figure 14). Néanmoins avec les travaux de vidange du barrage de Vezin, la concentration moyenne en phosphore dissous a été doublée à l'aval durant période d'écoulement de base (0,3 mg/L (2015-2016, 2016-2017) et 0,6 mg/L (2016-2017)).

Le phosphore total a également doublé à l'aval pour les 75% d'échantillons prélevés pour l'année 2017-2018 en période de crue et d'écoulement de base. La concentration de phosphore total est passée de 0,06 mg/L en 2016 à 0,12 mg/L en 2018 en période de crue ; et de 0,03 mg/L (2015-2016) à 0,08 mg/L (2017-2018) en écoulement de base. La concentration maximale de phosphore total mesurée est de 1,44 mg/L (26/05/2018) à l'amont et 0,37 mg/L à l'aval (28/05/2018).

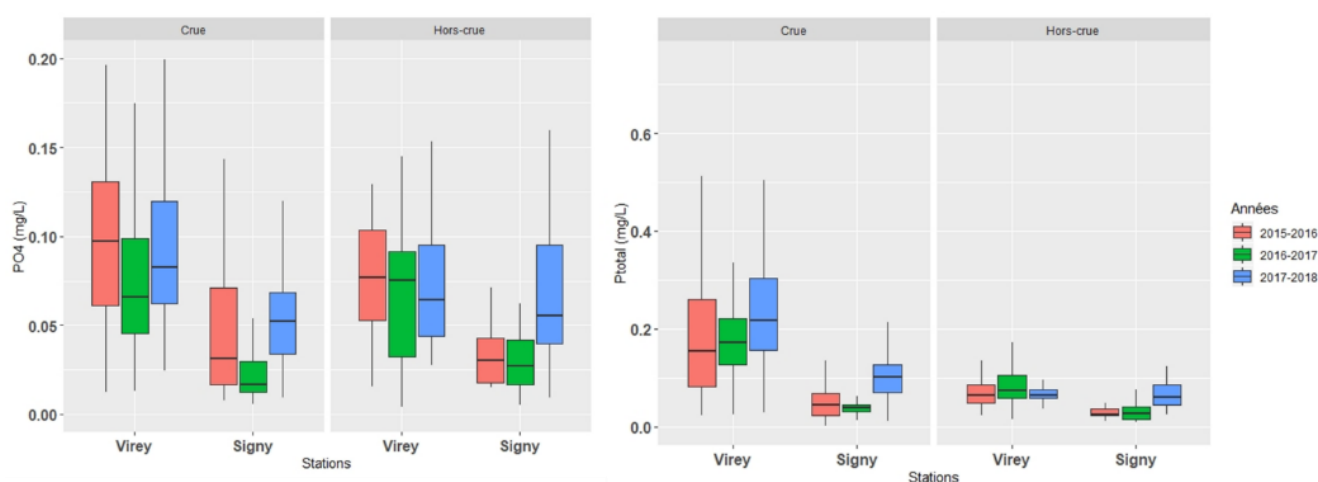


Figure 14 : Distribution en boxplot des concentrations de phosphore dissous et total en fonction des années hydrologiques, en crue et en écoulement de base, NB : l'échelle de mesure est différente sur les boxplots.

3.4.2 Amortissement des dilutions en crue pour les anions majeurs et la silice dissoute

Lors des évènements de crue, une dilution de la concentration est observée à l'amont des barrages pour les 3 anions majeurs : chlorures, nitrates, sulfates ainsi que pour la silice dissoute. Cette dilution associée aux évènements de crue, assez fréquemment observée sur les bassins du Grand Ouest, s'explique par une arrivée de contributions plus récentes (pluie et ruissellement) moins concentrées en ces éléments que les contributions soutenant l'écoulement de base. Les ions chlorures et nitrates sont apportés au milieu par les précipitations et les fertilisants agricoles, mais étant très solubles ils sont plutôt lessivés en profondeur, dans la zone insaturée et la nappe phréatique. La silice dissoute provient de l'altération des roches qui constituent le substrat géologique imperméable, et se concentre donc dans les contributions les plus profondes. Ainsi les contributions hydrologiques de surface, qui sont actives essentiellement lors des évènements de crue, sont plus diluées vis-à-vis de ces éléments. A l'aval, ces dilutions de concentrations sont fortement tamponnées (figure 15, « Crue »), 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 (annexes 4, 5, 6, voir aussi le rapport 2017). Les variations saisonnières

de ces 3 concentrations sont à peu près synchrones entre elles puisque le maximum de NO_3 apparaît en même temps que les minimas de Cl et SO_4 , et un léger retard par rapport au maximum de débit (annexes 4, 5, 6). Ce cycle saisonnier n'a pas été modifié par les barrages et les travaux de vidanges.

Les concentrations en écoulement de base de NO_3 et Cl sont très légèrement plus faibles à l'aval (écart moyen d'1 mg/L pour NO_3 et Cl). A l'inverse, pour le SO_4 la concentration en écoulement de base est légèrement plus forte à l'aval avec une augmentation d'1mg/L pour l'année 2017-2018 (l'écart moyen entre l'amont et l'aval est d'1,3 mg/L) (figures 15).

