



HAL
open science

Dynamique fluviale : Flux hydriques, sédimentaires et chimiques [Rapport bilan 2013-2015 - Programme Sélune Phase pré-arasement]

Claude Le Gonidec, Catherine Grimaldi, Ophélie Fovet, Virginie Vergnaud

► To cite this version:

Claude Le Gonidec, Catherine Grimaldi, Ophélie Fovet, Virginie Vergnaud. Dynamique fluviale : Flux hydriques, sédimentaires et chimiques [Rapport bilan 2013-2015 - Programme Sélune Phase pré-arasement]. [Rapport de recherche] Agence de l'Eau Seine Normandie (AESN). 2016, pp.46. hal-03403486

HAL Id: hal-03403486

<https://hal.science/hal-03403486>

Submitted on 26 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 2013-2015

Dynamique fluviale

Volet 1

Flux hydriques, sédimentaires et chimiques

Auteurs

Le Gonidec C.¹, Grimaldi C.¹, Fovet O.¹, Vergnaud V.²

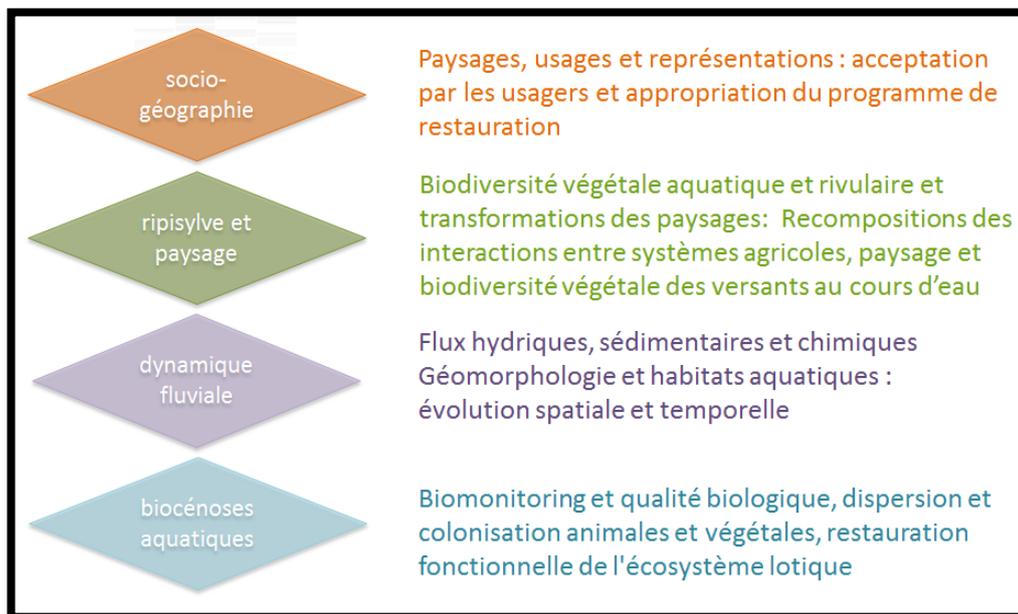
¹: UMR INRA-Agro campus Ouest, Sol Agro hydro système Spatialisation (SAS)

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

Février 2016

Introduction

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 :



