



HAL
open science

Dynamique fluviale (Volet 1) : Flux hydriques, sédimentaires et chimiques [Programme Sélune - Phase pré-arasement. Rapport bilan 2016-2017]

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 2016-2017]. [Rapport de recherche] Agence de l'Eau Seine-Normandie. 2018, pp.37. hal-03381879

HAL Id: hal-03381879

<https://hal.inrae.fr/hal-03381879>

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 2016-2017

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

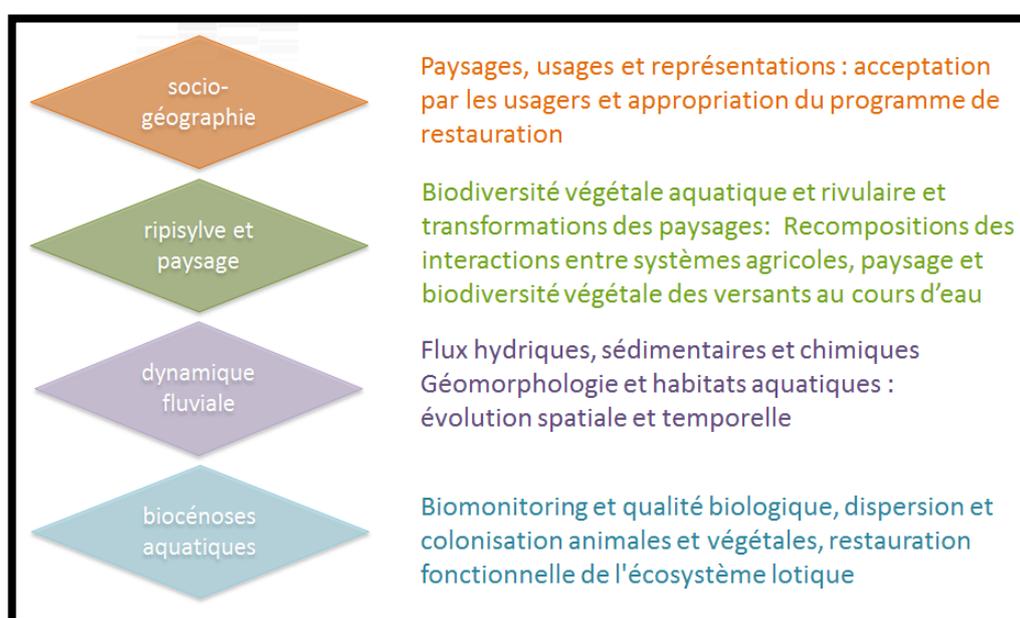
Avril 2018

Programme scientifique de suivi du fleuve Sélune -2016-2017- phase de vidange

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

1. Contexte et objectifs de l'étude

Le programme scientifique du suivi de l'arasement des barrages sur la Sélune, coordonné par l'INRA, a débuté en 2012. Il est actuellement organisé en quatre thèmes interdépendants :



Le présent rapport concerne le thème Dynamique fluviale.

Les barrages constituent une barrière physique affectant diversement les flux hydriques, sédimentaires et chimiques, ainsi que la géomorphologie du fleuve Sélune. Une bonne connaissance des flux, actuels et futurs, permettra de mettre en évidence par comparaison l'intensité des perturbations apportées par l'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 s'articule en trois volets :

1. L'étude des flux hydriques, sédimentaires et chimiques
2. L'étude de la géomorphologie dynamique de la rivière à deux échelles de temps (contemporaine et temps longs)
3. L'étude de la relation avec les habitats aquatiques

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).

Concernant le suivi des flux, l'année 2015 est donc la première année avec un jeu de donnée complet et comparable à l'amont et à l'aval des barrages. 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. Malgré cette incertitude, il apparaissait essentiel de maintenir un niveau de suivi minimal pour aller au bout de l'acquisition des données sur au moins deux années hydrologiques. Ceci pour disposer d'une caractérisation sérieuse des flux en présence des barrages. La prise en charge de cette veille a été assurée par l'Unité Mixte de Recherche SAS (INRA-AgroCampus Ouest) sur ses ressources propres dans la limite de ses possibilités. Depuis 2017, le suivi a repris sur son dimensionnement initial.

Le volet 3 concernant la relation avec les habitats aquatiques n'a été développée que plus récemment. Les suivis de flux et géomorphologiques effectués permettent de caractériser le fonctionnement du fleuve avec les deux barrages jusqu'ici. Plusieurs unités sont impliquées dans ces travaux (figure 1).

Le présent rapport propose un bilan rétrospectif des résultats pour le volet flux hydriques, sédimentaires et chimiques sur la période 2014-2017.

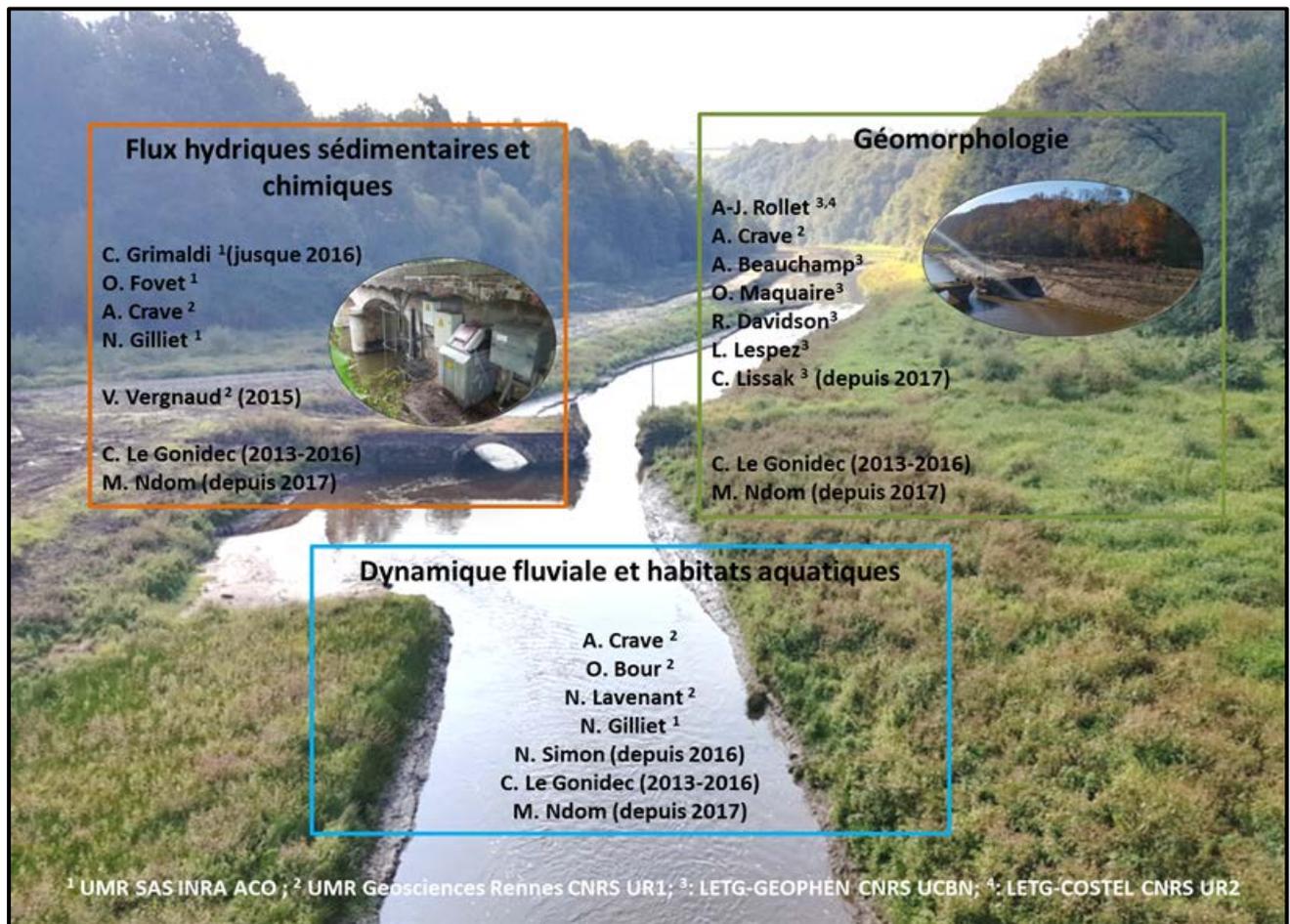


Figure 1 : Personnels de recherche impliqués dans le thème dynamique fluviale.

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

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

³: UMR CNRS-Université de Caen Normandie, LETG-Caen-Géographie Physique et Environnement (GEOPHEN)

Le bilan des trois années hydrologiques, résumé dans ce présent rapport, comprend la comparaison interannuelle des années de recueil de données sur le fonctionnement actuel de la Sélune en présence des barrages. 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. Les nouveaux équipements installés en 2017 sont également présentés ici. La deuxième partie du chapitre présente les résultats du suivi des flux et des concentrations sur les stations installées sur le cours principal de la Sélune en amont et en aval des barrages. Ces résultats sont ici exposés sous l'angle de la comparaison amont/aval de la dynamique des paramètres à deux échelles de temps : i) les dynamiques saisonnières et ii) leur dynamiques en condition de crue, c'est-à-dire associée à un évènement hydrologique lui-même associé à un évènement de précipitation.

Les dynamiques saisonnières sont induites par plusieurs processus :

- Des modifications des contributions hydrologiques relatives, comme par exemple une augmentation des flux de sub-surface à l'écoulement de base en période de hautes eaux et une contribution exclusivement profonde à l'étiage ;
- Des processus biogéochimiques contrôlés par la température, la lumière, voire la richesse en éléments nutritifs, comme par exemple la consommation de nutriments par les organismes photosynthétiques limitée en hiver par le manque de lumière.

Les dynamiques en crue traduisent :

- Les changements de contributions hydrologiques, avec lors de ces événements l'activation des contributions de surface, en particulier en montée de crue, qui d'une part activent de nouvelles sources d'éléments chimiques, et d'autre part diluent d'autres éléments selon l'origine de ces éléments. Selon la dynamique de l'évènement et les caractéristiques de ces sources des phénomènes d'épuisement peuvent apparaître ;
- L'augmentation de la capacité de transport du chenal lié à l'augmentation de vitesse du courant et du cisaillement dans le chenal, celle-ci suscite en particulier la remobilisation de sédiments du lit et des éléments chimiques liés à ces sédiments.

Les bilans hydrologiques sont réalisés par année hydrologique et non civile en prenant comme date initiale le 1er septembre.

On appelle donc « écoulement de base », les périodes sans variation hydrologique liées à des précipitations et « écoulement en crue », les périodes où un évènement de pluie induit une réponse hydrologique du fleuve même de faible ampleur.

Sommaire

1.	Contexte et objectifs de l'étude	1
2.	Dispositif et protocole de suivi des flux	8
2.1	Localisation des stations	8
2.2	Equipement des stations.....	9
2.3	Protocole de prélèvements et méthode d'analyse par paramètres.....	11
3.	Effets des barrages sur les dynamiques saisonnières et en crue des paramètres hydrologiques, sédimentaires et physico-chimiques	13
3.1	Une gestion des barrages visant un minimum d'impact sur l'hydrologie.....	13
3.2	Effet tampon des barrages sur la température.....	14
3.3	Abattement des flux sédimentaires par les barrages	16
3.4	Effet tampon des barrages sur les transferts d'éléments chimiques en crue	20
3.5	Effet variable des barrages sur les dynamiques saisonnières des éléments chimiques	23
4.	Conséquences pour les flux sédimentaires et chimiques	27
4.1	Exports et sources de sédiments et de nutriments.....	27
4.2	Quantification des flux annuels de sédiments fins	27
5.	Conclusion et perspectives	30
	Annexes	31
	Bibliographie	37