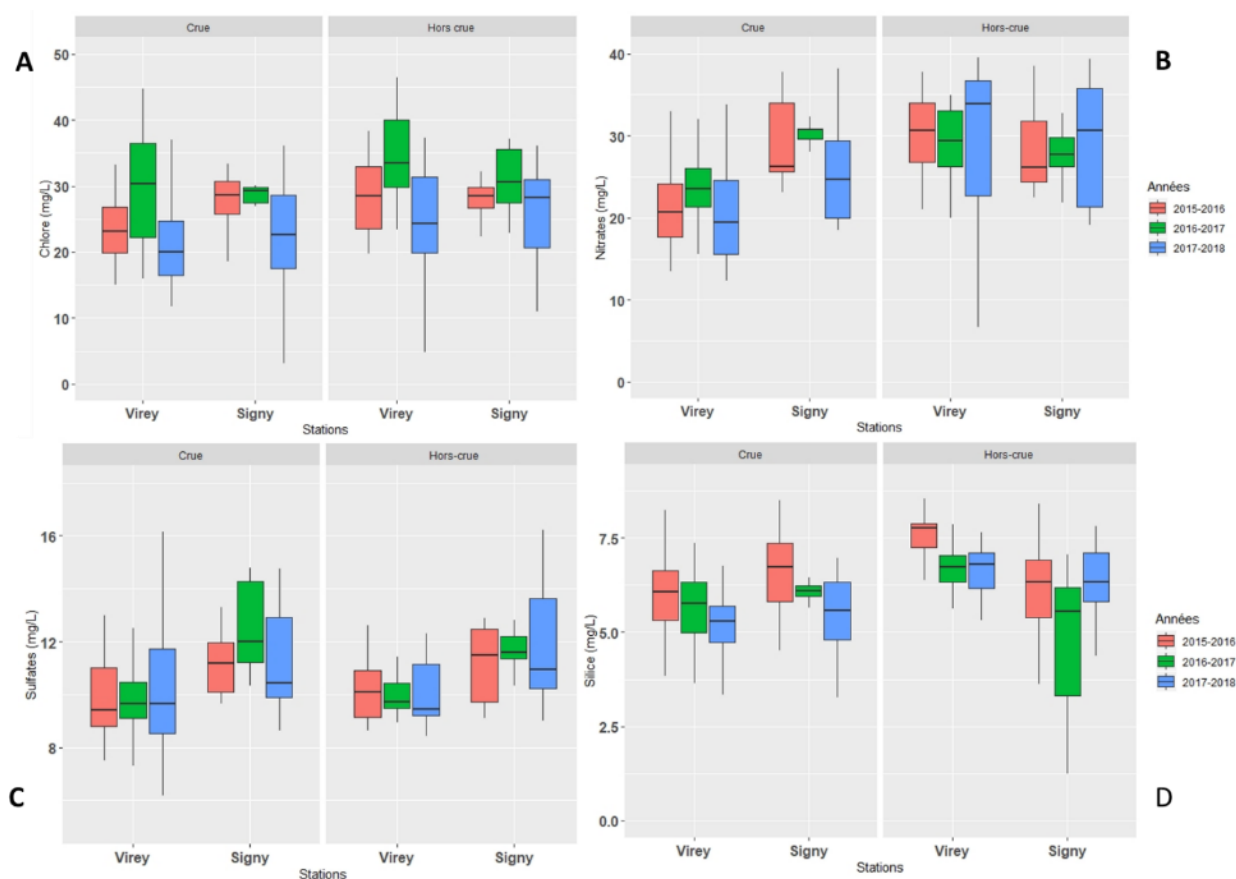


Figure 15 : Distribution en boxplot des concentrations en chlorures (A), nitrates (B), sulfates (C) et silice dissoute (D) par année hydrologique, en période de crue et écoulement de base, NB : les échelles des boxplots sont différentes.

Nitrites et ammonium

Les concentrations en nitrites (NO_2) sont suivies à l'amont et à l'aval des barrages depuis février 2015, les concentrations en ammonium (NH_4) depuis octobre 2015. Le nitrite est présent systématiquement et l'ammonium quasi systématiquement à l'amont et à l'aval des barrages. En écoulement de base, les concentrations à l'aval sont supérieures aux concentrations à l'amont (sauf pour le NH_4 en 2016-2017 à Signy), mais cette différence disparaît en période de crue excepté pour l'année des travaux de vidange où l'on note une hausse des concentrations en nitrite et en ammonium.

Entre 2016-2017 et 2017-2018, la concentration moyenne de nitrite a plus que doublé à l'aval en écoulement de base (0,14 à 0,34 mg/L) ; et en période de crue, les concentrations ont été multipliées par quatre (0,12 à 0,55 mg/L) pour 75% des échantillons de nitrites mesurés (figure 16). La

concentration maximale de nitrite mesurée est de 1,37 mg/L (04/09/2018). Pour l'ammonium, la concentration moyenne a été multipliée par trois (0,11 à 0,35 mg/L) en période de crue et par quatre (0,06 à 0,25 mg/L) en écoulement de base entre 2016-2017 et 2017-2018. La concentration maximale d'ammonium mesurée est de 1,02 mg/L (27/05/2018).

Ces composés chimiques sont associés à des rejets humains (agricole, épuration, industrie). Si les nitrates sont lessivables en profondeurs, les autres formes de l'azote sont généralement transférées par les contributions de surface dans les bassins (ruissellement) associées aux particules, et donc peu actives en dehors des événements de pluie. Cette voie de transfert pouvant expliquer les pics observés en crue.

Par ailleurs dans les retenues, de multiples processus biogéochimiques peuvent affecter ces espèces chimiques également. Les conditions anoxiques qui apparaissent au fond des réservoirs sont responsables du processus de dénitrification. L'apparition d'anoxie s'accompagne aussi de modifications du potentiel d'oxydo-réduction qui induisent une désorption du NH_4 des sédiments piégés dans le fond du réservoir. D'autre part, l'azote organique (notamment celui de la végétation qui se développe dans les réservoirs) peut être transformé en NH_4 lorsque la minéralisation de la matière organique se fait de manière incomplète (rapport d'étape 2017). Des processus internes aux réservoirs perturbés lors de la vidange peuvent donc expliquer les pics de concentrations en NH_4 et NO_2 plus élevées à l'aval des retenues.

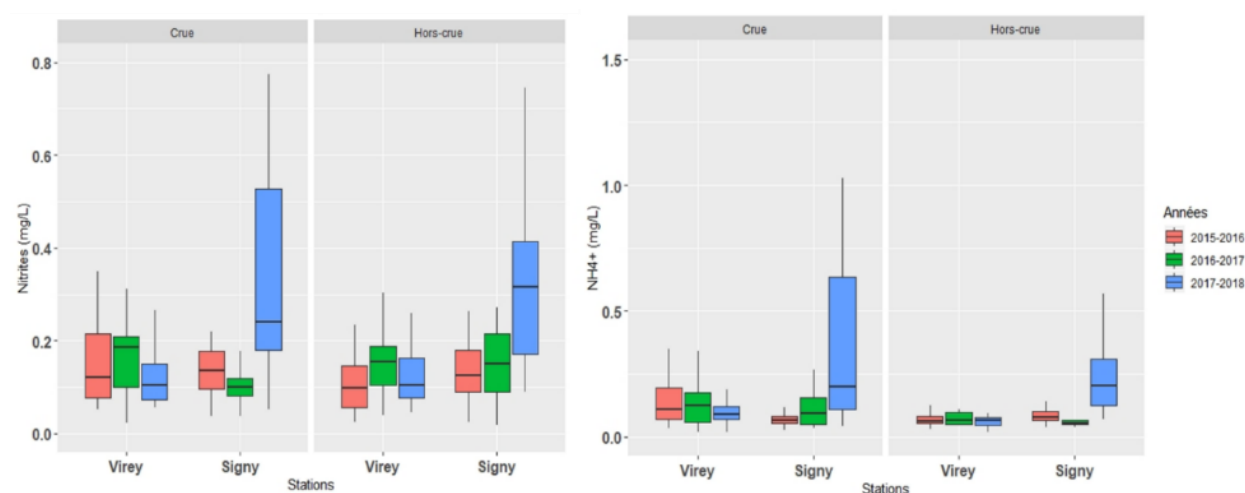


Figure 16 : Distribution en boxplot des concentrations de nitrites et d'ammonium par année hydrologique, en période de crue et écoulement de base, NB : les échelles des boxplots sont différentes.

3.4.3 Evolution du matériel autochtone à l'aval

Le rapport du carbone sur l'azote (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).

L'évolution du rapport C/N de la phase particulaire à l'amont entre 2015 et 2018, suppose une origine terrigène de la matière organique qui y transite avec une moyenne de 9% pour 75% des échantillons (Crue et Hors-crue). A l'aval, on note une modification de l'origine de la matière organique

particulière en période de crue depuis le début des travaux de vidange, avec une augmentation du rapport C/N (pourcentage moyen de C/N = 9) (figure 17). Ainsi la matière organique particulière à l'aval est d'origine terrigène en période crue et en écoulement de base, elle est d'origine plutôt aquatique (C/N < 8).