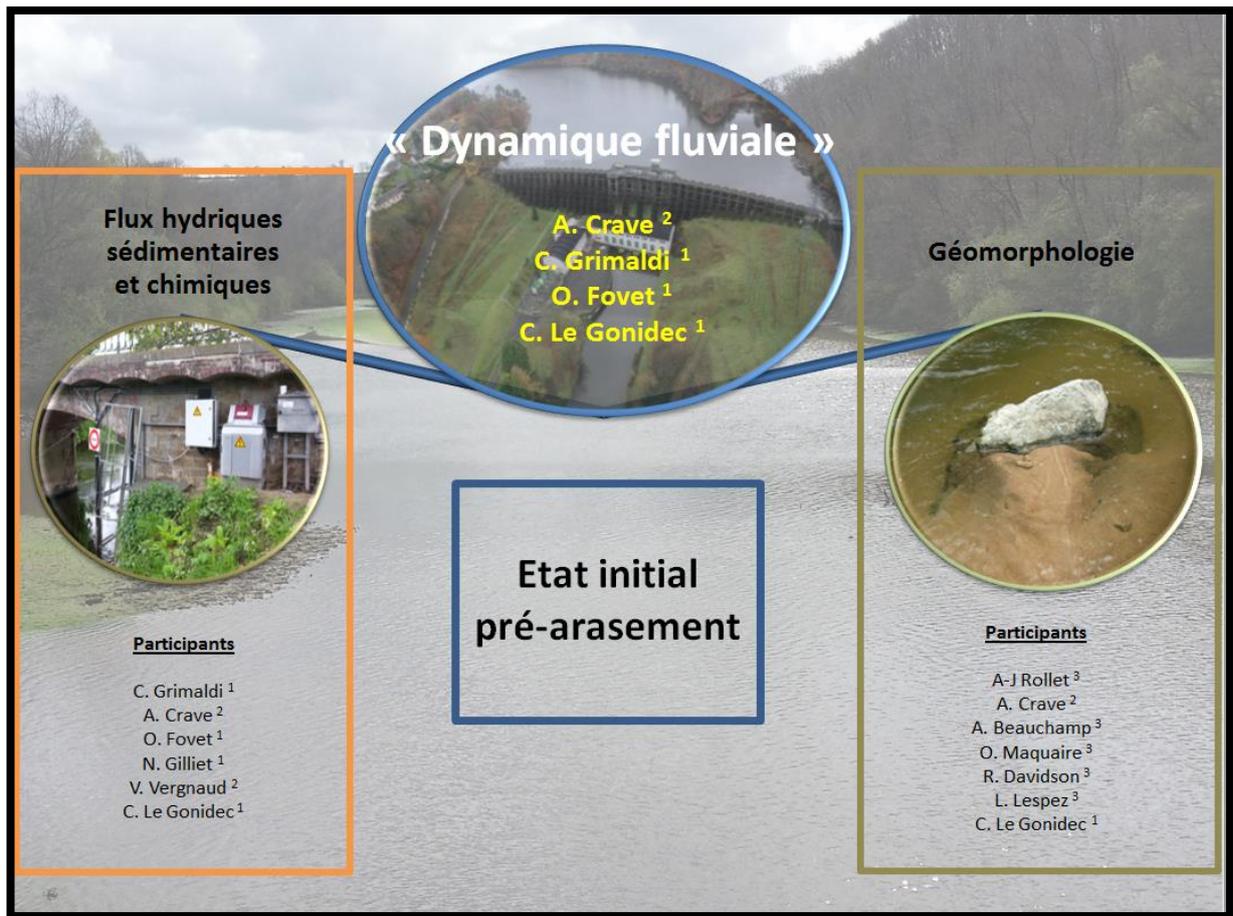
Le présent rapport concerne le thème Dynamique fluviale.

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 et événementielle voire 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.

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

Le volet 3 concernant la relation avec les habitats aquatiques n'a jusqu'à présent été développé que plus marginalement. Le bilan de l'état initial correspondant à la phase pré arasement concerne uniquement les volets 1 et 2. Plusieurs unités sont impliquées dans le suivi des flux hydriques sédimentaires et chimiques (volet 1) et la géomorphologie (volet 2), suivant les thématiques de recherche et les compétences des différents membres. La figure ci-dessous présente les volets 1 et 2 du thème Dynamique fluviale, les personnes et unités concernées.