Table des illustrations

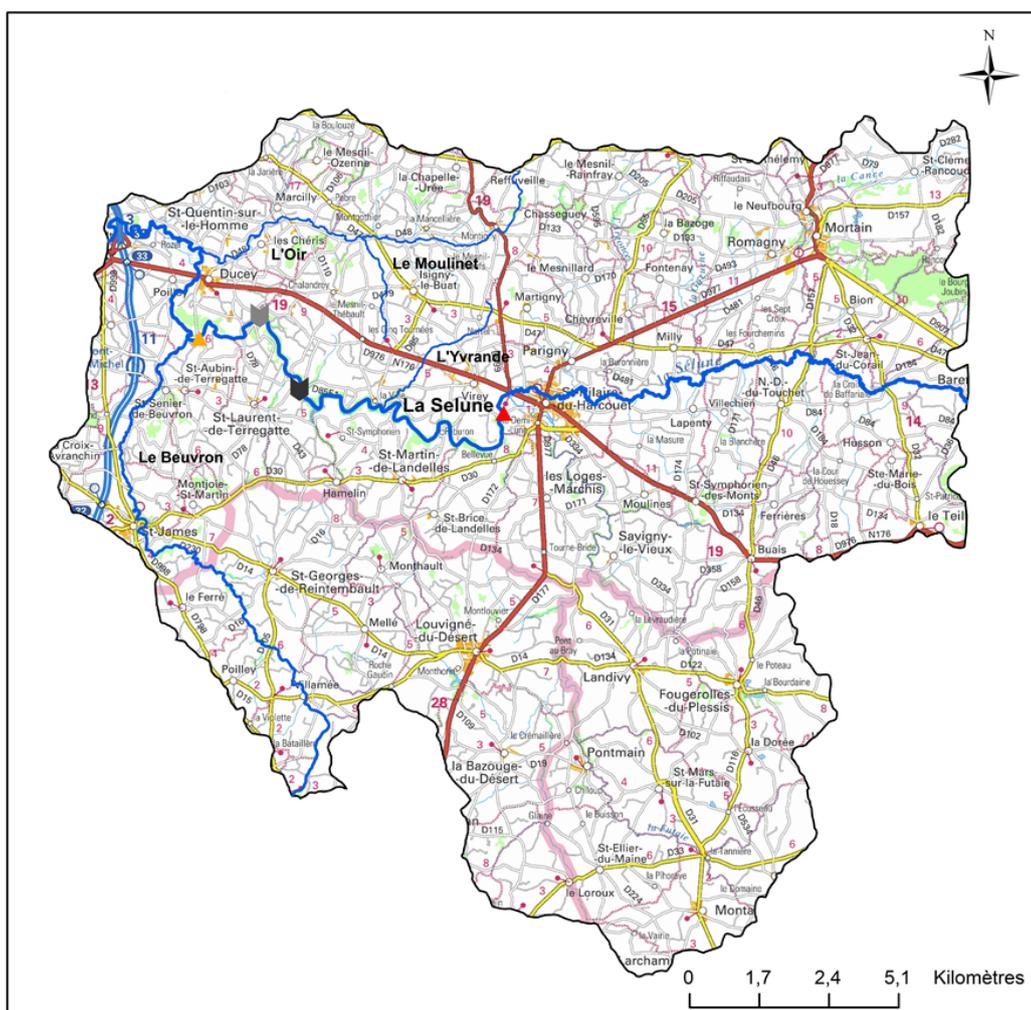
Figure 1 : Personnels de recherche impliquées dans le thème dynamique fluviale.	3
Figure 2 : Localisation des stations de suivi multi-paramètres sur le bassin versant de la Sélune.	8
Figure 3 : Photo de la station aval (Station INRA)	9
Figure 4 : Station amont (EDF-INRA), à gauche : le préleveur installé par l'INRA, À droite : les sondes et le dispositif de suivi installés par EDF.	10
Figure 5 : Tableau récapitulatif des paramètres mesurés sur les stations de la Sélune	11
Figure 6 : A gauche, préleveur réfrigéré à la station aval (pont de Signy), à droite préleveur non réfrigéré sur la station amont (pont de Virey).....	11
Figure 7 : Préparation au laboratoire des échantillons d'eau prélevée en vue des différentes analyses.....	12
Figure 8 : Chronique des précipitations et débits du 19/01/2015 au 25/10/2017, l'amont correspond à la station de Virey, l'aval à la station de Signy.	14
Figure 9 : Chronique des températures moyennes journalières des stations EDF et INRA sur la Sélune.	15
Figure 10 : Amplitude thermique hebdomadaire et mensuelle des stations de la Sélune et schéma explicatif du boxplot	16
Figure 11 : Boxplot de la turbidité sur les stations de Sélune de l'amont à l'aval (Virey, Dorière, Roche-Qui-Boit, Signy).....	17
Figure 12 : Chronique de débit et de la turbidité journalière.	18
Figure 13 : Boxplot des concentrations de MES sur la station amont et aval en période de crue.	18
Figure 14 : Concentrations de MES mesurées sur la station amont et aval.....	19
Figure 15 : Boxplot des concentrations de phosphore total et dissous en période de crue et d'écoulement de base, NB: l'échelle de mesure est différente sur les boxplots.	20
Figure 16 : Boxplot des chlorures en période de crue et d'écoulement de base.	21
Figure 17 : boxplot des nitrates en période de crue et d'écoulement de base.	21
Figure 18 : boxplot des sulfates en période de crue et d'écoulement de base.	22
Figure 19 : boxplot de la silice dissoute en période de crue et d'écoulement de base.	22
Figure 20 : Boxplot des nitrites et ammonium en période en crue et d'écoulement de base.	23
Figure 21 : Boxplot des orthophosphates et Silice dissoute à l'amont et à l'aval des barrages et à deux périodes différentes (Hiver/Printemps et Été/Automne).	24
Figure 22 : Ratio C/N des matières en suspension à l'amont et à l'aval des barrages.....	25
Figure 23 : Boxplot du C/N particulaire à l'amont et à l'aval des barrages et à deux périodes différentes (Hiver/Printemps et Été/Automne).	25
Figure 24 : Concentration des nitrates, sulfates et des chlorures à l'amont et à l'aval des barrages.....	27
Figure 25 : Relation entre la turbidité et la concentration de Mes (à gauche), Intervalle de confiance de l'équation (à droite).	28
Figure 26 : Relation entre la turbidité et la concentration de Mes (à gauche), Intervalle de confiance de l'équation (à droite).	29

Table des annexes

Annexe 1 : Turbidité à la station de Virey.....	31
Annexe 2 : Turbidité à la station de la Dorière.....	31
Annexe 3 : Turbidité à la station de la Roche-Qui-Boit.....	32
Annexe 4 : Turbidité à la station de Signy.....	32
Annexe 5 : concentration de MES à la station aval.....	33
Annexe 6 : Concentration de phosphore dissous à l'amont et à l'aval.....	33
Annexe 7 : Concentration de phosphore total à l'amont et à l'aval.....	34
Annexe 8 : Concentration de silice à l'amont et à l'aval.....	34
Annexe 9 : Concentration d'ammonium à l'amont et à l'aval.....	35
Annexe 10 : Concentration de nitrites à l'amont et à l'aval.....	35
Annexe 11: Stations de l'AESN en amont de la Sélune.....	36

2. Dispositif et protocole de suivi des flux

2.1 Localisation des stations



Légende

- Tronçon cours d'eau
- Bassin versant de la Sélune

Barrages de la Sélune

- Roche-Qui-Boit
- Vezin

Stations INRA

- Station du pont de Signy
- Station du pont de Virey

Figure 2 : 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 DUCEY/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 3 : 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 4 : 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	Dorière	Roche-Qui-Boit	Pont de Signy
Conductivité électrique ($\mu\text{g}/\text{cm}$)	X	X	X	X
Oxygène dissous (mg/L)	X	X	X	
Température ($^{\circ}\text{C}$)	X	X	X	X
pH	X	X	X	
Turbidité (FNU)	X	X	X	X
Turbidité Mes (mg/L)	0	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

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

Figure 5 : Tableau récapitulatif des paramètres mesurés sur les stations de la Sélune

2.3 Protocole de prélèvements 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 6 : 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 ce 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, NO₃, NO₂, SO₄ et Cl sont mesurés par chromatographie ionique ; PO₄, P total, NH₄, 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.

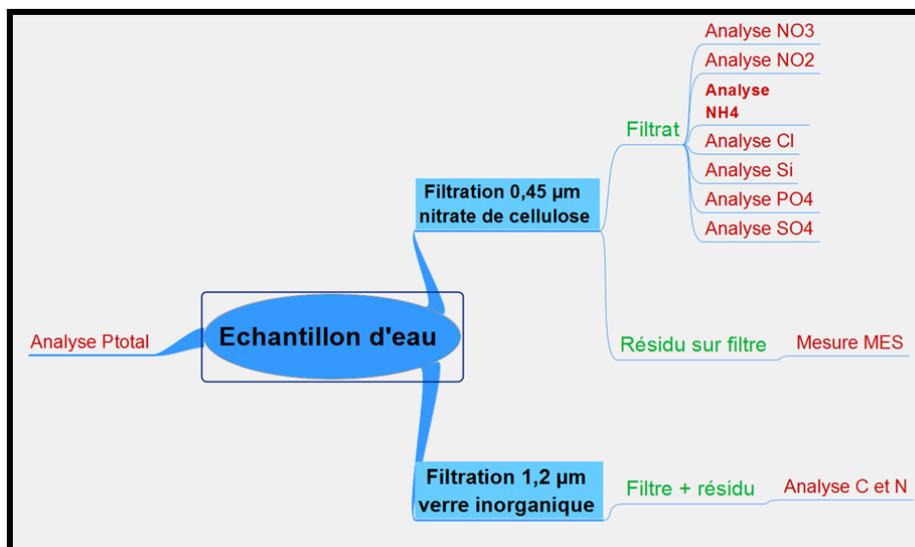


Figure 7 : Préparation au laboratoire des échantillons d'eau prélevée en vue des différentes analyses.

3. Effets des barrages sur les dynamiques saisonnières et en crue des paramètres hydrologiques, sédimentaires et physico-chimiques

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

L'année 2017 a été faible en précipitation par rapport aux deux dernières années, on remarque bien les faibles valeurs de précipitations hivernales en 2017 (Figure 8). Le cumul mensuel de septembre à aout est respectivement de 843,5 mm (pour 2014-2015), 758 mm (pour 2015-2016) et de 596 mm (pour 2016-2017). Ceci souligne l'intérêt d'un suivi sur plusieurs années hydrologiques pour la caractérisation des flux afin de tenir compte de cette variabilité climatique d'une année sur l'autre.

La chronique de débit (Figure 8) pour comparer les stations amont/aval concerne la période du 19/01/2015 au 25/10/2017. Le débit en écoulement de base à la station à l'aval est estimé à 10,1 m³/s contre 7,4 m³/s à la station à l'amont, pour 75% des échantillons prélevés (3^{ème} quartile). Le débit maximum hors période de crue est atteint en hiver : 37,2 m³/s (25/02/2015) à l'aval et 25,9 m³/s (25/02/2015) à l'amont. La valeur minimale de débit enregistrée correspond à la période estivale : 1,3 m³/s (30/08/2017) à l'aval et 0,46 m³/s (19/07/2017) à l'amont. Le débit mesuré sur la station amont est ainsi plus faible que le débit mesuré à la station située à l'aval des barrages qui draine un bassin plus vaste.

Le flux hydrique spécifique annuel est de 429 mm à la station amont et de 443 mm à la station aval pour l'année hydrologique 2015-2016. L'année 2016-2017 a été plus sèche, le flux hydrique spécifique annuel est de 145 mm à la station amont et 173 mm à la station aval (pour la période du 01/09/2016 au 01/09/2017).

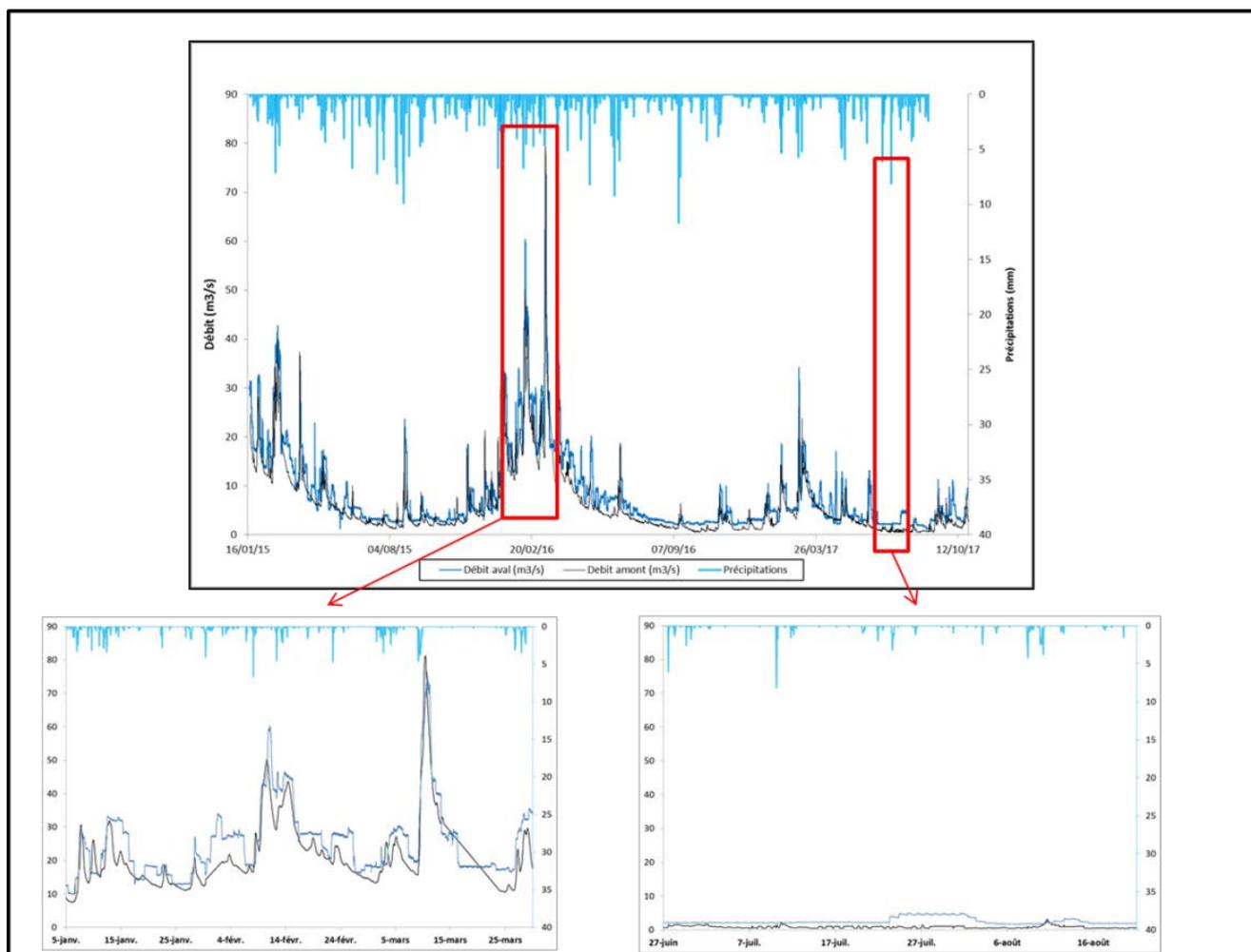


Figure 8 : Chronique des précipitations et débits du 19/01/2015 au 25/10/2017, l'amont correspond à la station de Virey, l'aval à la station de Signy.

La gestion des barrages est raisonnée pour une production hydroélectrique à côte haute, et affecte les débits à l'échelle journalière uniquement. En effet on observe une dynamique à l'aval marquée par la régulation artificielle: décrue par palier, débit en créneau... La règle de gestion est de ne pas dépasser les $30 \text{ m}^3/\text{s}$ à l'aval lorsque le débit entrant dans les retenues est inférieur à $30 \text{ m}^3/\text{s}$, et sinon de relâcher à l'aval un débit identique au débit entrant (rapport Etat des Lieux, Phase I, SEPIA CONSEILS). En cas de fortes variations de débit, deux vannes sont utilisées pour maintenir la côte dans le réservoir à son niveau initial. Si les volumes des réservoirs ne sont pas mobilisés pour du laminage de crue, des évènements d'amplitude faible peuvent montrer un écrêtement des faibles débits de pointe.

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 9) en cohérence avec la variation saisonnière des températures de l'air et de l'ensoleillement. À l'amont des barrages, l'amplitude thermique (hebdomadaire et mensuelle) des eaux de la rivière est plus marquée à l'amont qu'aux stations en aval des barrages où cette variabilité semble être tamponnée (Figure 10). Ainsi de l'amont vers l'aval, l'amplitude thermique

hebdomadaire est de 5,1 °C (Virey), 2,9°C (Dorière), 1,9°C (la Roche-Qui-Boit) et 4°C (Signy) pour 75% des mesures (Figure 10).

Enfin, on remarque que la température moyenne sur la station de Virey est généralement plus fraîche que sur les stations aval, excepté en hiver où plusieurs jours montrent une température moins froide à Virey que sur les stations aval. En effet, la moyenne des températures journalières sur la période 2014-2017 est respectivement de l'amont vers l'aval : 12,5°C (Virey), 13,7°C (Dorière), 13,6°C (Roche-Qui-Boit) et 13,5°C (Signy).

Le réchauffement naturel d'amont en aval s'accompagne aussi d'un effet tampon à cause du volume d'eau et de la profondeur des réservoirs. Les profils verticaux de température dans les lacs montrent une variabilité sur la partie superficielle de quelques mètres (voir volet Biomonitoring du projet de recherche). En revanche en profondeur, au niveau des prises d'eau pour le turbinage, la température n'est sensible qu'aux variations saisonnières des températures de surface.