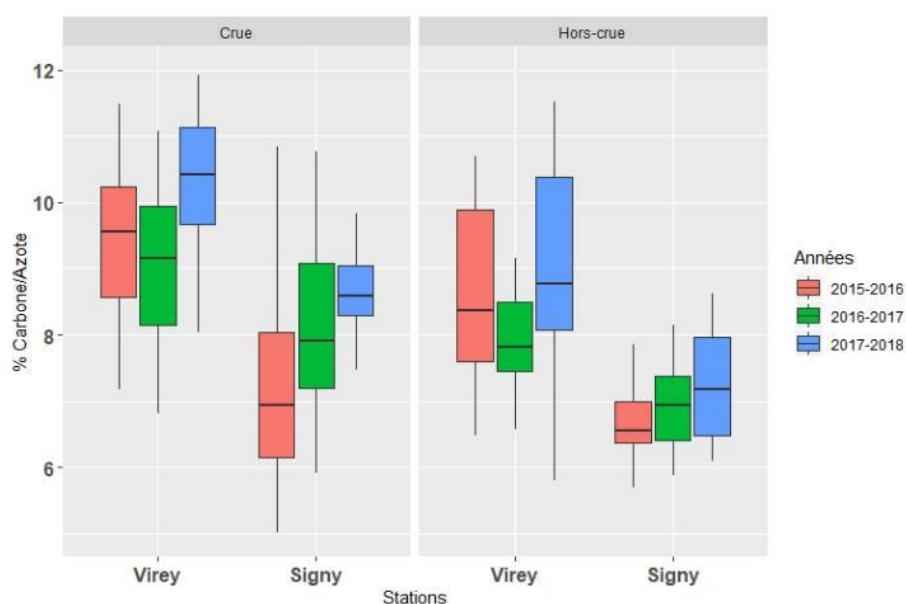


Figure 17 : Evolution du rapport carbone/azote particulier par année hydrologique, en période de crue et d'écoulement de base.

4. Conséquences pour les flux sédimentaires et chimiques

4.1 Calcul des flux annuels de sédiments 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 des matières en suspension (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 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 :

$$MES (mg/L) = a \times Turbidite (FNU) + b$$

Les régressions sont calibrées par station, et par souci de continuité avec les précédents rapports et repérer d'éventuelles évolutions avec les travaux, les relations établies en intégrant le données 2017-2018 sont comparées à celles établies avec les données 2015-2017.

Station de Virey (amont)

Pour établir la relation d'étalonnage Turbidité/MES pour la station en amont des barrages, on dispose de 39 crues échantillonnées et pour lesquelles la turbidité mesurée est qualifiée fiable, soit

505 couples de points sur la période 2015-2018. 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 événements pertinents pour calibrer la relation Turbidité/MES, le critère de sélection était $R^2 > 0,6$. On a ainsi obtenu 24 crues (soit 350 points), l'équation de calibration (Eq.2, tableau 2) a été calculée à partir de ces crues (figure 18).

L'incertitude de cette équation de calibration a été calculée avec un intervalle de confiance de 95%. Ainsi on obtient pour l'équation, une pente a de 1,995 associée à une gamme d'incertitude [1,93 ; 2,05] et une ordonnée à l'origine b de -22,228 associée à la gamme d'incertitude [-27,7 ; -16,6]. La régression et le calcul des incertitudes associées ont été conduites à l'aide du package R Stats.

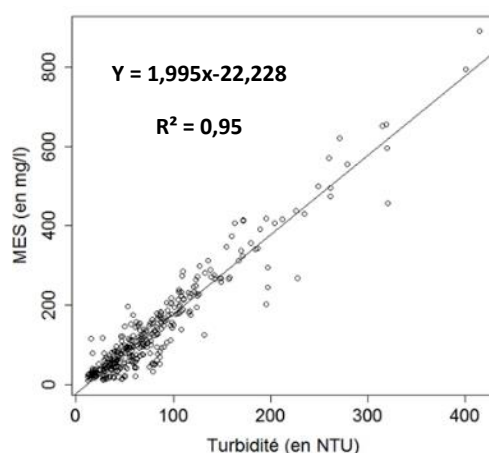


Figure 18 : Relation entre la turbidité et la concentration de MES (Eq.2)

Le flux de MES est calculé en multipliant les concentrations déduites des mesures de turbidité par le débit puis en intégrant ce flux instantané (1h à 6 mn) sur la durée souhaitée (année, mois...). Le flux annuel à l'amont est ainsi estimé à 28824 tonnes soit environ 45 tonnes/km² pour la période 2017-2018 avec une incertitude de 21 %.

Une deuxième relation Turbidité/MES (Eq.3) a été établie avec la même méthodologie que la précédente (Eq.2) à l'exception des données utilisées qui proviennent des crues analysées depuis le début des travaux de vidange uniquement (période 2017-2018 : 8 crues) soit 156 couples de points (figure 19). L'incertitude de cette équation de calibration a été calculée avec un intervalle de confiance de 95%. Ainsi on obtient pour l'équation, une pente a de 2,145 associée à une gamme d'incertitude [2,0287 ; 2,1859] et une ordonnée à l'origine b de -22,463 associée à la gamme d'incertitude [-24,7962 ; -9,5298].

Le flux annuel de MES estimé avec cette équation (Eq.3) est ainsi de 31586 tonnes soit 50 tonnes/km² pour la période 2017-2018 avec une incertitude de 25%. Compte tenu de l'incertitude associée aux deux équations (Eq.2 et Eq.3), l'équation de calibration Turbidité/MES paraît stable à l'amont en comparaison avec l'équation obtenue sur la période 2015-2017 (Tableaux 2 et 3).

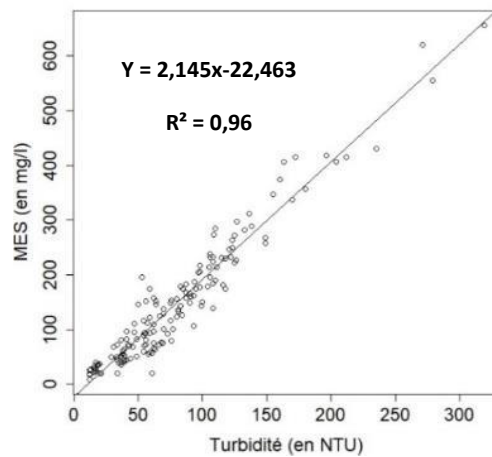


Figure 19 : Relation entre la turbidité et la concentration de MES (Eq.3)

Station Signy (aval)

Pour la station aval, la première relation (Eq.5) a été faite à partir des données de crue sélectionnées selon le critère $R^2 > 0,6$, plus toutes les données en écoulement de base pour la période 2015-2018 (soit 576 couples de points) et le R^2 obtenu est égal à 0,88 (figure 20). L'incertitude de cette équation de calibration a été calculée avec un intervalle de confiance de 95%. Ainsi on obtient l'équation de calibration : la pente $a = 0,8442$, et une gamme d'incertitude $[0,8138 ; 0,8745]$ et sur l'ordonnée à l'origine $b = 7,0457$, et sa gamme d'incertitude $[5,9326 ; 8,1587]$.

Le flux annuel à l'aval calculé avec l'Equation-5 pour la période 2017-2018 est estimé à 14800 tonnes/an soit 19 tonnes/km² avec une incertitude de 12%.

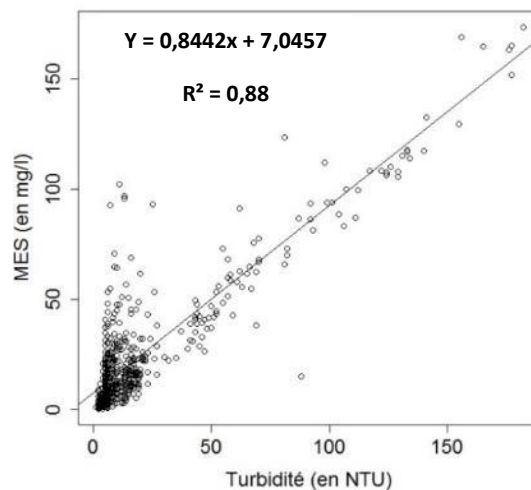


Figure 20 : Relation entre la turbidité et la concentration de MES (Eq.5)

La seconde relation d'étalonnage Turbidité/MES (Eq.6) a été faite uniquement avec les données recueillies depuis le début des travaux de vidange (soit 245 couples de points) (figure 21). L'incertitude de cette équation de calibration a été calculée avec un intervalle de confiance de 95 %, donnant alors la pente $a = 0,8917$, dans une gamme d'incertitude $[0,8580 ; 0,9084]$ et pour l'origine $b = 1,9720$, dans la gamme d'incertitude $[0,8580 ; 3,6602]$.