Personnes impliquées dans le thème Dynamique fluviale pour les volets 1 et 2 de la phase pré arasement

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 Basse-Normandie, LETG-Caen-Géographie Physique et Environnement (GEOPHEN)

La première année du suivi pré-arasement (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 (Rapport d'étape 2014). L'année 2015 a permis de poursuivre les travaux engagés en intégrant de nouvelles études et en renforçant les campagnes débutées en 2013 et 2014.

Pour plus de lisibilité, nous avons choisi de réaliser deux rapports distincts, le premier sur le volet des Flux hydriques, sédimentaires et chimiques, le deuxième sur le volet Géomorphologie à deux échelles de temps (contemporaine et temps longs).

Le présent rapport correspond au bilan de l'état initial pré-arasement pour le volet Flux hydriques, sédimentaires et chimiques, divisé en deux chapitres. Le premier chapitre établit le bilan du suivi des flux hydriques, sédimentaires et chimiques sur les stations en amont et en aval des barrages. Le deuxième chapitre présente deux études préliminaires réalisées en 2015 et financées dans le thème Dynamique fluviale. La première étude s'intéresse à la contamination en métaux lourds des sédiments de l'Yvrande. La deuxième étude concerne les caractéristiques géochimiques des eaux souterraines sur le bassin versant de la Sélune.

SOMMAIRE

1 – ETUDE DES FLUX HYDRIQUES, SEDIMENTAIRES ET CHIMIQUES.....	7
1.1 - MATERIELS ET METHODES.....	7
1.1.1 - LOCALISATION DES STATIONS.....	7
1.1.2 - EQUIPEMENT DES STATIONS.....	8
1.1.3 - PARAMETRES MESURES.....	9
1.2 - RESULTATS	11
1.2.1 - FLUX HYDRIQUES.....	11
1.2.2 - FLUX SEDIMENTAIRES.....	13
1.2.2.1 - Les barrages agissent comme des décanteurs de sédiments	13
1.2.2.2 - Les barrages influencent la dynamique temporelle des particules lors des crues	15
1.2.2.3 - Quantification des flux de MES et de l'abattement dû à la présence des barrages	18
1.2.3 - FLUX CHIMIQUES.....	20
1.2.3.1 - Les barrages produisent un effet tampon sur les concentrations à l'aval	20
1.2.3.2 - Les barrages impactent certains flux chimiques via la production de phytoplancton	21
1.2.3.3 - Les barrages impactent peu les concentrations en azote dissous.....	27
1.3 CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	30
2 - ETUDES PRELIMINAIRES.....	32
2.1 – ETUDE PRELIMINAIRE AU SUIVI DE LA CONTAMINATION EN METAUX LOURDS DES SEDIMENTS DE L'YVRANDE (EXTRAITS DU MEMOIRE DE CLERC, 2015)	32
2.1.1 - CONTEXTE.....	32
2.1.2 - MATERIEL ET METHODES	33
2.1.3 - RESULTATS.....	35
2.1.4 - CONCLUSION ET PERSPECTIVES	38
2.2 - BILAN DES CARACTERISTIQUES HYDROCHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES SUR LE BASSIN VERSANT DE LA SELUNE A PROXIMITE DES BARRAGES (CAMPAGNE DE JUIN 2015).....	39
2.2.1 – CONTEXTE.....	39
2.2.2 - MATERIEL ET METHODES	39
2.2.3 - RESULTATS.....	41
2.2.4 - CONCLUSION.....	44
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	45
ANNEXE : DYNAMIQUE DU PHOSPHORE TOTAL ET DU SULFATE	46