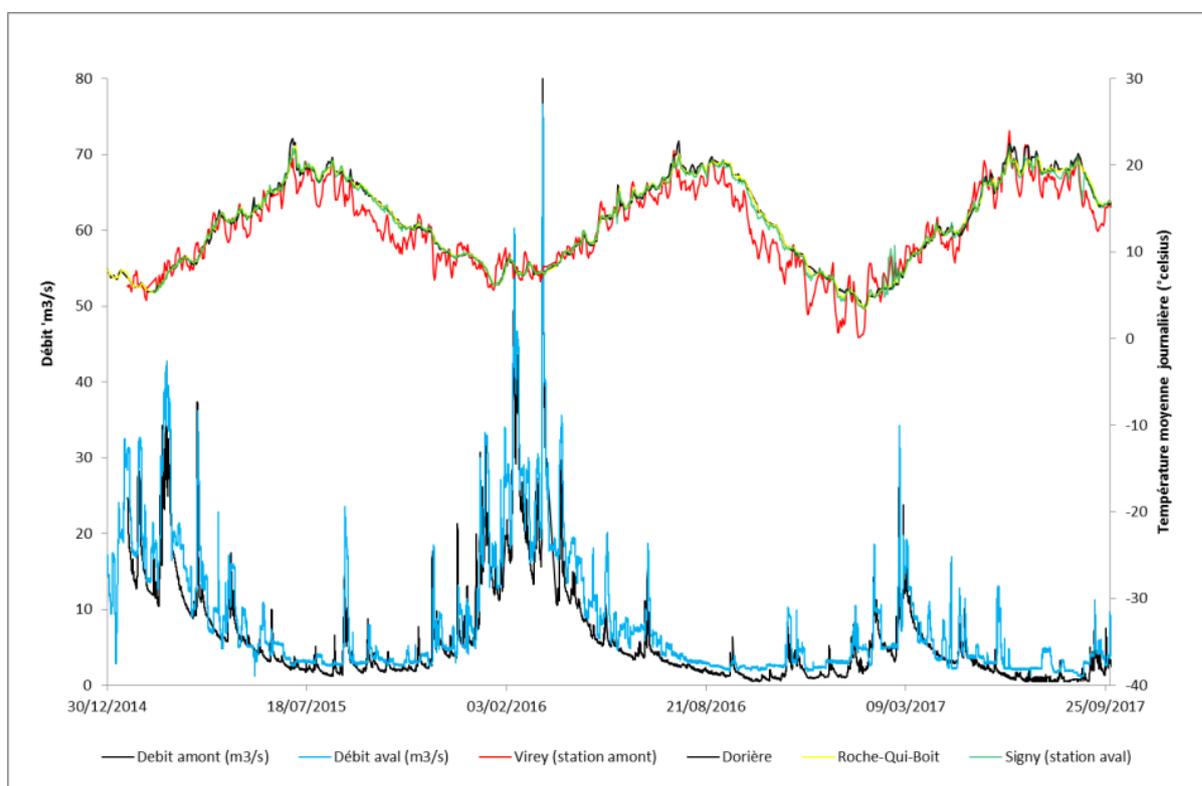


Figure 9 : Chronique des températures moyennes journalières des stations EDF et INRA sur la Sélune.

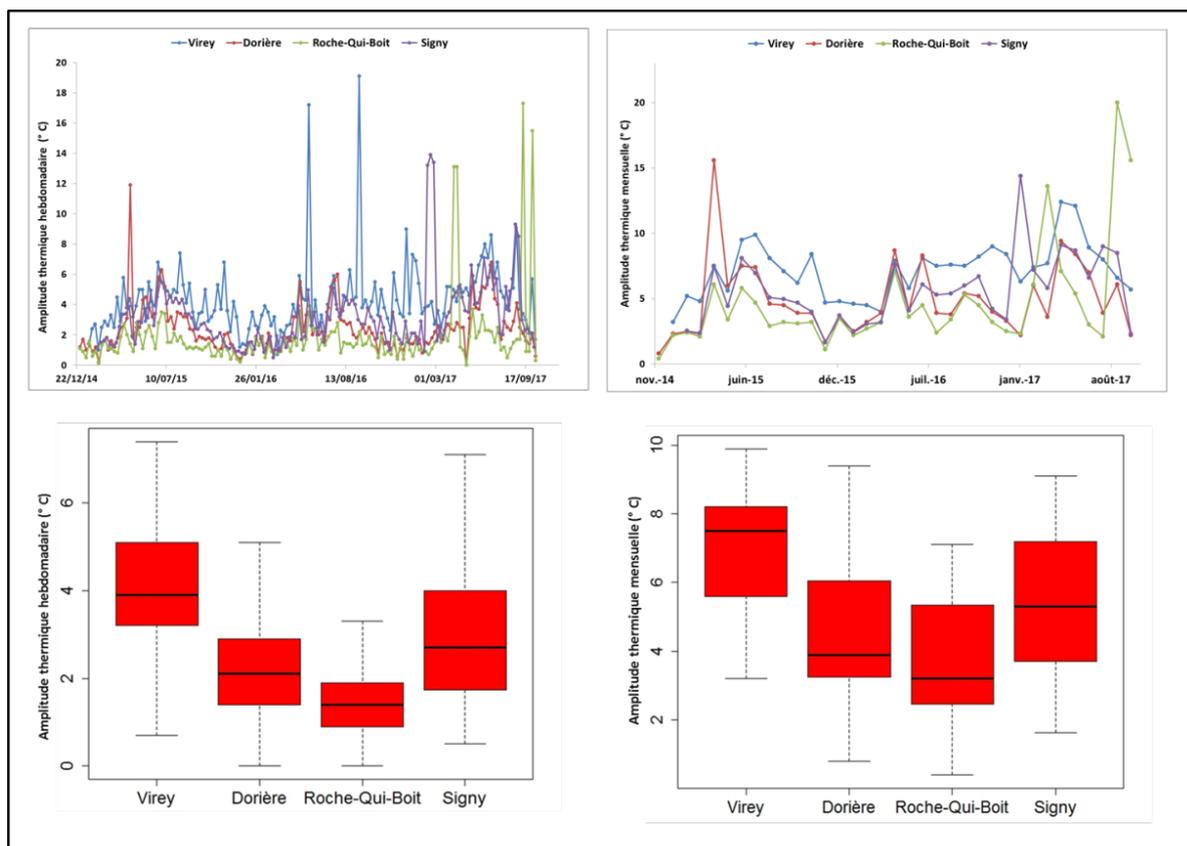


Figure 10 : Amplitude thermique hebdomadaire et mensuelle des stations de la Sélune et schéma explicatif du boxplot .

3.3 Abattement des flux sédimentaires par les barrages

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), hors crue 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.

Les données de turbidité sur les stations présentées ci-dessus couvrent la période du 19/01/2015 au 30/08/2017 (Figures 11 et 12) où l'on voit que ce paramètre est fortement impacté par les événements de crue auxquels sont associés des pics de turbidité et de concentrations en MES sur la station amont de Virey. Cette observation est classique puisque les processus de transferts sédimentaires des versants vers les cours d'eau et au sein des cours d'eau sont plus importants au cours de ces événements ponctuels. A la station aval, ces pics sont fortement amortis et le niveau de fond de la turbidité est également réduit par rapport à l'amont.

La turbidité mesurée varie dans une gamme de 1 à 452 NTU (Nephelometric Turbidity Unit). A l'amont des barrages (station de Virey), la valeur moyenne est de 26 NTU. Pour la station de Dorière, localisée à la sortie du barrage du Vézins, la turbidité moyenne chute à 7 NTU, puis 6 NTU pour la station de la Roche-qui-Boit, et enfin 5 NTU à la station de Signy (Figure 11).

Ces valeurs sont données à titre indicatif, une opération d'intercalibration des capteurs est nécessaire pour aller plus loin dans la comparaison des différentes stations aval où la turbidité varie dans des gammes très faibles. L'intercalibration des turbidimètres des quatre stations est en cours de réalisation. On note tout de même une réduction importante de l'ordre de grandeur des valeurs de turbidité après le premier barrage. Les concentrations de matières en suspension (MES) diminuent également entre l'amont et l'aval des barrages (figures 13 et 14 et A5).

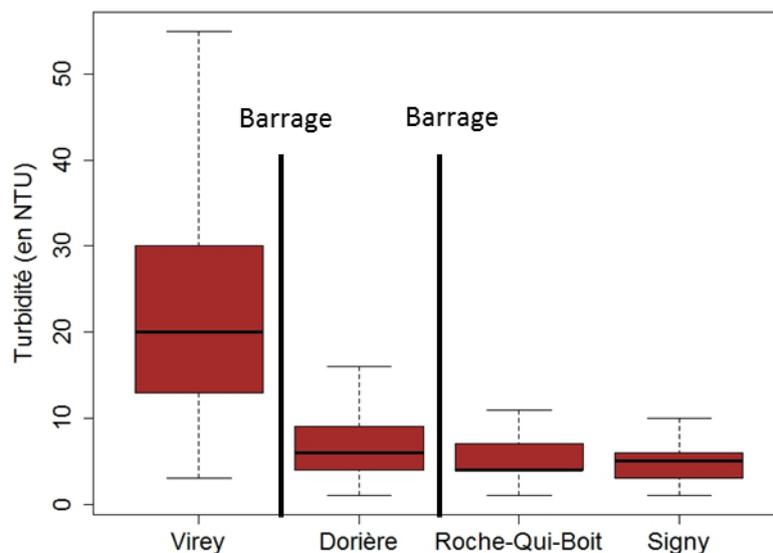


Figure 11 : Boxplot de la turbidité sur les stations de Sélune de l'amont à l'aval (Virey, Dorière, Roche-qui-Boit, Signy).

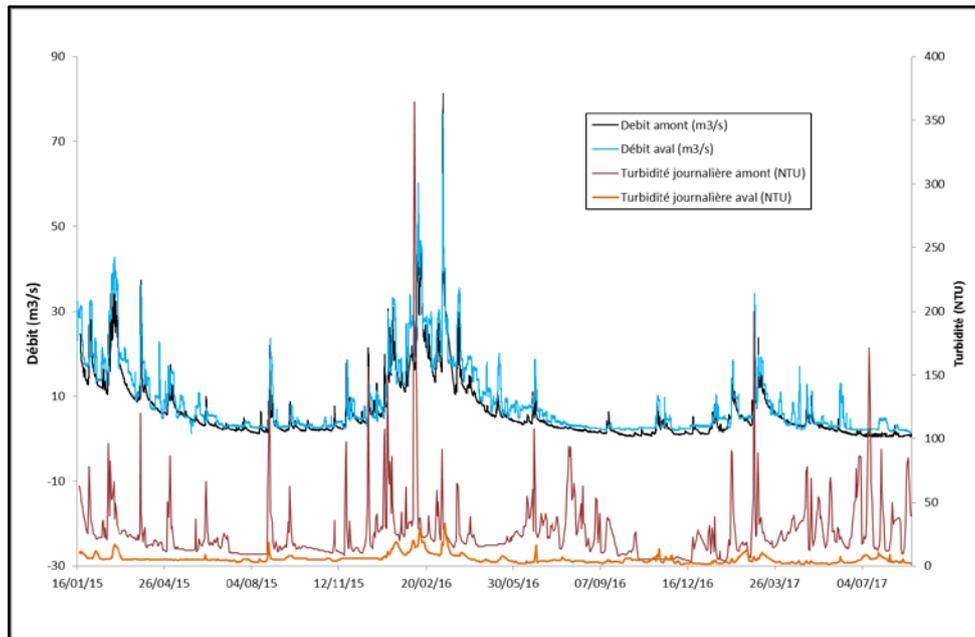


Figure 12 : Chronique de débit et de la turbidité journalière.

Toujours en période de crue, La concentration moyenne de MES est de 109 mg/L à la station amont et 21 mg/L à la station en aval des barrages (Figure 14). Par ailleurs, des pics de concentrations sont enregistrés lors des évènements de crue. La concentration maximale de MES mesurée est de 1380 mg/L (07/04/2016) à l'amont et 102 mg/L (20/10/2014) à la station aval. Les barrages agissent donc bien comme des décanteurs de sédiments qui sont stockés dans les réservoirs, expliquant la chute de turbidité et de la concentration de MES à l'aval.

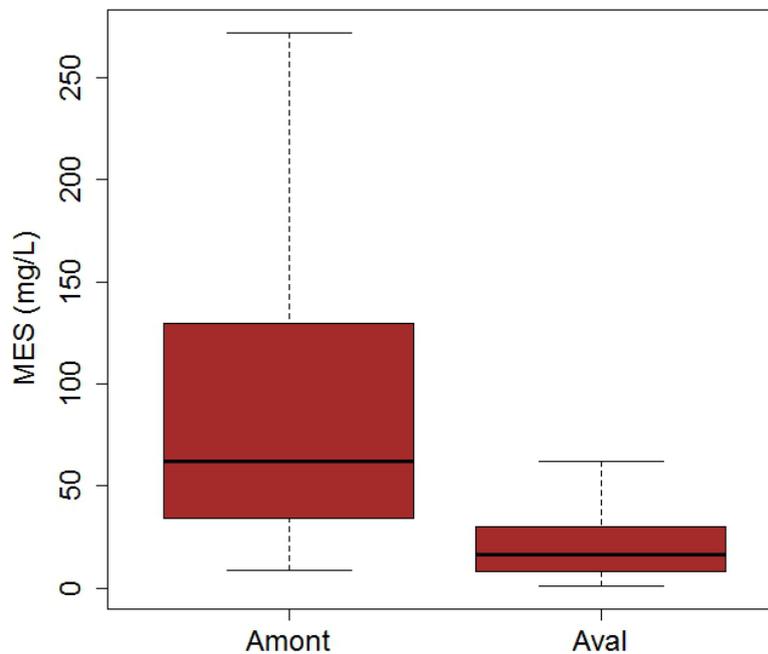


Figure 13 : Boxplot des concentrations de MES sur la station amont et aval en période de crue.