Le flux calculé à partir de l'Eq.6 est estimé à 12860 tonnes/an soit 16,5 tonnes/km² avec une incertitude de 21%. En comparant les résultats des calculs de flux à l'aval, on note les estimations assez différentes (Tableaux 2 et 3). En effet, la relation obtenue sur la période 2015-2017 est différente de celle intégrant la période des travaux, ce que l'on interprète comme une évolution de la granulométrie et de la nature des sédiments exportés à l'aval. Ceci confirme la nécessité de poursuivre les prélèvements de MES pendant toute la durée du suivi, et l'intérêt de les compléter par des caractérisations granulométriques, moléculaires (marqueurs moléculaires de la matière organique particulaire) et chimiques (C/N...).

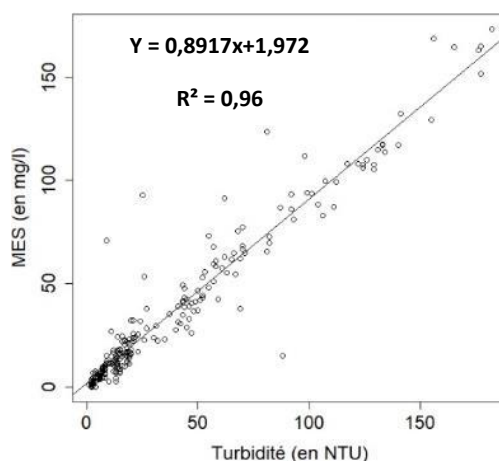


Figure 21 : Relation entre la turbidité et la concentration de MES (Eq.6)

Virey	Période	a	b	R ²
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
Signy	Période	a	b	R ²
EQ-4	2015-2017	3,359	-8,202	0,84
EQ-5	2015-2018	0,8442	7,045	0,88
EQ-6	2017-2018	0,8917	1,972	0,96

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

	flux (T/km ² /an)	Incertitude %	flux (T/km ² /an)	Incertitude %	flux (T/km ² /an)	Incertitude %
VIREY	2015-2016		2016-2017		2017-2018	
EQ-1	26,1	12	6,5	14	46	24
EQ-2	25,2	10	6,1	15	45	21
EQ-3					50	25
SIGNY	2015-2016		2016-2017		2017-2018	
EQ-4	11,6	39	1,25	75	52,1	27
EQ-5	6,95	17	1,89	21	19	12
EQ-6					16,5	21

Tableau 3 : Tableau récapitulatif des flux calculés de MES avec les différentes équations à l'amont et à l'aval.
Les équations sont détaillées dans le tableau 1.

Ces estimations de flux de sédiments fins confirment : i) l'augmentation du flux annuels exportés avec le flux d'eau annuel, ii) l'abattement des flux de sédiments fins par les barrages (-43% du flux total annuel amont en 2015-2016, -75% en 2016-2017 et -55% en 2017-2018). Par ailleurs, l'estimation des flux spécifiques de sédiments exportés (à l'amont et à l'aval) augmente avec les précipitations annuelles (figure 22).

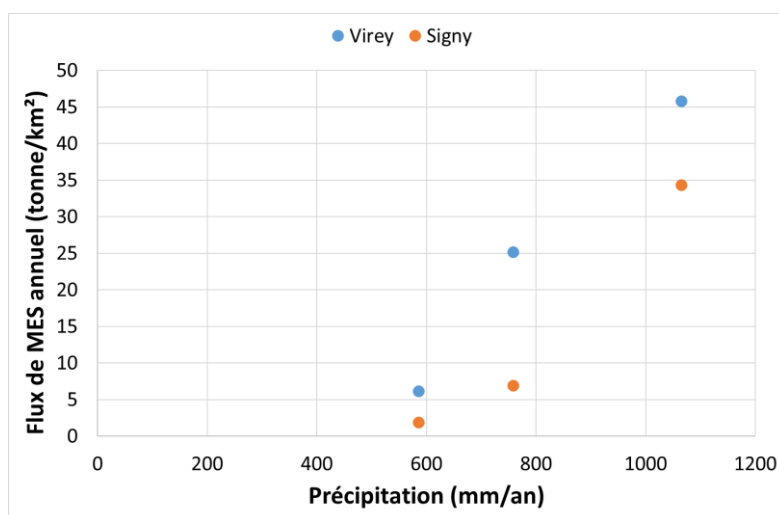


Figure 22 : Estimation des flux de sédiments en fonction des précipitations (à gauche les flux mensuels, à droite les flux annuels de sédiment)

4.2 Calcul des flux annuels de nutriments

Pour estimer les flux de nutriments dissous (NO₃, Cl, SO₄, Si et NO₂) sur les stations à l'amont et l'aval des barrages, la méthode DWC (Concentration ou méthode des concentrations moyennes pondérées par le débit, (Moatar and Meybeck, 2005; Moatar et al., 2013)) a été utilisée (figure 23). Elle est basée sur le calcul de la concentration moyenne pondérée par les débits qui est ensuite multiplié par le débit moyen journalier.

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

Avec C_i la concentration (mg/L) des n échantillons réguliers (ici hebdomadaires), Q_i le débit instantané associé au prélèvement de l'échantillon (m³/s), $\bar{Q}$ le débit moyen journalier (m³/s), et K un facteur de

conversion tenant compte des unités utilisées et de la période sur laquelle le flux est calculé (ici un an). Cette méthode paraît appropriée pour ces éléments exportés essentiellement en écoulement de base (et dilué en crue), son évaluation sur des jeux de concentrations mensuels a conduit à estimer l'incertitude (intervalle de confiance de 95%) sur les flux annuels calculés à 26% (Moatar et Meybeck, 2005), en se basant ici sur un échantillonnage hebdomadaire, l'incertitude sur les flux estimée est encore inférieure.

	2015-2016	2016-2017	2017-2018
Pluie (mm/an)	757	587	1064
Virey			
Q (mm/an)	429	145	651
N-NO ₃ (kg/ha/an)	31	10	43
Cl (kg/ha/an)	100	45	123
SO ₄ (kg/ha/an)	43	15	61
Si (kg/an/an)	32	10	37
PO ₄ (kg /km ² /an)	0,3	0,1	0,6
Ptot (kg /km ² /an)	0,4	0,1	1
Signy			
Q (mm/an)	443	173	652
N-NO ₃ (kg/ha/an)	31	11	46
Cl (kg/ha/an)	107	52	137
SO ₄ (kg/ha/an)	47	21	70
Si (kg/an/an)	31	9	40
PO ₄ (kg /ha/an)	0,2	0,1	0,4
Ptot (kg /ha/an)	0,2	0,1	0,6

Tableau 4 : Flux annuels spécifiques calculés pour les éléments dissous exportés essentiellement en écoulement de base.