Table des figures et liste des tableaux

Figure 1 : Localisation des stations de suivi multi paramètres sur la Sélune	7
Figure 2 : Photo de la station aval (station INRA)	8
Figure 3 : Photo de la sonde optique permettant de mesurer la chlorophylle a (source : Société Bionef)	8
Figure 4 : Station amont (EDF-INRA), à gauche : le préleveur installé par l'INRA,	9
Figure 5 : Préparation au laboratoire des échantillons d'eau prélevée en vue des différentes analyses	10
Figure 7 : Chroniques de débit et de turbidité journalière pour la station amont (en haut) et la station aval (en bas).	13
Figure 8 : Chronique de débit et des concentrations en MES pour la station amont (en haut) et la station aval (en bas).	14
Figure 9 : Box-plots de la turbidité (moyennes horaires des mesures en continu) à gauche et des concentrations de MES (prélèvements) à droite. Mesures réalisées à la station amont (Pont de Virey), aux stations à l'aval immédiat de chaque barrage et à la station aval (Pont de Signy).	15
Figure 10 : Zoom sur la période de crues hivernales, évolution de la turbidité et du débit	16
Figure 11 : Zoom sur une crue d'automne (Novembre, évolution de la turbidité et du débit (à gauche) et évolution des concentrations en MES à l'aval (à droite)	17
Figure 12 : Zoom sur une crue de printemps (Mars), évolution de la turbidité et du débit	17
Figure 13 : Relation entre la turbidité et la concentration en MES	18
Figure 14 : Relation entre le débit $\log(Q)$ et les concentrations en MES ($\log(Q_s)$)	19
Figure 15 : Evolution de la concentration de l'ion chlorure à l'amont et à l'aval des barrages	20
Figure 16 : Evolution des concentrations en chlorure à l'échelle d'une crue (novembre 2015) à l'amont et à l'aval des barrages	21
Figure 17 : Chroniques des concentrations en Carbone (en haut) et en Azote (en bas) particuliers	21
Figure 18 : Box plots des concentrations en Carbone (à gauche) et en Azote (à droite) à l'amont et à l'aval des barrages	22
Figure 19 : Rapport C/N de MES à l'amont et à l'aval des barrages	22
Figure 20 : Dynamique du phytoplancton révélée par la mesure de la chlorophylle a en mg/l (retenue de Vezins), Pannard et al, 2015	22
Figure 21 : Chronique des concentrations en Phosphore dissous (en haut)	23
Figure 22 : Box plot des concentrations en phosphore dissous (à gauche) et en Silice (à droite) à l'amont et à l'aval des barrages et à deux périodes différentes (Hiver/Printemps et Été/Automne)	24
Figure 23 : Evolution des concentrations en chlorophylle a au cours de l'année à l'amont, dans les retenues à différentes profondeurs et à l'aval. Données A. Pannard.	25
Figure 24 : Evolution des concentrations en PO_4 à différentes périodes de l'année (en haut : mois d'hiver ; en bas : période estivale), à l'amont, dans les retenues à différentes profondeur, et à l'aval. Données A. Pannard.	26
Figure 25 : Chronique des concentration en nitrate à l'amont et à l'aval des barrages	27
Figure 26 : Evolution des concentrations en nitrate à l'échelle d'une crue (janvier 2016) à l'amont et à l'aval des barrages	27
Figure 27 : Concentrations en nitrate à l'amont des barrages (prélèvements hors crue) et à l'aval	28
Figure 28 : Evolution des concentrations en nitrite (en haut) et en ammonium (en bas) à l'amont et à l'aval des barrages	28
Figure 29 : Carte de localisation de la Station d'épuration de Saint-Hilaire par rapport à la station de mesure amont	29
Figure 30 : Localisation des prélèvements le long de l'Yvrande	33
Figure 31 : Localisation des prélèvements dans le cône de l'Yvrande	34
Figure 32 : Evolution des concentrations en chrome (à gauche) et en arsenic (à droite) des échantillons analysés en fonction de la distance à la source de l'Yvrande	36
Figure 33 : Evolution des concentrations de Cr et As en fonction de la taille	36
Figure 34 : Box plots des concentrations en Cr des sédiments	37
Figure 35 : Schéma de l'échantillonneur passif	38
Figure 36 : Localisation des points prélevés	40
Figure 37 : Diagramme de Piper des eaux échantillonnées	41
Figure 38 : Carte des concentrations en nitrate (Juin 2015)	42
Figure 39 : Concentrations en chlorure et en sulfate (mg/L) en fonction du nitrate (mg/L)	42
<hr/>	
Tableau 1 : Comparaison des concentrations en métaux des sédiments avec le fond géochimique (IDRA, 2011)	35
Tableau 2 : Matrice des corrélations des concentrations des différents métaux.	35
Tableau 3: Points prélevés et caractéristiques de terrain	39
Tableau 4: Eléments analysés sur les échantillons prélevés	40