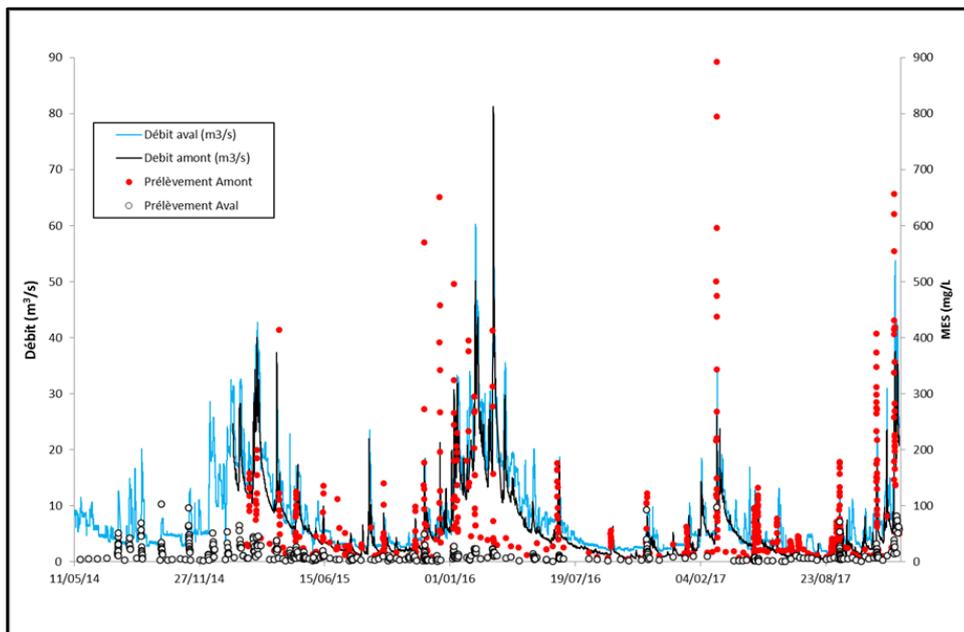


Figure 14 : Concentrations de MES mesurées sur la station amont et aval.

3.4 Effet tampon des barrages sur les transferts d'éléments chimiques en crue

3.4.1 Piégeage du phosphore avec les sédiments

Lors des évènements hydrologiques, la concentration en phosphore (dissous et total) présente des pics, similaires à ceux des concentrations en MES, ces pics sont néanmoins amortis à l'aval par les barrages (Figure 15).

Les pics de phosphore mesurés en période de crue atteignent une concentration maximale 0,85 mg/l à l'amont contre 0,24 mg/L à l'aval (pour le phosphore total) et 0,39 mg/L à l'amont contre 0,46 mg/l à l'aval (pour le phosphore dissous). Ces valeurs mesurées en crue sont supérieures aux valeurs mesurées en écoulement de base à l'amont comme à l'aval mais l'amplitude des pics de concentrations mesurés en crue est amoindrie à l'aval.

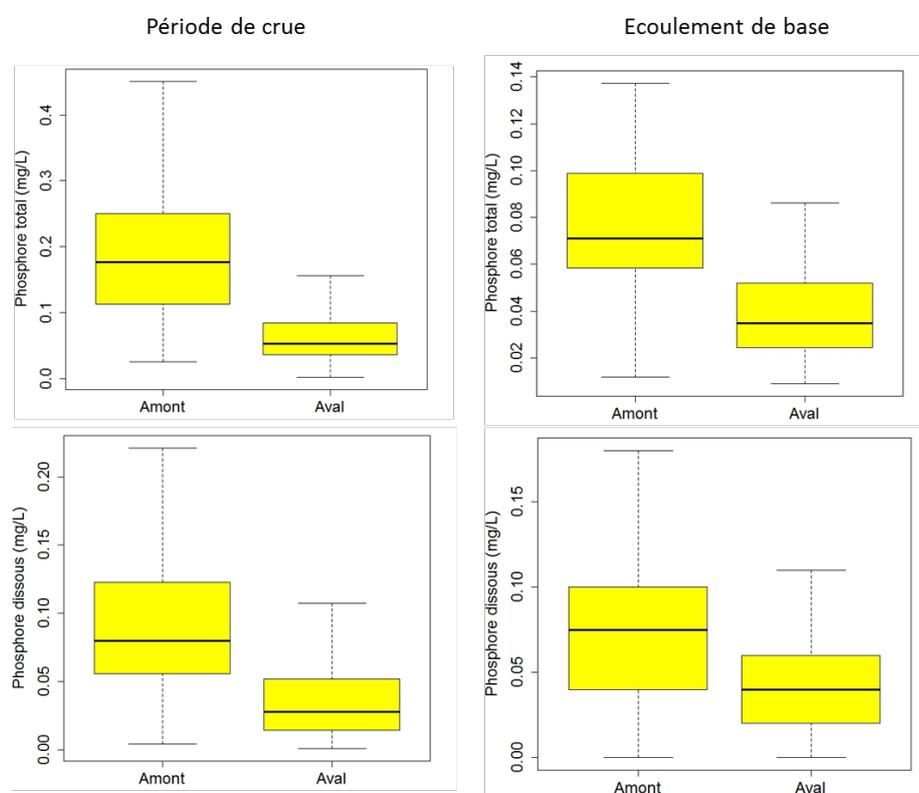


Figure 15 : Boxplot des concentrations de phosphore total et dissous en période de crue et d'écoulement de base, NB: l'échelle de mesure est différente sur les boxplots.

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 et sulfates (Figures 16, 17, 18) ainsi que pour la silice dissoute (figure 19). 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. Les ions chlorure 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 événements de crue, sont plus diluées vis-à-vis de ces éléments. A l'aval, ces dilutions de concentrations sont fortement tamponnées (Figures 16 à 19), ceci s'explique par le mélange avec l'eau stockée au sein des deux réservoirs.

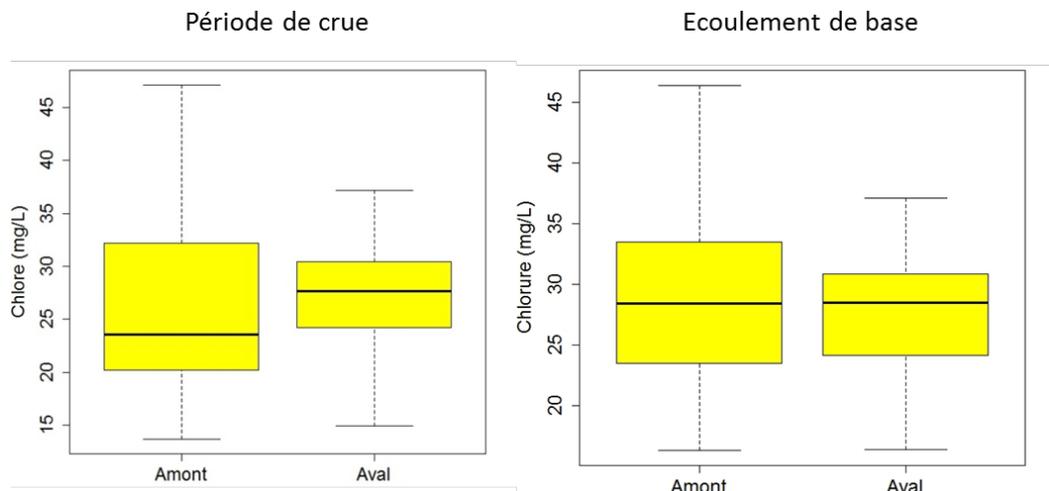


Figure 16 : Boxplot des chlorures en période de crue et d'écoulement de base.

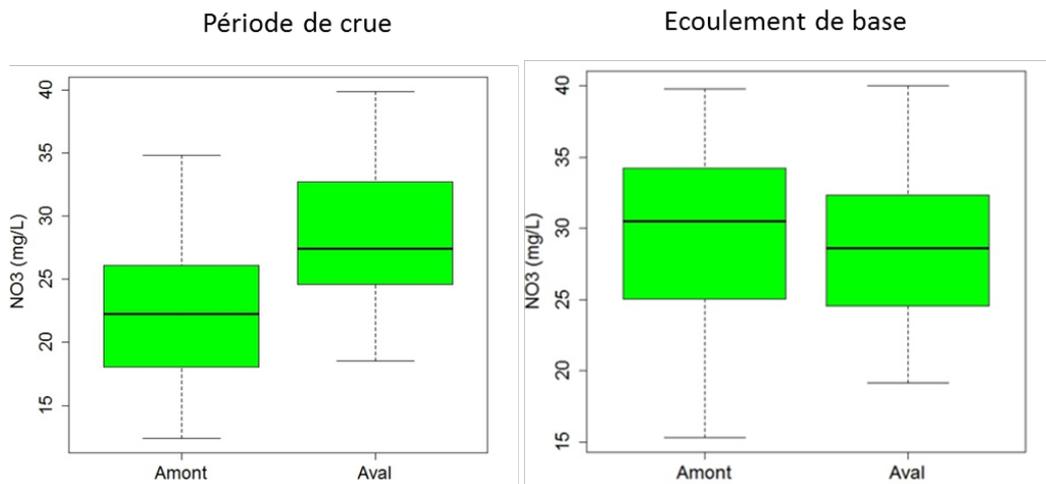


Figure 17 : boxplot des nitrates en période de crue et d'écoulement de base.

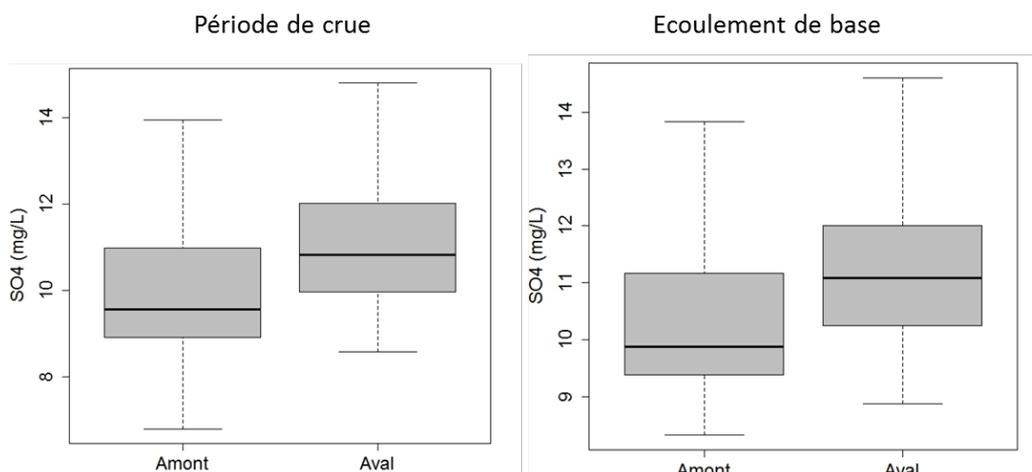


Figure 18 : boxplot des sulfates en période de crue et d'écoulement de base.

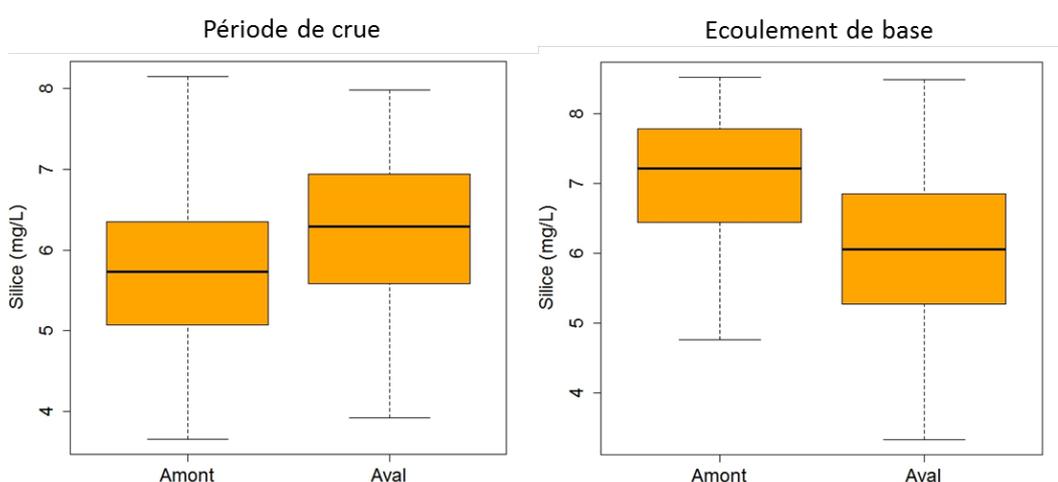


Figure 19 : boxplot de la silice dissoute en période de crue et d'écoulement de base.

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, mais cette différence disparaît en période de crue. Lors des événements de crue, des pics de concentration de nitrite et d'ammonium sont observés à l'amont, et amortis à l'aval comme pour le phosphore (Figure 20). La concentration maximale de nitrite mesurée est de 0,71 mg/L à l'amont contre 0,69 mg/L à l'aval. Et la concentration maximale d'ammonium mesurée est de 3,6 mg/L (15/09/2017) à l'amont et 0,9 mg/L (14/12/2017) à l'aval.

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.

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. Des processus internes aux réservoirs peuvent donc expliquer les concentrations en NH_4 et NO_2 plus élevées à l'aval des retenues.

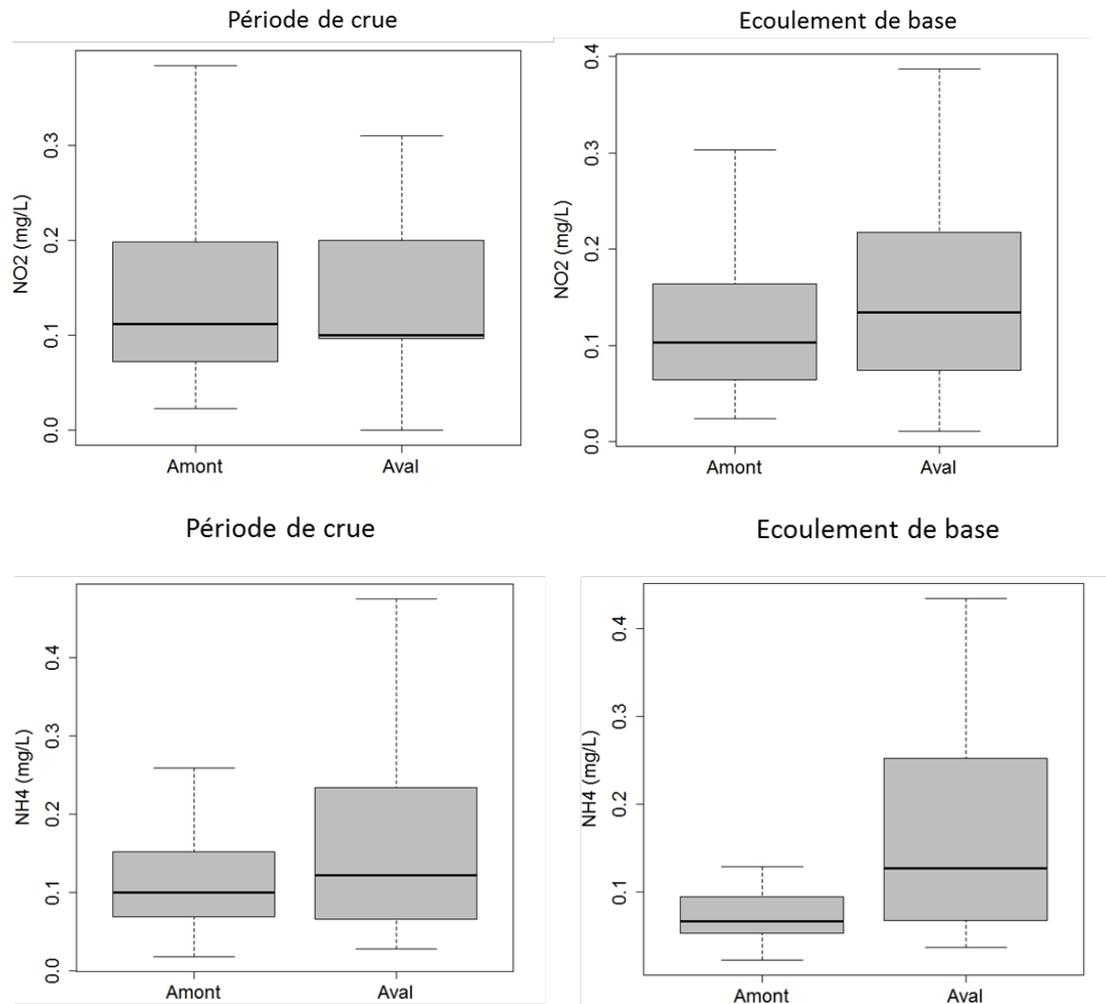


Figure 20 : Boxplot des nitrites et ammonium en période en crue et d'écoulement de base.