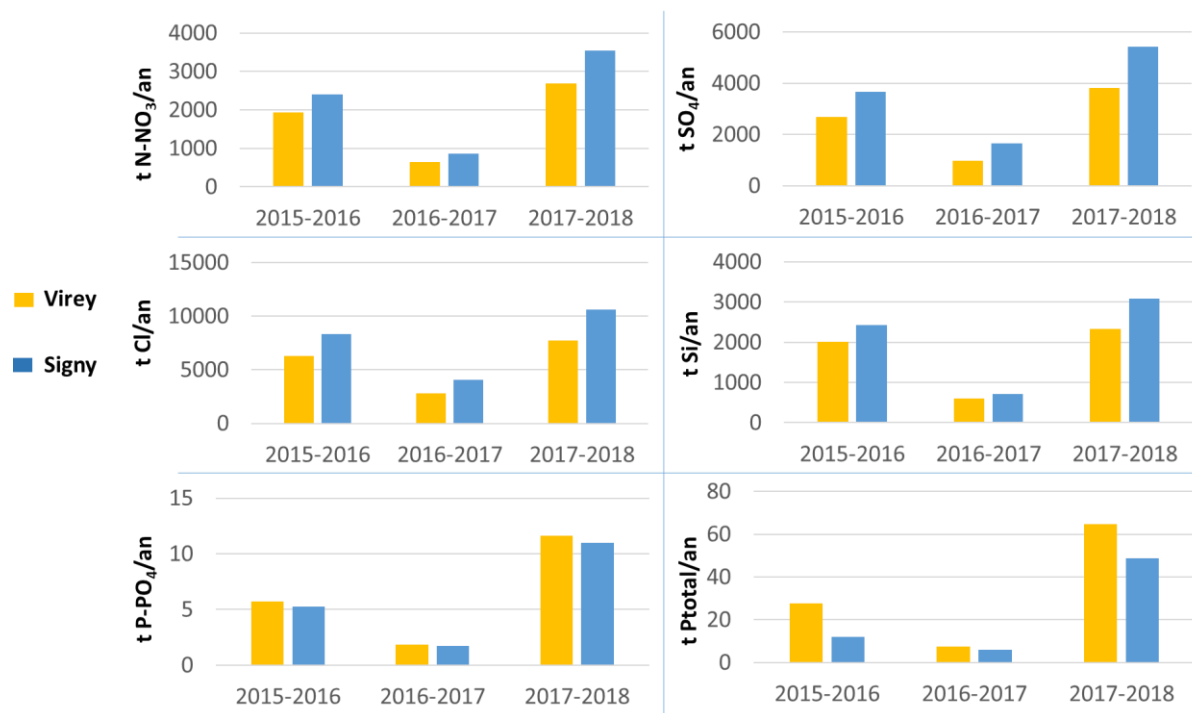


Figure 23 : Flux annuels en éléments dissous (tonnes) exportés à l'amont et à l'aval des barrages.

Les flux spécifiques en éléments dissous augmentent avec le flux d'eau spécifique annuel comme attendu (Tableau 4). Les flux totaux d'anions majeurs (Cl, SO₄, NO₃) et de silice dissoute sont supérieurs à l'aval relativement à l'amont (Figure 23), en lien avec les apports des affluents entre les deux stations (Yvrande, Lair et Isolant). Entre 2015-2018, les flux aval comparés à l'amont sont plus importants de : 25 à 35% pour les nitrates, 33 à 44% pour le chlore, 37 à 71% pour les sulfates et 18 à 33% pour la silice. Sans une quantification des flux apportés par ces affluents, on ne peut estimer une éventuelle consommation de nutriments (NO₃, Si) dans les barrages. Seul le Lair fait l'objet d'un suivi de surveillance des paramètres de qualité de l'eau bancarisé par l'AESN, et aucune station hydrométrique n'existe sur ces affluents dont la confluence se situe entre les stations de Virey et Signy. Les flux totaux de phosphore (P-PO₄ et PT) montrent des flux aval plus faibles, en cohérence avec les valeurs de concentrations amont-aval, qui traduisent le stockage du phosphore avec les sédiments fins dans les lacs des barrages. Néanmoins l'écart amont/aval de ces flux de phosphore a baissé durant la phase de travaux : 56 à 25% (pour le phosphore total) et 8 à 5% (pour le phosphore dissous).

5. Conclusion et perspectives

Le suivi des flux sédimentaires et hydro-chimiques a permis de faire une comparaison interannuelle des trois années hydrologiques de mesures, les deux premières en fonctionnement « normal » des barrages mais marquées par une forte variabilité hydro-climatique et la dernière en condition de travaux de vidange du barrage de Vezin.

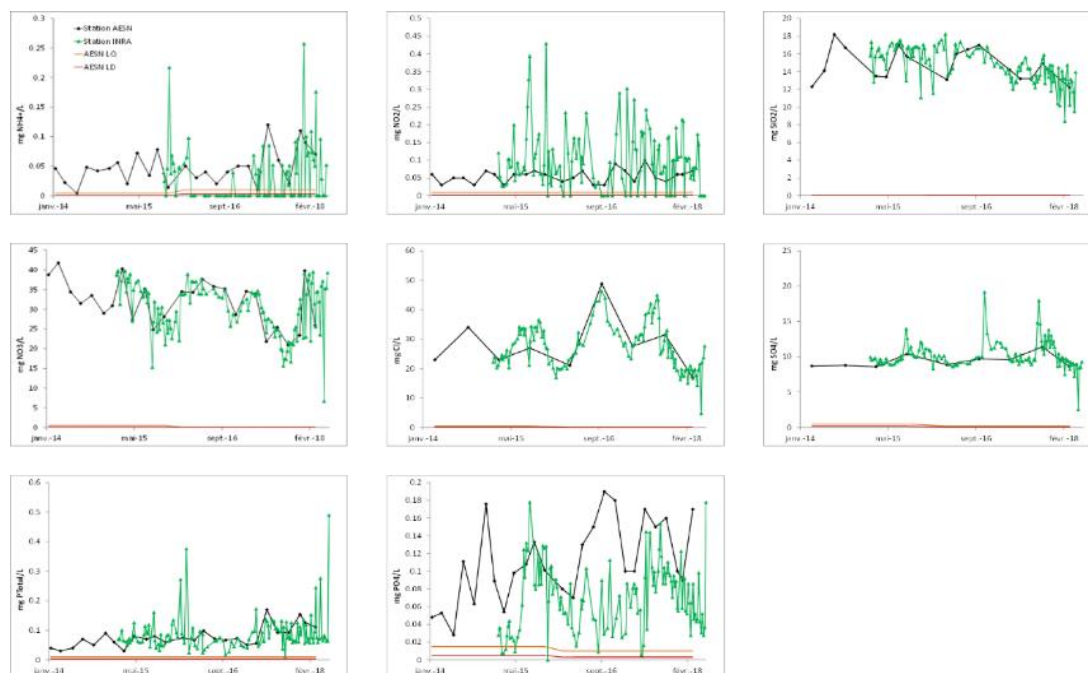
Les résultats majeurs de ces observations sont :

- L'augmentation des flux d'éléments avec le flux d'eau
- En fonctionnement normal des barrages, des flux aval plus importants pour les nutriments et plus faibles pour les MES et le phosphore
- L'augmentation des concentrations de MES et de phosphore durant les travaux de vidange à l'aval.

Durant cette année, une campagne d'intercalibration des capteurs de turbidité (juillet 2018) a été faite en collaboration avec EDF afin de comparer la mesure entre les différents de capteurs de turbidité (un rapport dédié à cette campagne a été rédigé). Les capteurs de turbidité sur les stations de la Sélune ne sont pas comparables entre eux directement mais nécessitent une intercalibration du fait de l'écart de mesure non négligeable existant entre les capteurs pour une concentration étalon donnée. Ainsi il apparaît nécessaire de faire une intercalibration des capteurs de turbidité après chaque étalonnage afin de diminuer l'incertitude et pouvoir calculer le taux d'abattement de MES entre les stations.