1 - Etude des flux hydriques, sédimentaires et chimiques

Le bilan des trois années, résumé dans ce présent rapport, comprend la mise en place des dispositifs de suivi des flux destinés à être opérationnels sur le long terme, et deux 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 2015 sont 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.

1.1 - Matériels et méthodes

1.1.1 - Localisation des stations

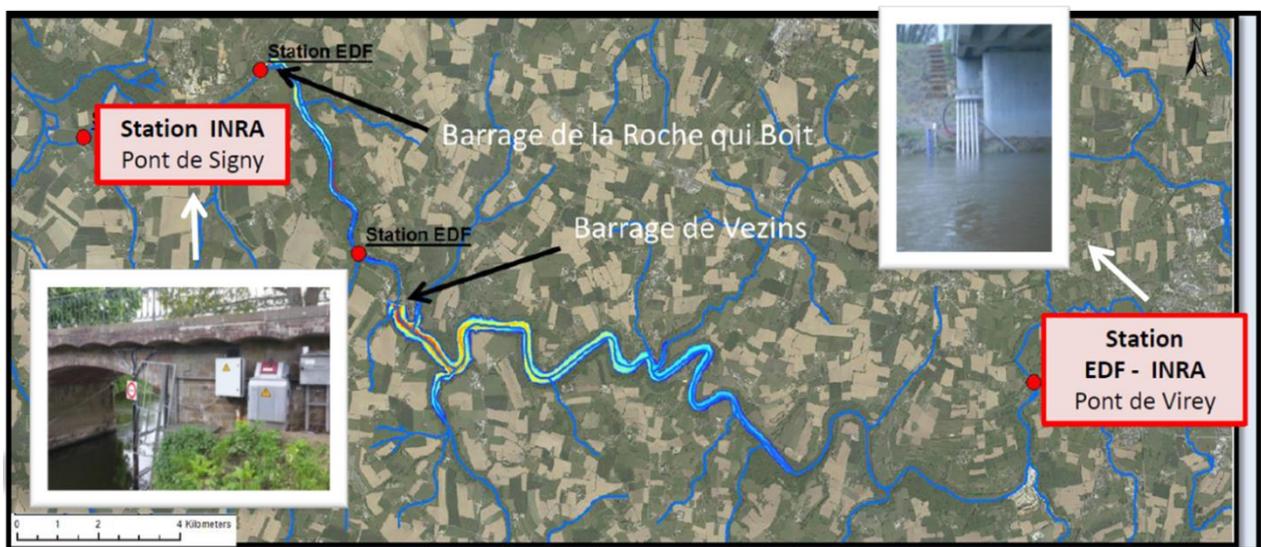


Figure 1 : Localisation des stations de suivi multi paramètres sur la Sélune

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 entrant à l'amont des barrages.
- ✓ EDF a installé deux stations de mesure à l'aval immédiat de chaque barrage.
- ✓ 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 existe déjà à cet endroit (code I9221020 : La Sélune à Saint Aubin de Terregatte). Le débit 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.

1.1.2 - Equipement des stations

✓ Station INRA (pont de Signy)



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

à distance existe, via le raccordement à une Box internet et la création d'une ligne téléphonique.