3.5 Effet variable des barrages sur les dynamiques saisonnières des éléments chimiques

3.5.1 Consommation saisonnière de phosphore et de silice dissous dans les réservoirs

On observe une dynamique saisonnière différente entre l'amont et l'aval des barrages pour ces deux éléments (Figure 15 et figure 21).

En période d'écoulement de base, la concentration de phosphore dissous (PO_4) est plus importante à l'amont qu'à l'aval comme pour les crues. En effet, les concentrations de PO_4 à l'amont

sont plus fortes l'été et jusqu'à la fin de l'automne, et plus faibles au printemps (Figure 21). A l'aval, les variations saisonnières de concentration en PO_4 sont moins prononcées mais sont inversées par rapport à l'amont (Figure 21) : elles augmentent plutôt au début de l'hiver, puis restent relativement plus faible le reste de l'année. A cette échelle saisonnière, des concentrations en PO_4 plus élevées en période d'étiage (comme observées à l'amont, et aussi sur les stations AESN amont cf. annexe 11) traduisent généralement une source ponctuelle dominante, comme un rejet d'épuration, qui est à peu près constante dans l'année mais plus diluée en période de fort débit qu'en période de faible débit.

A l'amont, la concentration moyenne de silice, varie très peu saisonnièrement de l'hiver à l'automne (entre 6 et 6,3 mg/L). En revanche, à l'aval la concentration moyenne de silice est beaucoup plus variable (6,6 à 5,3 mg/L) entre l'hiver/printemps et l'été/automne (Figure 21).

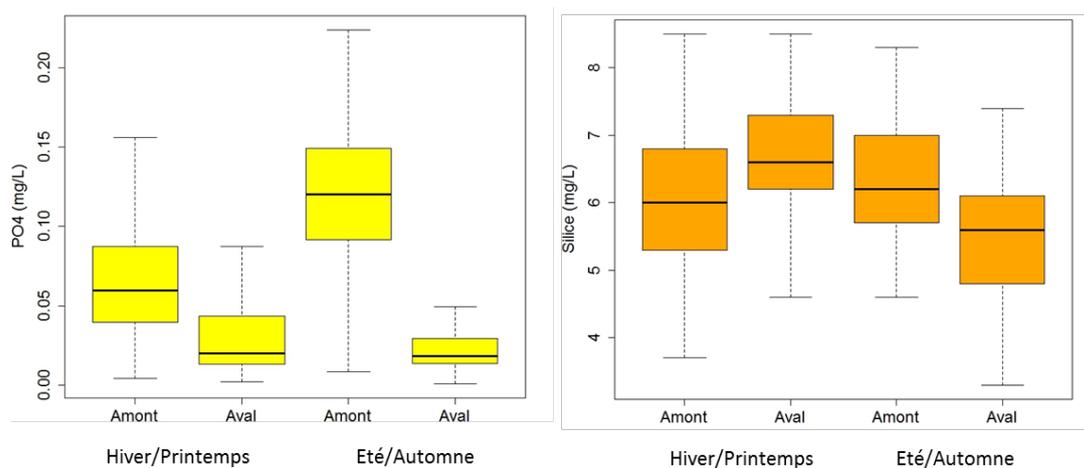


Figure 21 : Boxplot des orthophosphates et Silice dissoute à l'amont et à l'aval des barrages et à deux périodes différentes (Hiver/Printemps et Eté/Automne).

On peut identifier ici un effet « puits estival » des barrages dans la dynamique saisonnière de concentration du phosphore dissous et de la silice qui efface la dynamique saisonnière du PO_4 et en génère une pour la concentration en silice dissoute. Ces éléments dissous, constituent en effet des éléments nutritifs limitant pour les communautés de phytoplanctons en eau douce, et il existe un phasage entre le développement de ces communautés (contrôlé par la lumière et la température à l'échelle saisonnière) et la consommation de silice et de phosphore dissous observée de l'été au début d'automne (voir rapport 2016 pour plus de détails).

3.5.2 Exportation saisonnière de 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 témoigne d'une origine aquatique de la matière organique et un rapport de C/N supérieur à 8 témoigne d'une matière organique d'origine terrigène (rapport d'étape, 2016).

En écoulement de base, le rapport du C/N est estimé à 9,7 à l'amont et 7,5 à l'aval pour les 75% des prélèvements (Figure 22). A l'amont, le rapport C/N est plus important durant la période hiver/printemps (C/N= 10,2 pour 75% des prélèvements) et diminue sur la période été/automne (C/N = 9,7 pour 75% des prélèvements). Contrairement à l'amont, le rapport C/N à l'aval varie très peu et

est plus important sur la période été/automne (C/N= 8,18 pour 75% des prélèvements) qu'à la période hiver/printemps (C/N = 8,15 pour 75% des prélèvements) (Figure 23).

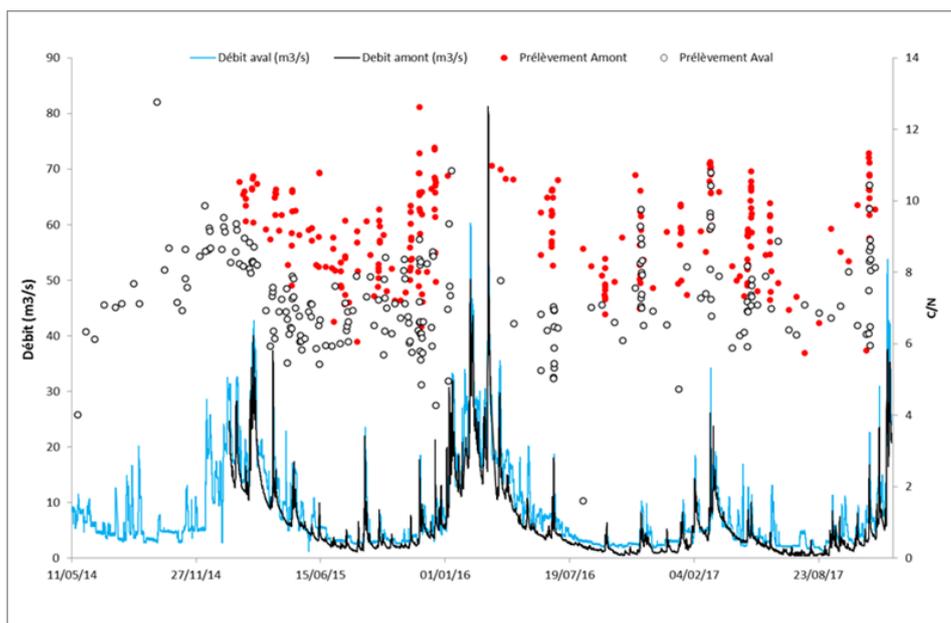


Figure 22 : Ratio C/N des matières en suspension à l'amont et à l'aval des barrages.

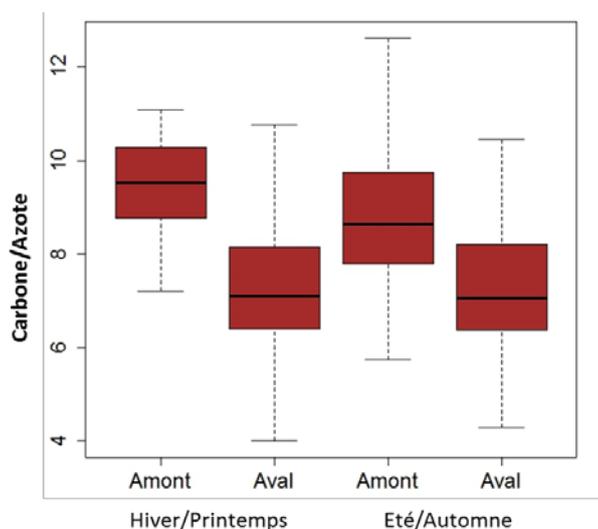
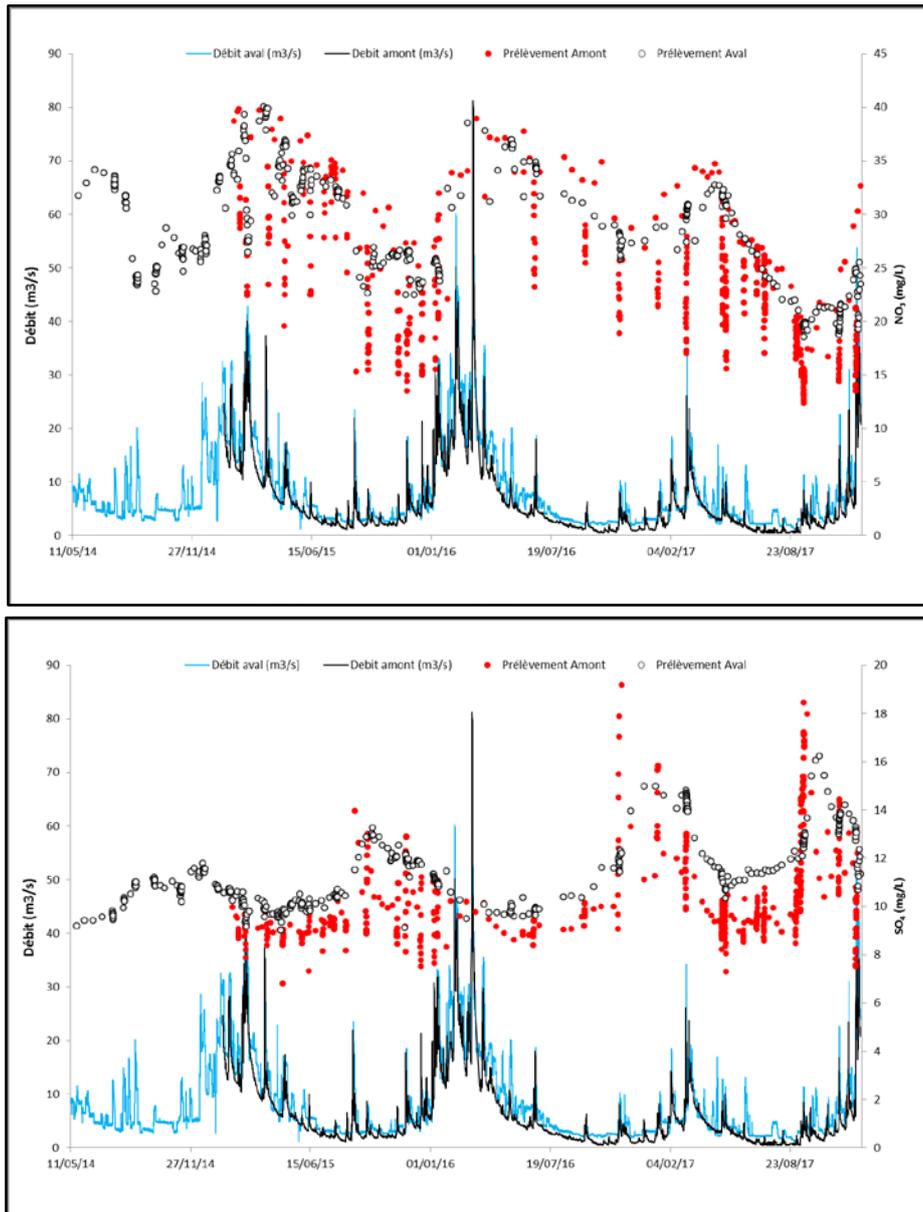


Figure 23 : Boxplot du C/N particulière à l'amont et à l'aval des barrages et à deux périodes différentes (Hiver/Printemps et Eté/Automne).

3.5.3 Faible impact sur les dynamiques saisonnières des anions majeurs

Les ions nitrates, sulfates et chlorures ont des rythmes saisonniers synchrones à l'amont et à l'aval (Figure 24). 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 (écart d'1 mg/L). 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 minima de Cl et SO₄, et un léger retard par rapport au maximum de débit (Figure 24). Ce rythme n'est pas modifié par les barrages.



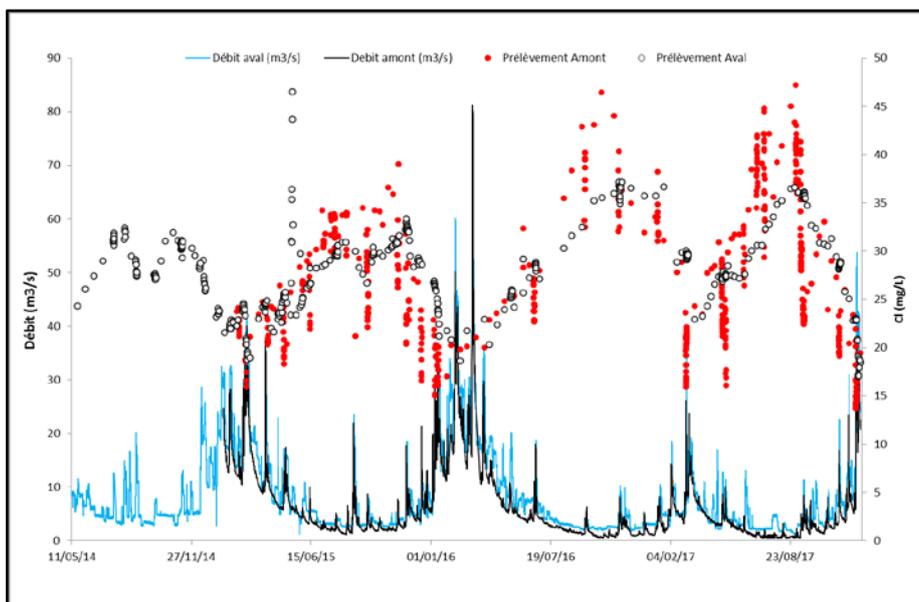


Figure 24 : Concentration des nitrates, sulfates et des chlorures à l'amont et à l'aval des barrages.