Par ailleurs une analyse au granulomètre laser de sédiments prélevés à l'amont et à l'aval des barrages (annexe 10), montre une variabilité de la taille des sédiments au cours de l'année sur la station amont. Pour la station aval, on observe une part importante de limons fins (auxquels sont particulièrement sensibles les capteurs de turbidité d'où la difficulté d'avoir une équation d'étalonnage Turbidité/MES stable) et une très faible part de limon grossier. Pour la station amont, l'analyse granulométrique montre une grande part de limons grossiers et une faible part de limons fins et de sables fins.

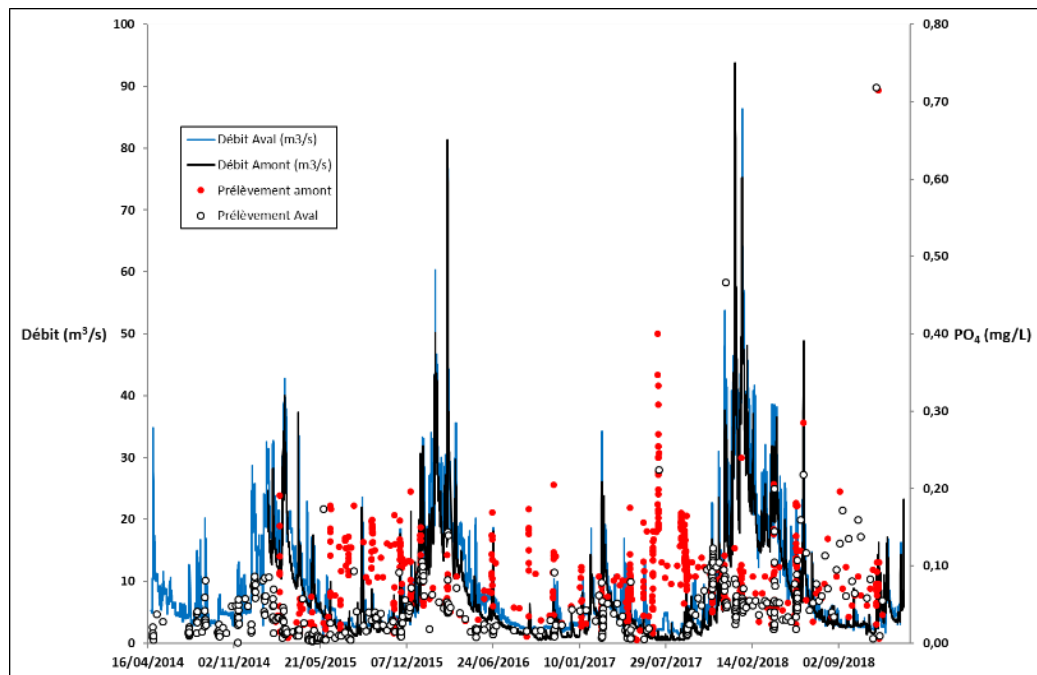
Annexes



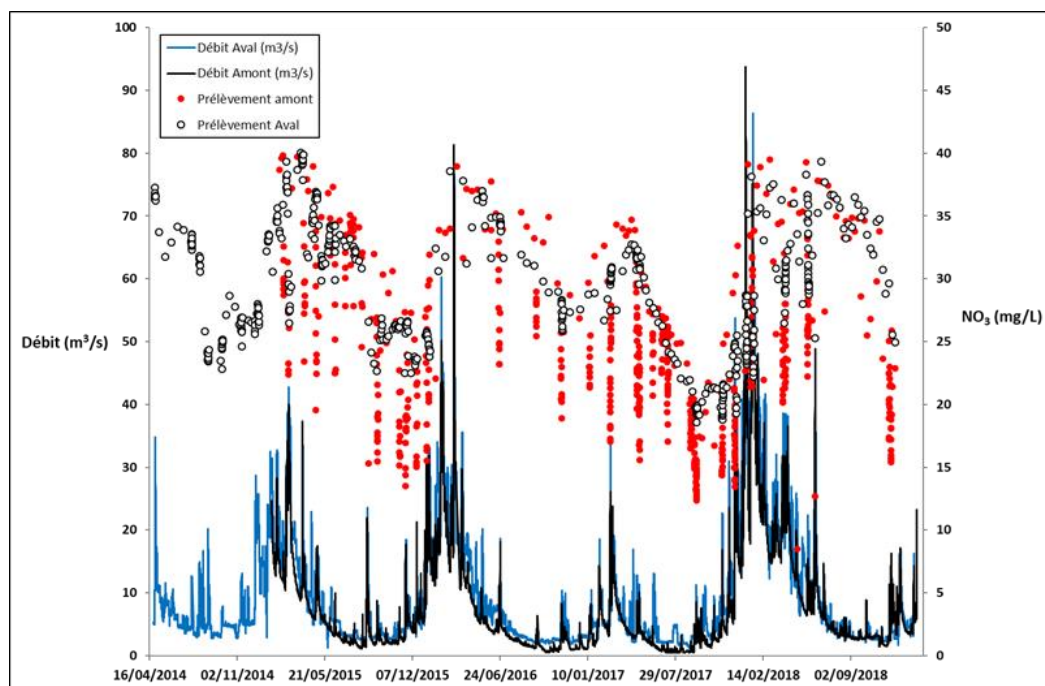
Annexe 1: Comparaison des chroniques de concentrations de la station Amont des barrages au pont de Virey – St Hilaire du Harcouet, pour (dans l'ordre de lecture) l'ammonium, le nitrite, le nitrate, le chlorure, le sulfate, la silice dissoute, les orthophosphates, le phosphore total et les matières en suspension. LD est la limite de détection de la chronique AESN, LQ la limite de quantification correspondante.



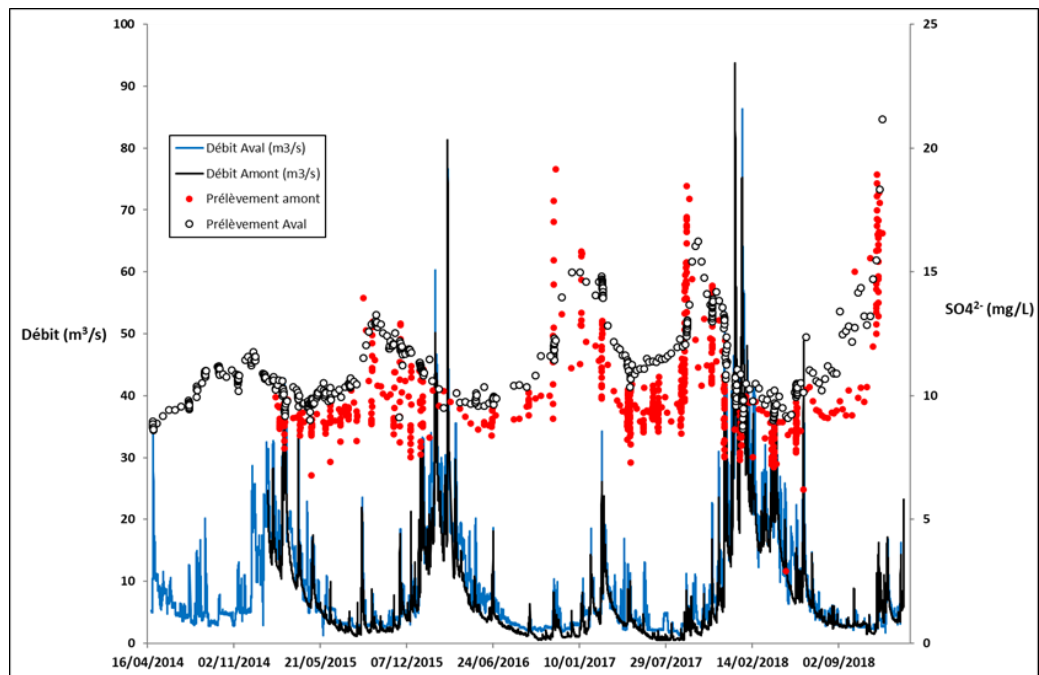
Annexe 2 : Comparaison des chroniques de concentrations de la station Aval des barrages au pont de Signy – St Aubin de Terregatte, pour (dans l'ordre de lecture) l'ammonium, le nitrite, le nitrate, le chlorure, le sulfate, la silice dissoute, les orthophosphates, le phosphore total et les matières en suspension. LD est la limite de détection de la chronique AESN, LQ la limite de quantification correspondante.