4. Conséquences pour les flux sédimentaires et chimiques

4.1 Exports et sources de sédiments et de nutriments

Le débit spécifique annuel est assez proche à l'amont et à l'aval des barrages. Malgré quelques effets sur les débits journaliers, la dynamique des flux hydriques est globalement très similaire à l'amont et à l'aval, ainsi l'impact des barrages sur les flux associés aux flux hydriques va dépendre surtout de leur impact sur la dynamique des concentrations :

- Les concentrations en MES, ainsi qu'en phosphore présentent des pics importants associés aux évènements de crue. Ainsi la majeure partie du flux annuel de MES et de phosphore est composée par ces évènements de crue. L'amortissement important de ces pics de concentration sur la station aval induit donc une nette diminution des flux de MES et de Phosphore, traduisant le piégeage des sédiments et du phosphore associé par les barrages ;
- Les concentrations en anions majeurs sont diluées par les évènements de crue, ainsi la majeure partie du flux annuel de NO_3 , Cl et SO_4 est associée à l'écoulement de base. Les concentrations de ces éléments sont peu affectées en écoulement de base, l'effet des barrages sur ces flux reste donc limité.

4.2 Quantification des flux annuels de sédiments fins

Station de Virey (amont)

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 turbidité et les matières en suspension, plusieurs relations ont d'abord été testées (relation puissance, relation logarithmique, une régression linéaire et une double régression linéaire) afin de déterminer la plus appropriée. Dans le cas de notre station, une relation linéaire simple (Eq.1) apparaît pertinente (Figure 25) et les relations plus complexes testées n'ont pas amélioré significativement la qualité de la régression.

Pour établir la relation pour la station en amont des barrages, on dispose de 25 crues échantillonnées et pour lesquelles la turbidité mesurée est qualifiée fiable, soit 286 couples de points sur la période 2015/2017. Les crues ont été triées selon la qualité (estimée via le R^2) 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 15 crues (197 points) dont on a soustrait deux crues qui influençaient beaucoup la droite de régression. Nous avons ainsi obtenu une corrélation d'un R^2 de 0,96 à partir de ces crues triées à la station amont (soit 171 points) (Figure 25).

L'incertitude de cette équation de calibration a été calculée avec un intervalle de confiance de 95%. Ainsi pour l'équation de calibration, l'incertitude sur la pente $a = 1,909$ est $[1,84 ; 1,97]$ et sur l'ordonnée à l'origine $b = -16,512$ est $[-23,2 ; -9,8]$. La régression et le calcul des incertitudes associées ont été conduites à l'aide du package R stats.

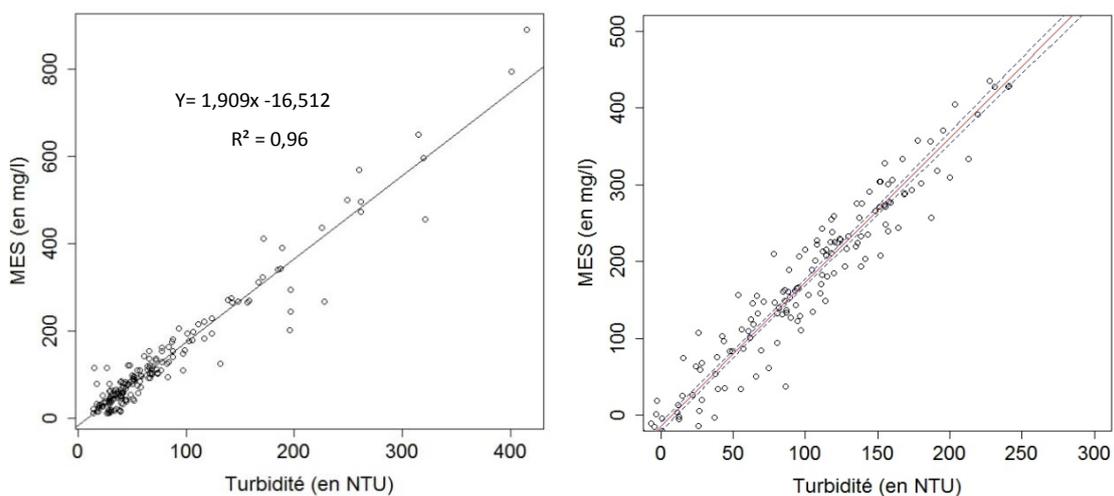


Figure 25 : Relation entre la turbidité et la concentration de Mes (à gauche), Intervalle de confiance de l'équation (à droite).

$$\text{MES (mg/L)} = (a * \text{Turbidité}) + b \quad (\text{Eq.1})$$

Le flux de MES est calculé en multipliant les concentrations par le débit puis en intégrant ce flux instantané sur la durée souhaitée. Le flux annuel à l'amont est ainsi estimé à 16 453 tonnes soit environ 26 tonnes/km² pour la période 2015-2016 avec une incertitude de 12%. La période 2016-

2017 étant peu pluvieuse, le flux estimé à 4176 tonnes correspond à environ 6 tonnes/km² soit environ ¼ des flux de l'année précédente, avec une incertitude de 14%.

Station de Signy (aval)

La relation de calibration turbidité/MES à l'aval des barrages a été déterminée avec la même méthodologie que celle utilisée à l'amont. L'équation de calibration (Eq.2) d'un R² de 0,84 a été obtenue à partir de 14 crues triées selon un R² > 0,5 (14/39 crues soit 98 points) (Figure 26). L'incertitude de cette équation de calibration a été calculée avec un intervalle de confiance de 95%. Ainsi pour l'équation de calibration, l'incertitude sur la pente a = 3,359 est [2,99 ; 3,72] et sur l'ordonnée à l'origine b = -8,20 est [-10,8; -5,5].

Le flux annuel à l'aval pour la période 2015-2016 est estimé à 2168 tonnes soit environ 2,6 tonnes/km² avec une incertitude de 39%. En 2016-2017, le flux annuel estimé à 295 tonnes correspond à environ 0,37 tonnes/km² avec une incertitude de 63%.

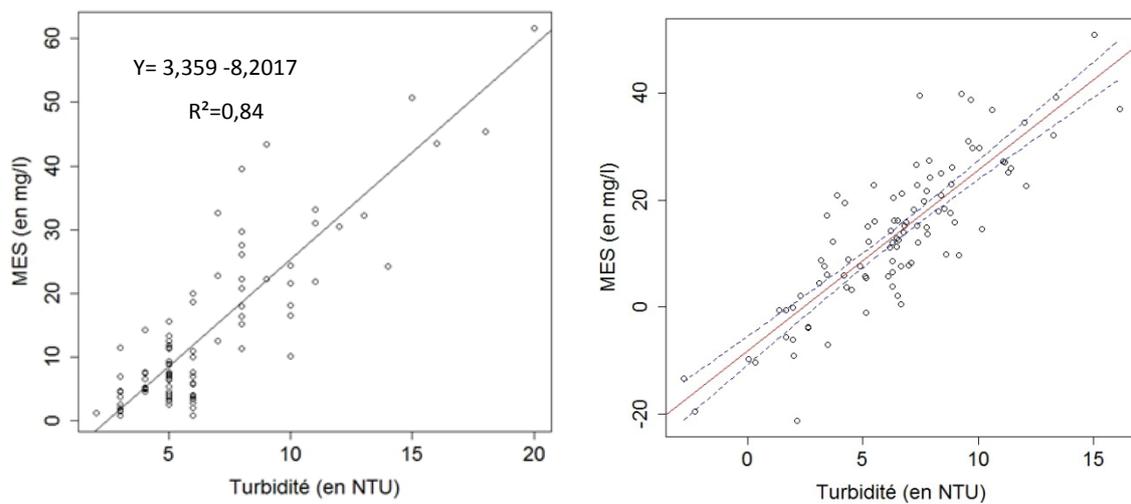


Figure 26 : Relation entre la turbidité et la concentration de Mes (à gauche), Intervalle de confiance de l'équation (à droite).

5. Conclusion et perspectives

Le suivi des flux sédimentaires et hydro-chimiques a débuté en avril 2014 (à l'aval des barrages uniquement au départ), et s'appuie sur deux stations hydro-chimiques et sédimentaires en amont et aval des deux barrages de la Sélune, ainsi que sur les deux stations intermédiaires à l'aval immédiat de chaque barrage. Ces suivis couvrent maintenant deux années hydrologiques complètes, aux conditions climatiques contrastées et ont permis de mettre en évidence l'influence des barrages sur les dynamiques événementielles et saisonnières des flux avec 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 ;
- Des effets source/puits saisonniers sur certains éléments chimiques liés à l'activité et la production biologique dans les réservoirs.

Dans cette première phase de vidange, aucun effet particulier des opérations de vidange ne semblent avoir été relevé à ce stade. Toutefois, il apparaît évident que ce suivi soit pertinent à poursuivre durant la totalité des travaux.

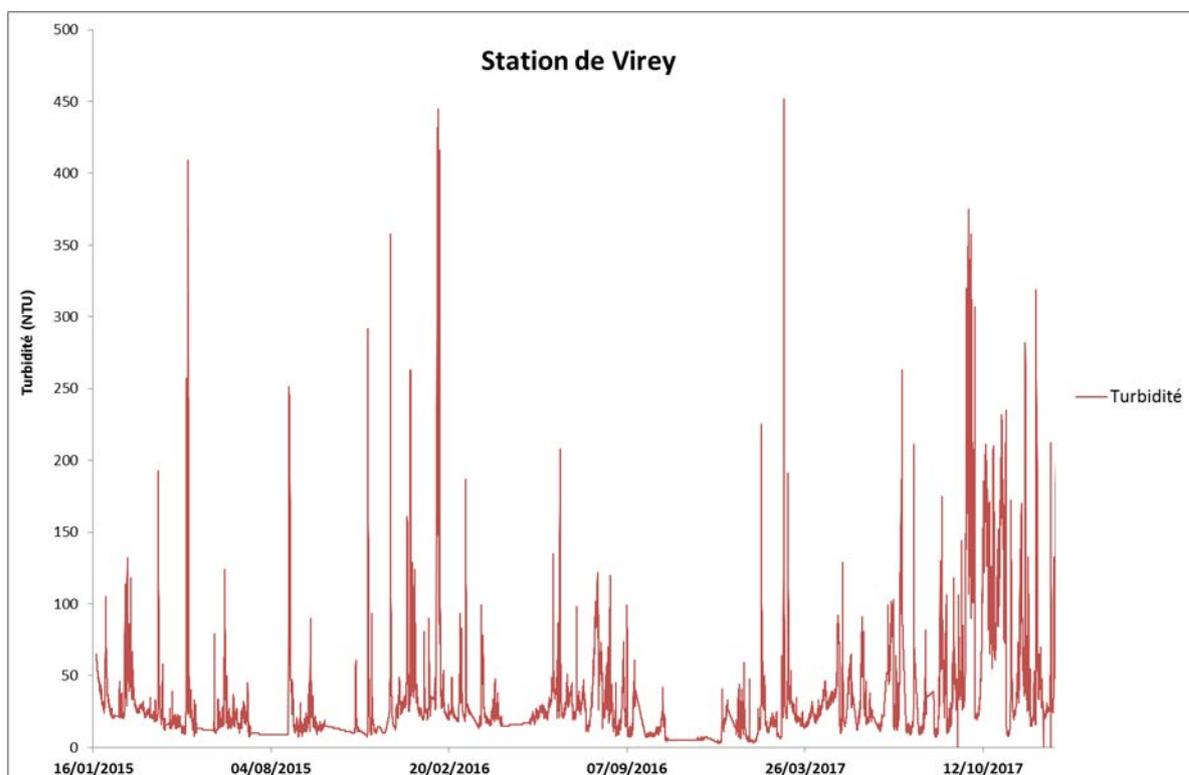
L'acquisition, la valorisation et l'exploitation de ces données se poursuivra donc avec :

- Le calcul des flux de solutés et les incertitudes associées pour chaque année hydrologique disponible ;
- L'exploitation des données de phytoplancton mesurées par sonde optique à la station de Signy, une première année de mesure en continu est maintenant disponible et sera confrontée aux données mesurées dans le cadre du volet « biomonitoring » ;
- L'inter-calibration des sondes de turbidité des 4 stations de suivi en continu de ce paramètre.

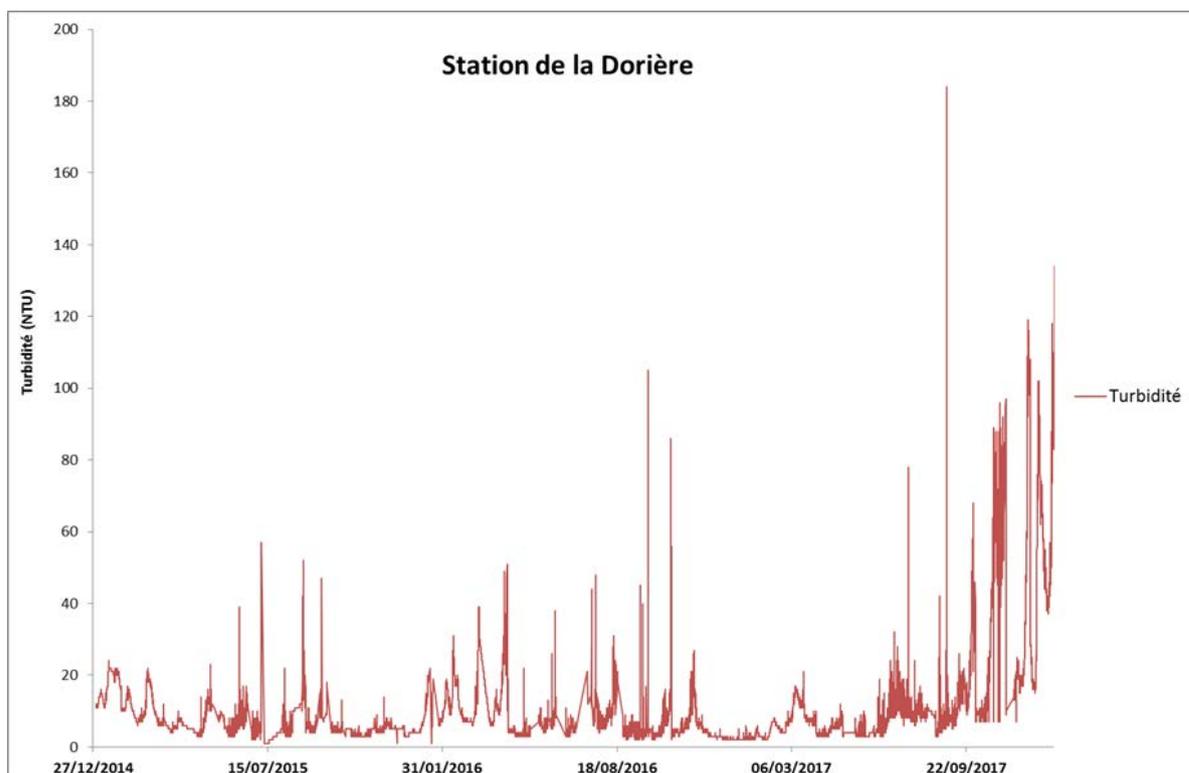
Plusieurs perspectives sont aussi actuellement en cours de réflexion sur d'autres actions à mener en synergie entre ce volet de suivi des flux et d'autres volets du programme de suivi de la Sélune notamment sur le Paysage et la ripisylve, les affluents du fleuve Sélune, et les biocénoses de cet hydrosystème.