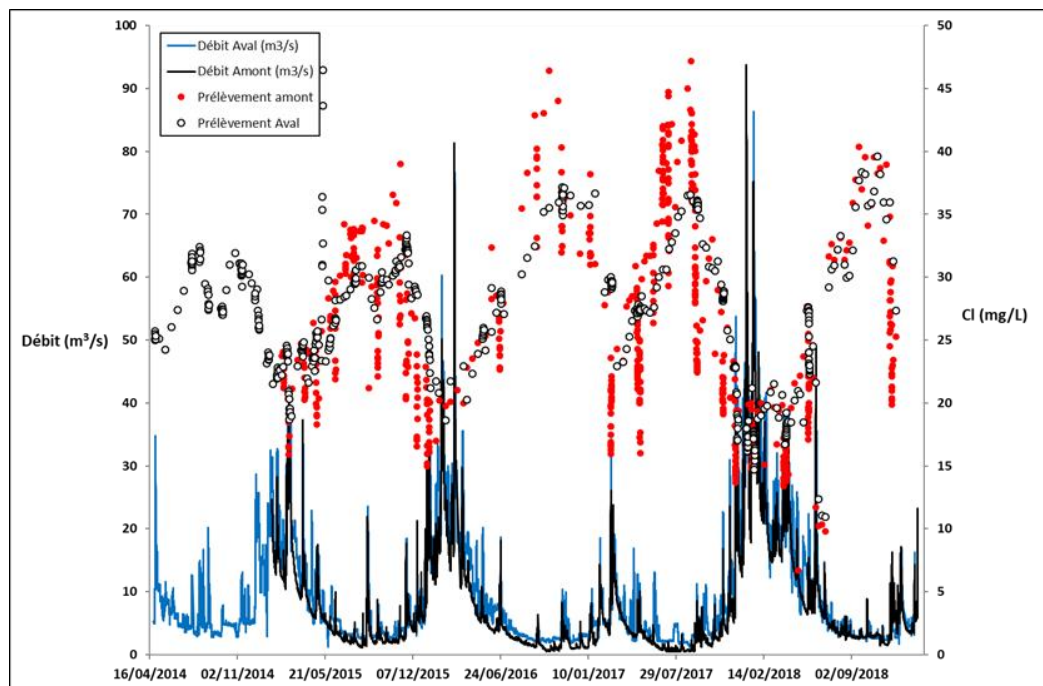
Annexe 3 : Concentration en phosphore dissous à l'amont et à l'aval des barrages



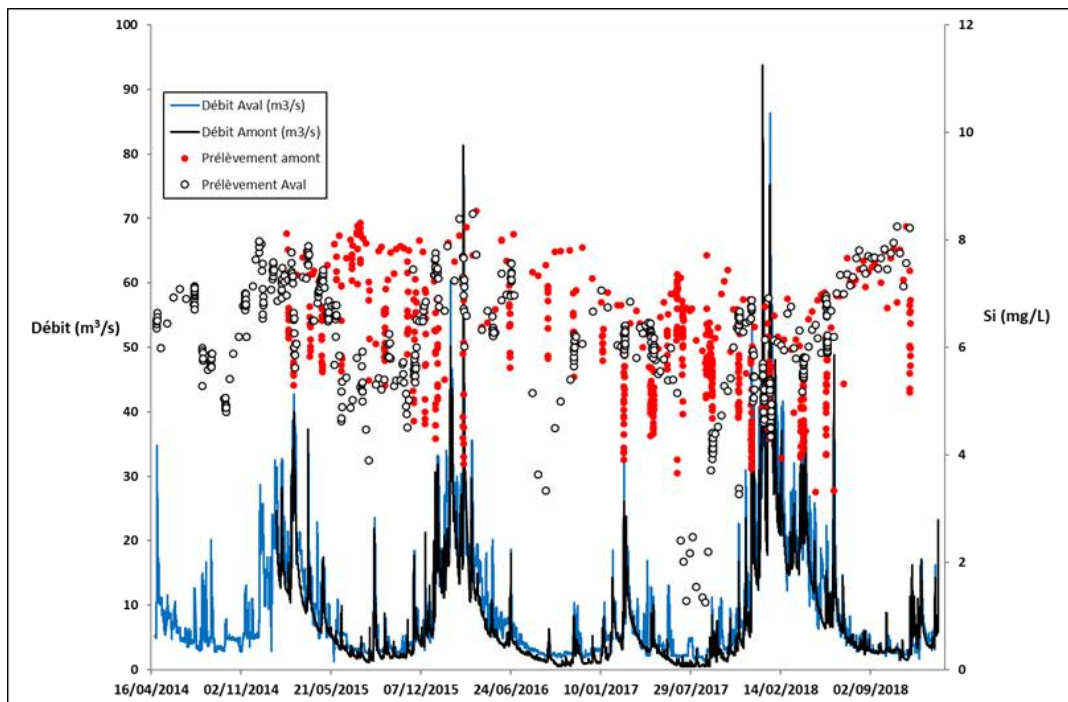
Annexe 4 : Concentration en nitrates à l'amont et à l'aval des barrages



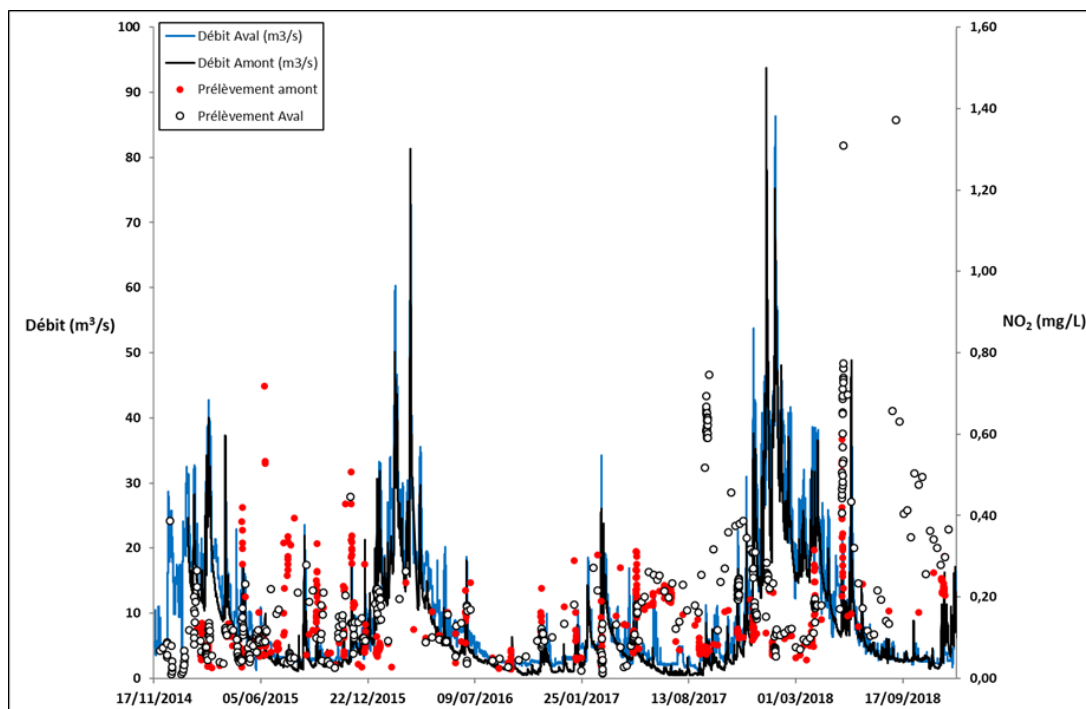
Annexe 5 : Concentration en sulfates à l'amont et à l'aval des barrages



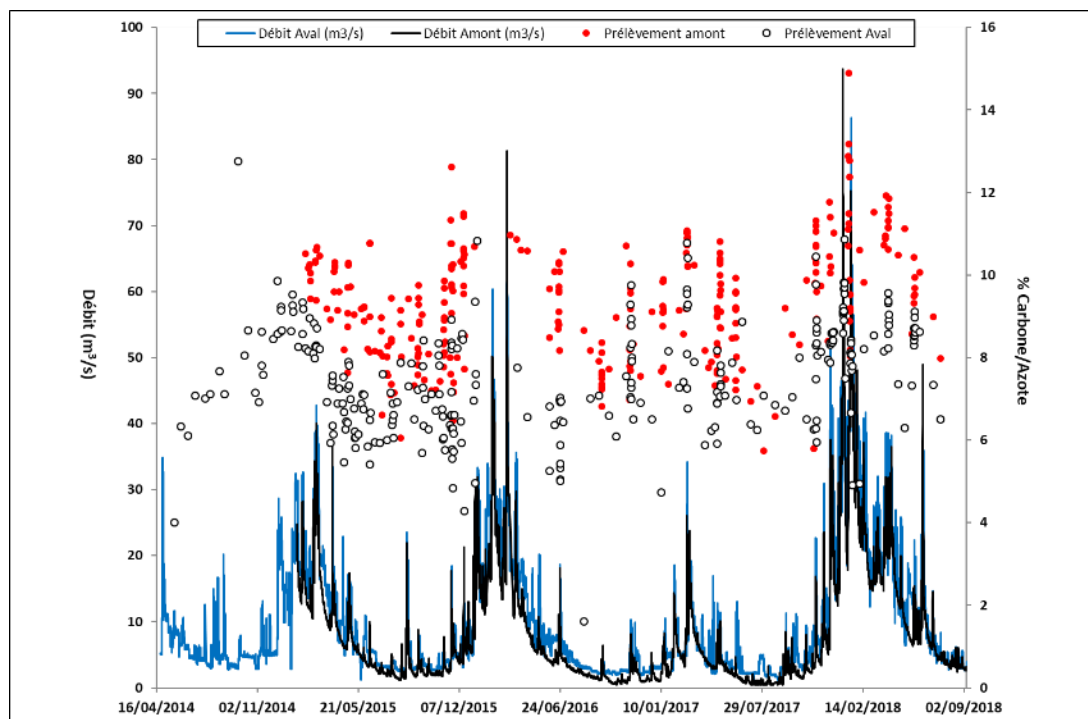
Annexe 6 : Concentration en chlorures à l'amont et à l'aval des barrages



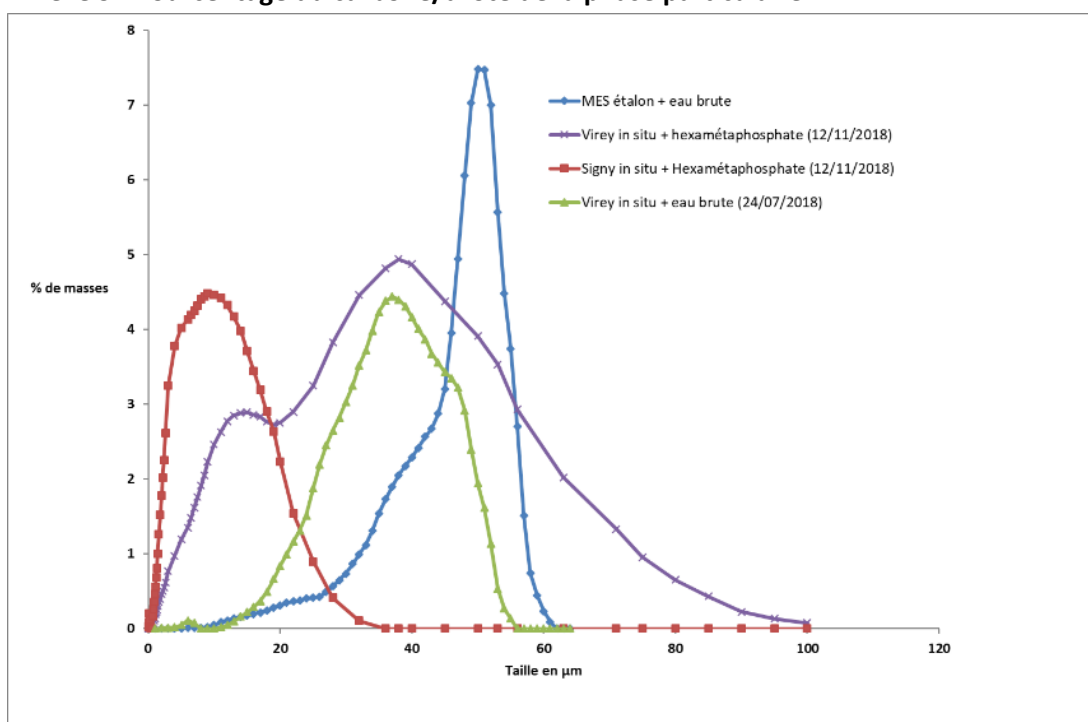
Annexe 7: Concentration en silice dissoute à l'amont et à l'aval des barrages



Annexe 8 : Concentration en nitrites à l'amont et à l'aval des barrages



Annexe 9 : Pourcentage du carbone/azote de la phase particulaire



Annexe 10 : Granulométrie laser de sédiments prélevés à l'amont et à aval sur la Sélune

Bibliographie

Sébastien Raymond. Incertitudes des flux transportés par les rivières (Matière en suspension, nutriments, sels dissous) : Vers un système expert d'optimisation des méthodes de calcul. 2011. Interfaces continentales, environnement. Université François Rabelais - Tours. Français. <tel-00714017>

Birgand F., Fauchaux C., Gruau G., Augeard B., Moatar F., and Bordenave P. 2010. Uncertainties in assessing annual nitrate load and concentration indicators: Part 1. Impact of sampling frequency and load estimation algorithms. Trans. ASABE 53(2): 437-446.

Moatar F., and Meybeck M. Compared performances of different algorithms for estimating annual nutrient loads discharged by the eutrophic River Loire. 2005. Hydrological Processes, 19 (2): 429-444. DOI:10.1002/hyp.5541

Moatar F., Meybeck M., Raymond S., Birgand F., and Curie F. River flux uncertainties predicted by hydrological variability and riverine material behavior. 2013. Hydrological Processes, 27(25): 3535-3546. DOI:10.1002/hyp.9464

Raymond S., Moatar F., Meybeck M. and Bustillo V. Choosing methods for estimating dissolved and particulate riverine fluxes from monthly sampling. 2013. Hydrological Sciences Journal, 58:6, 1326-1339, DOI: 10.1080/02626667.2013.814915