Annexes

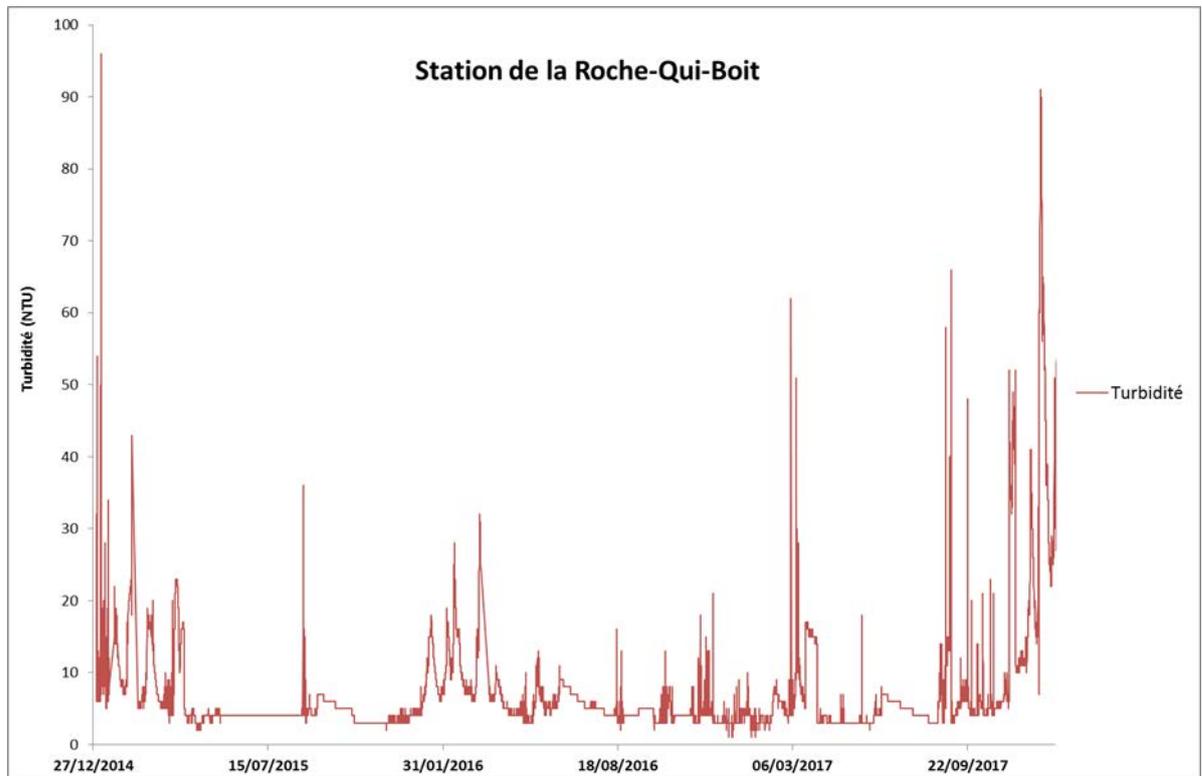
Annexe 1 : Turbidité à la station de Virey.



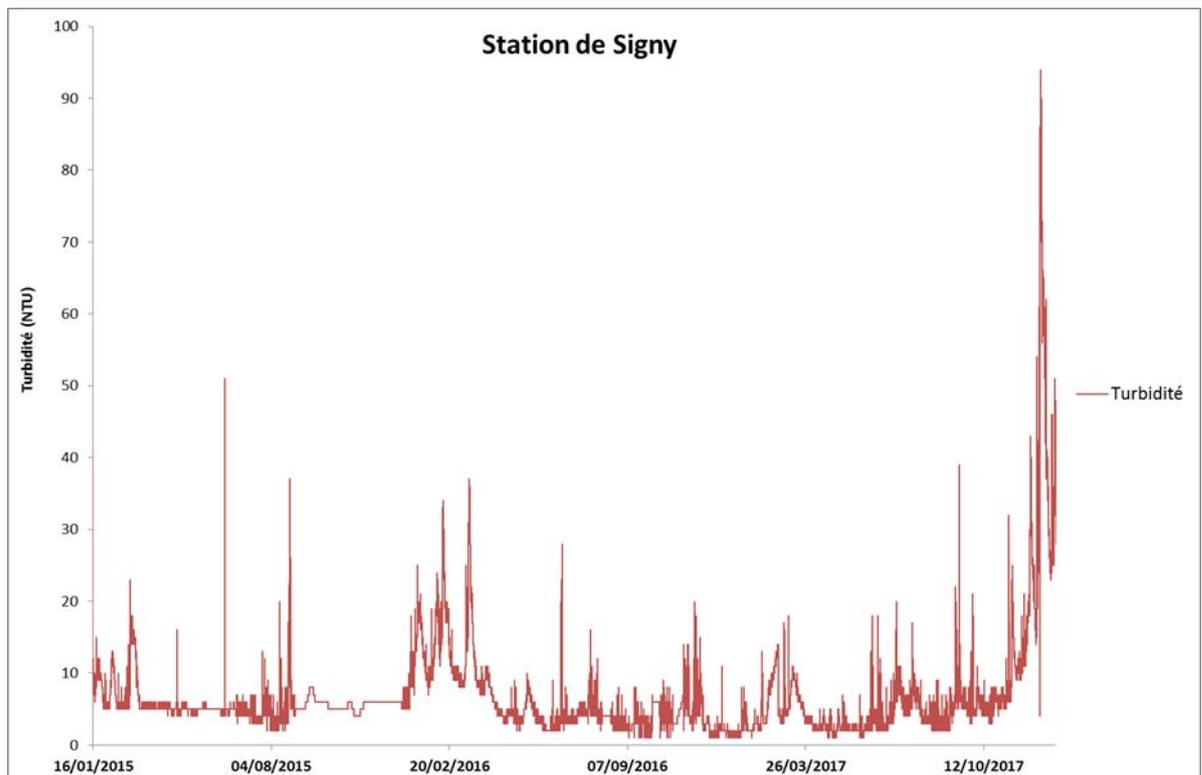
Annexe 2 : Turbidité à la station de la Dorière.



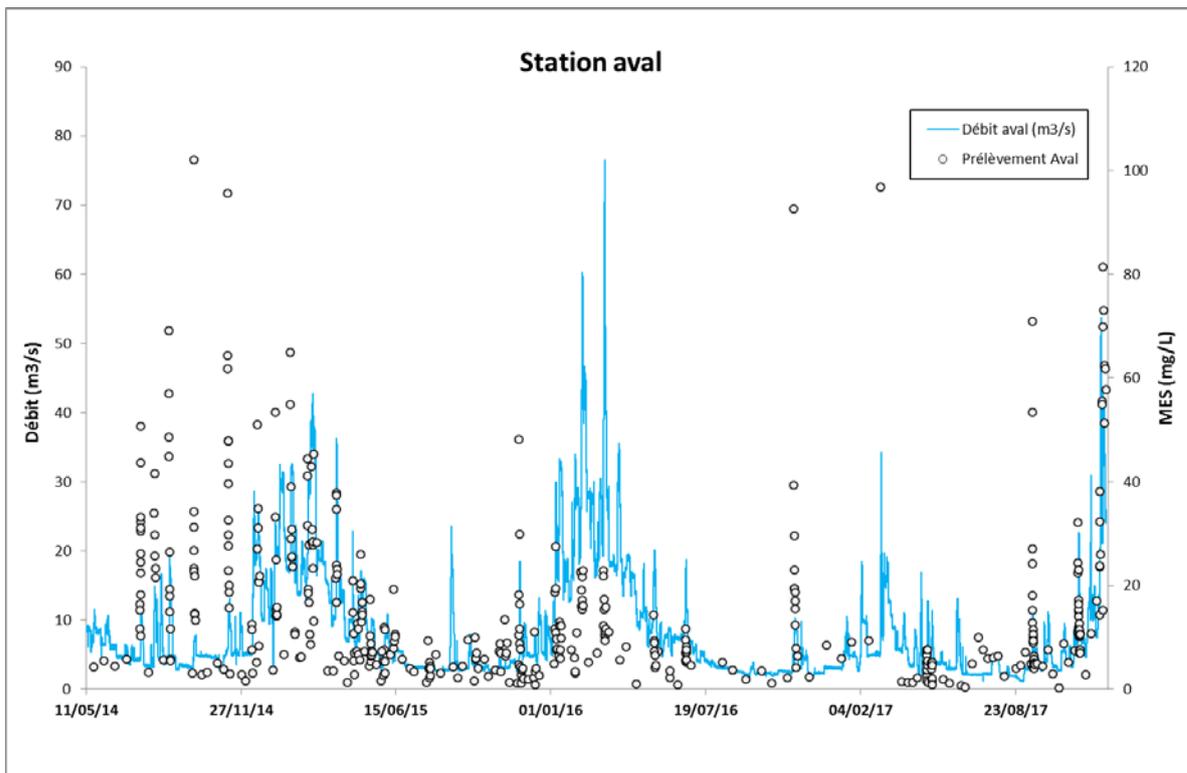
Annexe 3 : Turbidité à la station de la Roche-Qui-Boit.



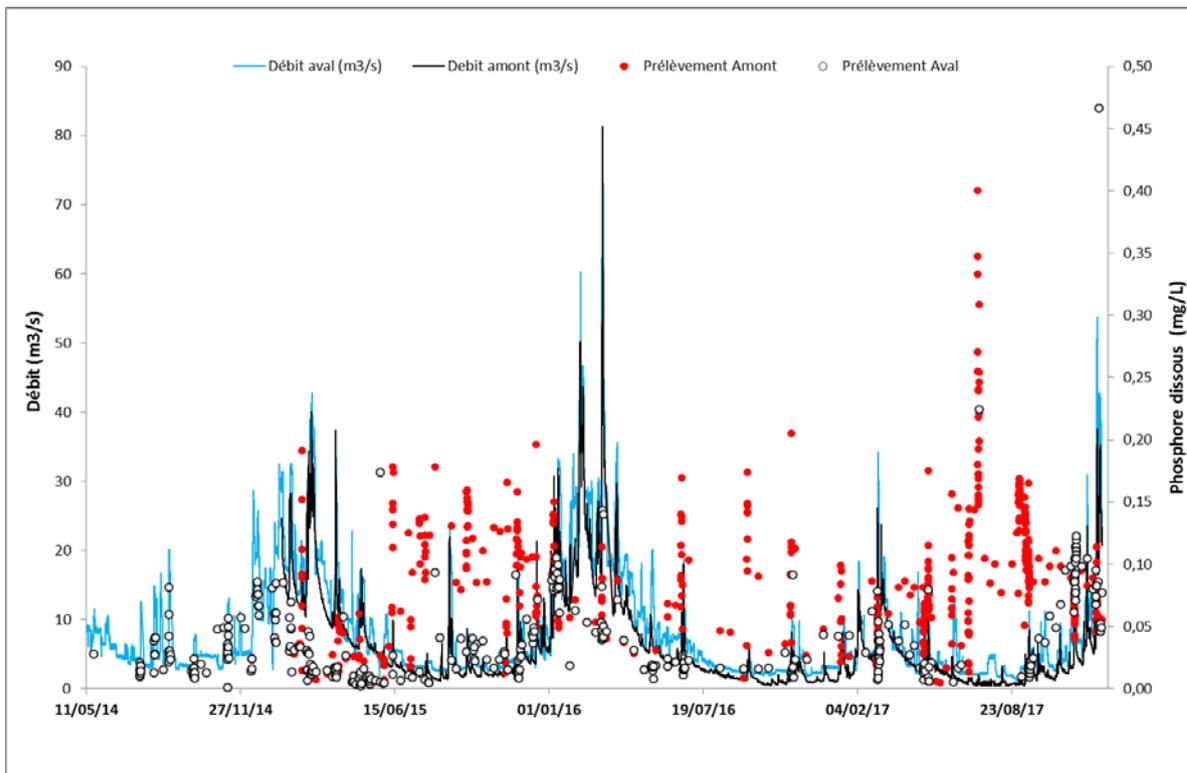
Annexe 4 : Turbidité à la station de Signy.



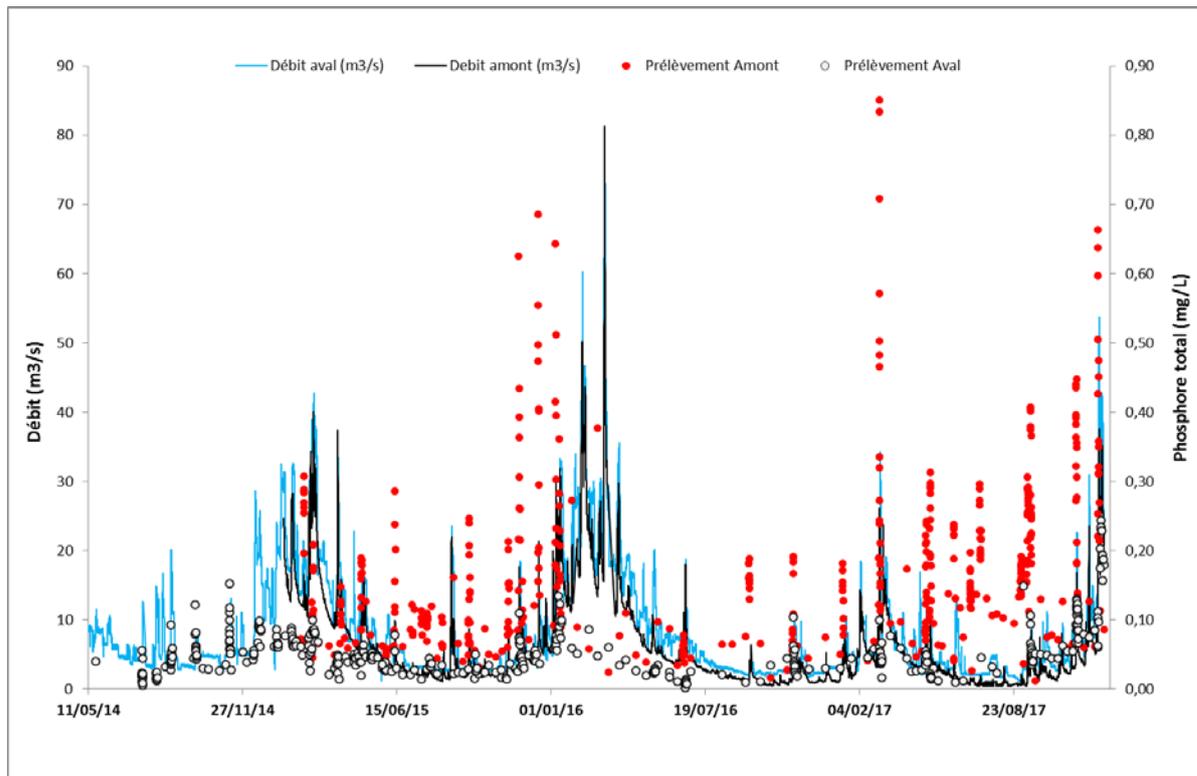
Annexe 5 : concentration de MES à la station aval.



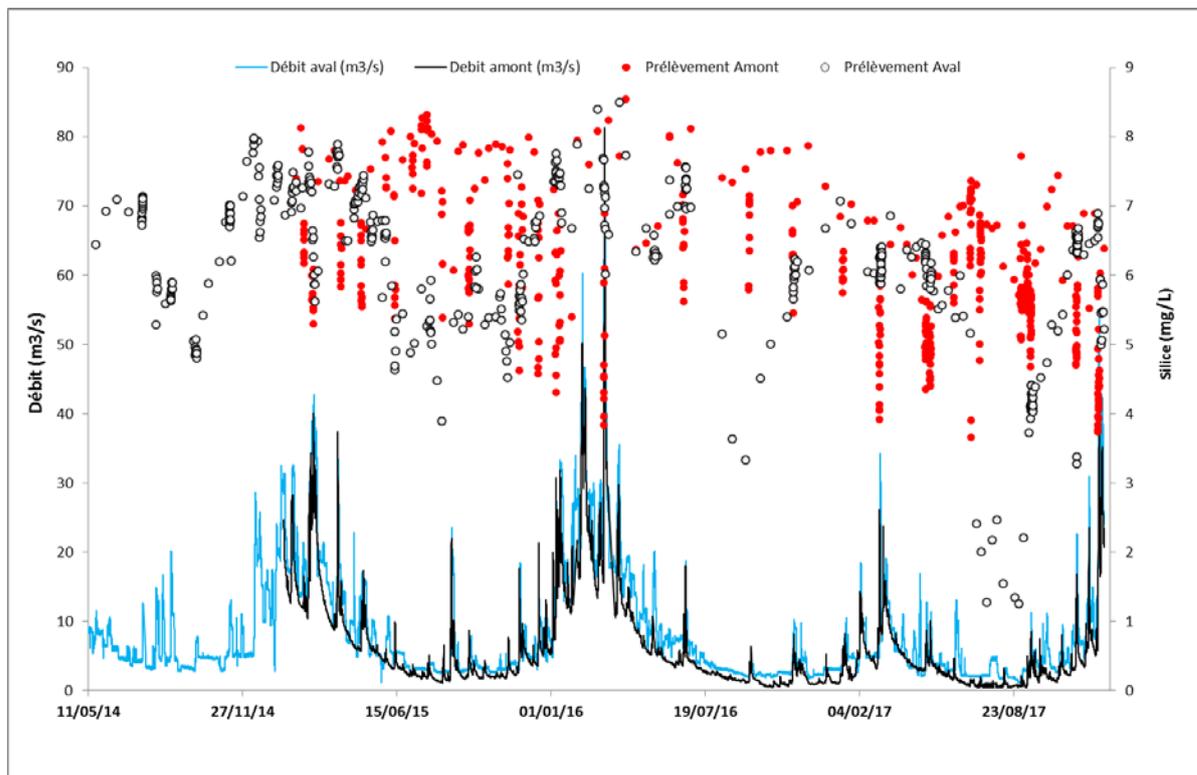
Annexe 6 : Concentration de phosphore dissous à l'amont et à l'aval.



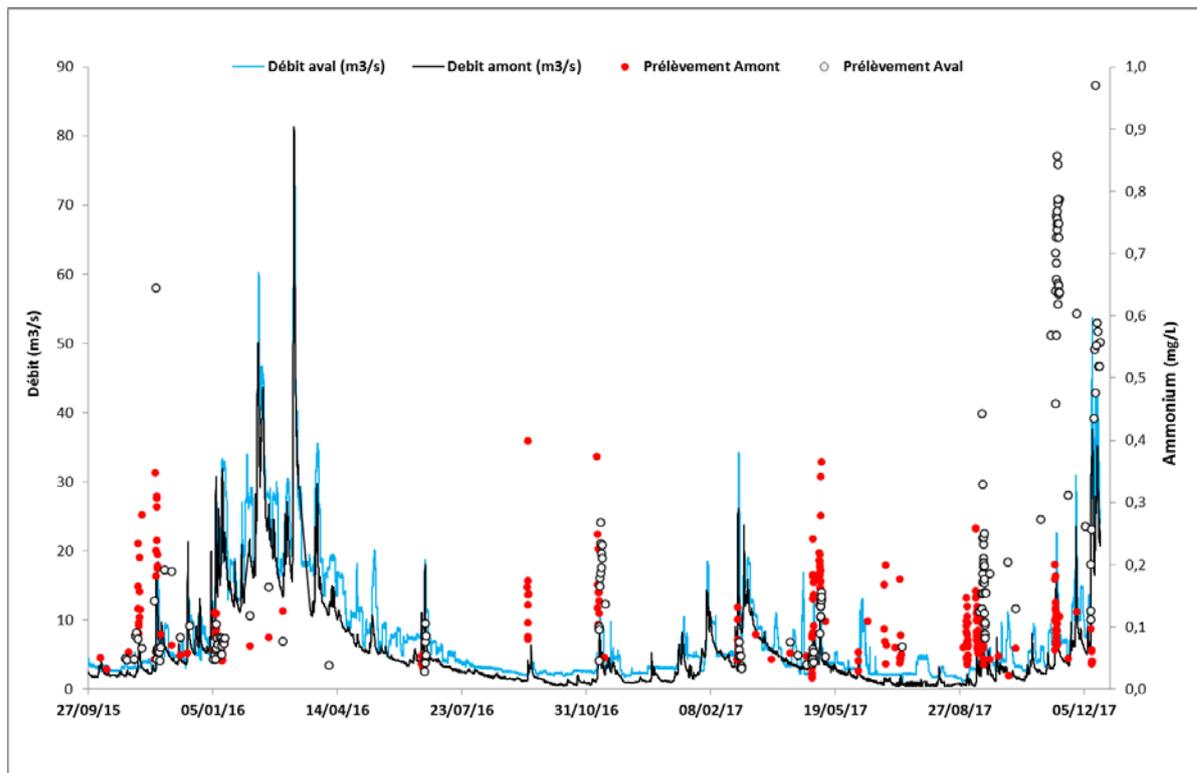
Annexe 7 : Concentration de phosphore total à l'amont et à l'aval.



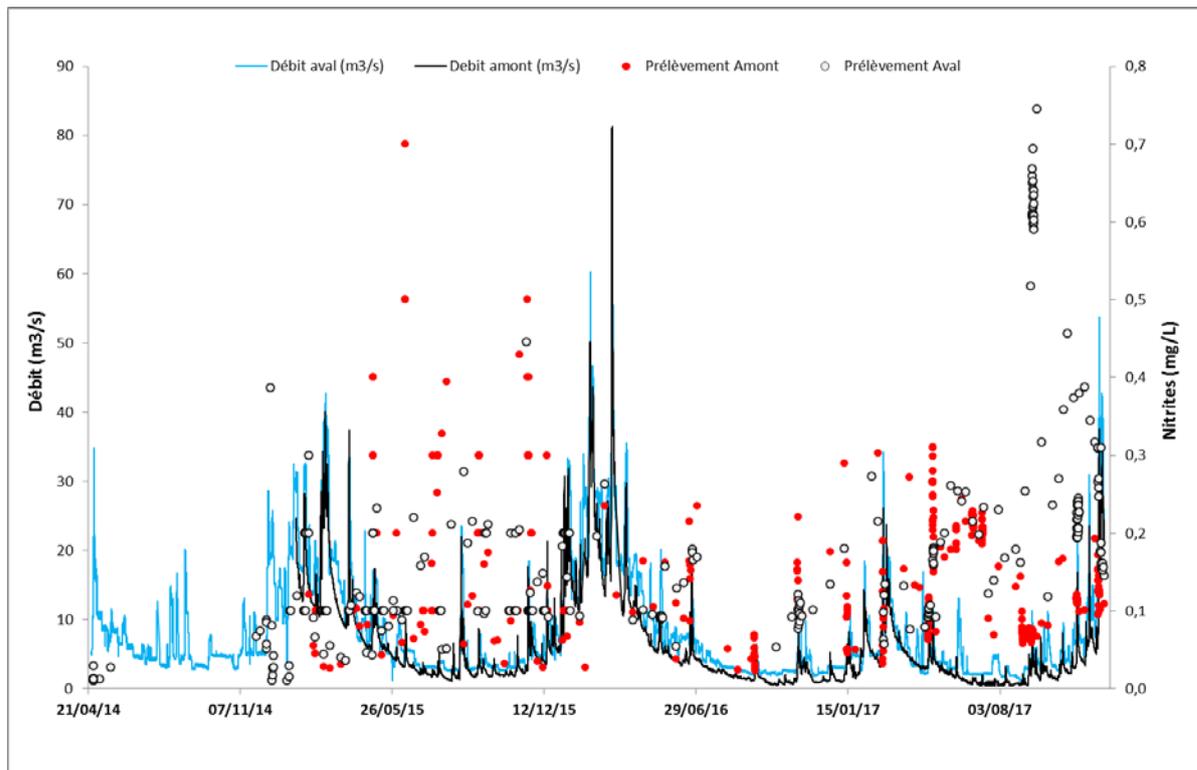
Annexe 8 : Concentration de silice à l'amont et à l'aval.



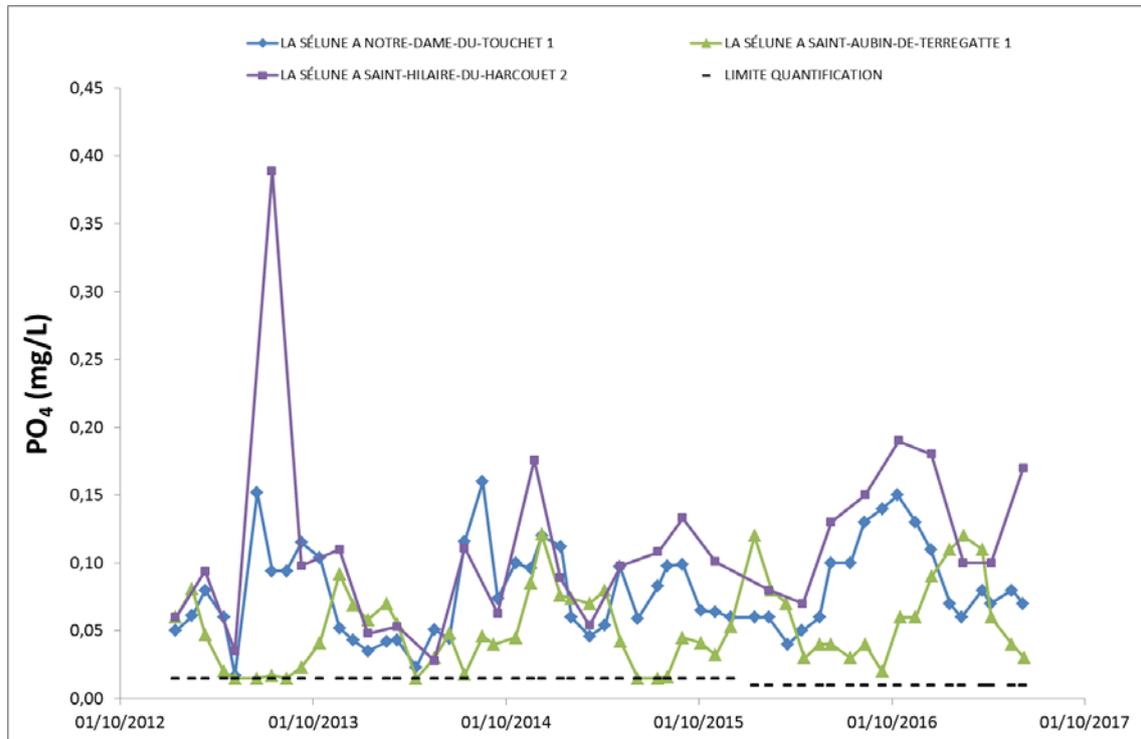
Annexe 9 : Concentration d'ammonium à l'amont et à l'aval.



Annexe 10 : Concentration de nitrites à l'amont et à l'aval.



Annexe 11: Stations de l'AESN en amont de la Sélune.



Bibliographie

Hébert, S. et Légaré S., 2000. Suivi de la qualité des rivières et petits cours d'eau, Québec, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ministère de l'Environnement, Envirodoq no ENV-2001-0141, rapport no QE-123, 48 p. et 3 annexes.

Birgand F., C. Faucheux, G. Gruau, B. Augeard, F. Moatar, and P.Bordenave. 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.

Vongvixay A., 2012. Mesure et analyse de la dynamique temporelle des flux solides dans les petits bassins versants. Thèse de doctorat, INSA de Rennes, 185 p.

Le Gonidec C., Grimaldi C., Crave A., 2013. Programme Sélune, phase pré-arasement, rapport d'étape annuel 2013, Thème dynamique fluviale, Volet flux hydrique, sédimentaires et chimiques -. 51p

Le Gonidec C., Grimaldi C., Fovet. O., 2015. Programme Sélune, phase pré-arasement, rapport d'étape annuel 2014, Thème dynamique fluviale, Volet flux hydrique, sédimentaires et chimiques-. 97p

Sherriff S.C., Rowan J.S., Mellan A.R., Jordan P., Fenton O. and O hUallachàin D. 2015. Investigating suspended sediment dynamics in contrasting agricultural catchments using ex situ turbidity-based suspended sediment monitoring. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19 (8). pp. 3349-3363. [Journal article]