D'autre part, au vu de l'importance des communautés phytoplanctoniques sur l'évolution des concentrations en nutriments (cf. § 1.2.3.2) et après concertation avec les scientifiques du volet Biocénoses aquatiques, nous avons procédé à l'achat d'une sonde optique permettant de mesurer en continu la chlorophylle a. La chlorophylle a est le pigment présent chez tous les végétaux qui permet de capter la lumière nécessaire à la photosynthèse. La concentration en chlorophylle a témoigne de la quantité de phytoplancton dans l'eau. La mesure est basée sur la fluorescence naturelle des cellules algales.

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. Une centrale d'acquisition et un modem GSM permettent le stockage et le rapatriement des données à distance piloté depuis le laboratoire.

Suite aux tests concluants de la structure porteuse, (cf. installation du support pour l'UB Flow (rapport 2014)) le vélocimètre UB Flow (Cf. Rapport Volet 2 : Géomorphologie) est maintenant présent à poste fixe depuis décembre 2015. Un système de paramétrage et de récupération des données



Figure 3 : Photo de la sonde optique permettant de mesurer la chlorophylle a (source : Société Bionef)

Cette sonde nous permettra de quantifier le microphytoplancton total, en différenciant les cyanobactéries, pour mieux comprendre les dynamiques temporelles des concentrations en nutriments mesurées. La sonde a été livrée en début d'année 2016 et sera installée avant le printemps pour des mesures en continu au pont de Signy.

✓ Stations EDF et EDF-INRA

Les deux stations EDF à l'aval immédiat des deux barrages et la station EDF-INRA à l'amont, ont été financées et équipées par EDF d'un turbidimètre, d'une sonde de conductivité, d'un capteur de niveau d'eau, d'une sonde d'oxygène dissous et d'une sonde pH.

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.



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

1.1.3 - Paramètres mesurés

✓ Mesures en continu

En aval des barrages (station INRA) les paramètres physico-chimiques mesurés sont la turbidité (devant permettre la quantification des flux sédimentaires), le niveau d'eau et la conductivité. 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. La chlorophylle a sera mesurée en continu à partir du printemps 2016 (cf. § 1.1.2) Le pas de temps d'acquisition pour l'ensemble de ces paramètres est de 6 minutes. Les données sont stockées dans une centrale d'acquisition et rapatriées automatiquement au laboratoire par un modem GSM.

Pour les stations EDF et EDF-INRA, les paramètres physico-chimiques mesurés sont la turbidité, le niveau d'eau, la conductivité, le pH et l'oxygène dissous. Le débit est calculé pour la station EDF-INRA (pont de Virey) et pour la station EDF à l'aval immédiat de la Roche qui Boit grâce aux jaugeages réalisés par EDF.

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.

La pluviométrie journalière est enregistrée par Météo-France à la Station de Saint Hilaire du Harcouët (code 50484002) située à environ 10 km à l'Est du barrage de Vezins.

✓ Echantillonnages ponctuels

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 la station INRA et sur la station INRA-EDF. Une grande partie de ces prélèvements correspondent à des périodes d'écoulement de base (hors crue).

Généralement, la majorité des flux hydriques, sédimentaires et chimiques transitent lors des crues. 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 hors crue. Il prélève alors 24 échantillons avec un pas de temps fixe au cours de la crue et défini par l'utilisateur. Sur les 24 échantillons, entre 8 et 10 échantillons couvrant l'ensemble des variations de débit au cours de la crue sont conservés.

Au total, sur chaque station, entre 3 et 4 échantillons manuels sont donc systématiquement prélevés tous les mois, et entre 8 et 10 échantillons par crue pour une moyenne de 2 crues par mois. On obtient donc environ 500 échantillons analysés au cours d'une année (250 échantillons par station).

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 (Fig.5), sur la phase dissoute (PO_4 , NO_3 , NO_2 , NH_4 , Cl , SO_4 , Si) et la phase particulaire (MES, C, N, P). La concentration en NH_4 est mesurée seulement depuis fin septembre 2015 en amont et en aval des barrages.

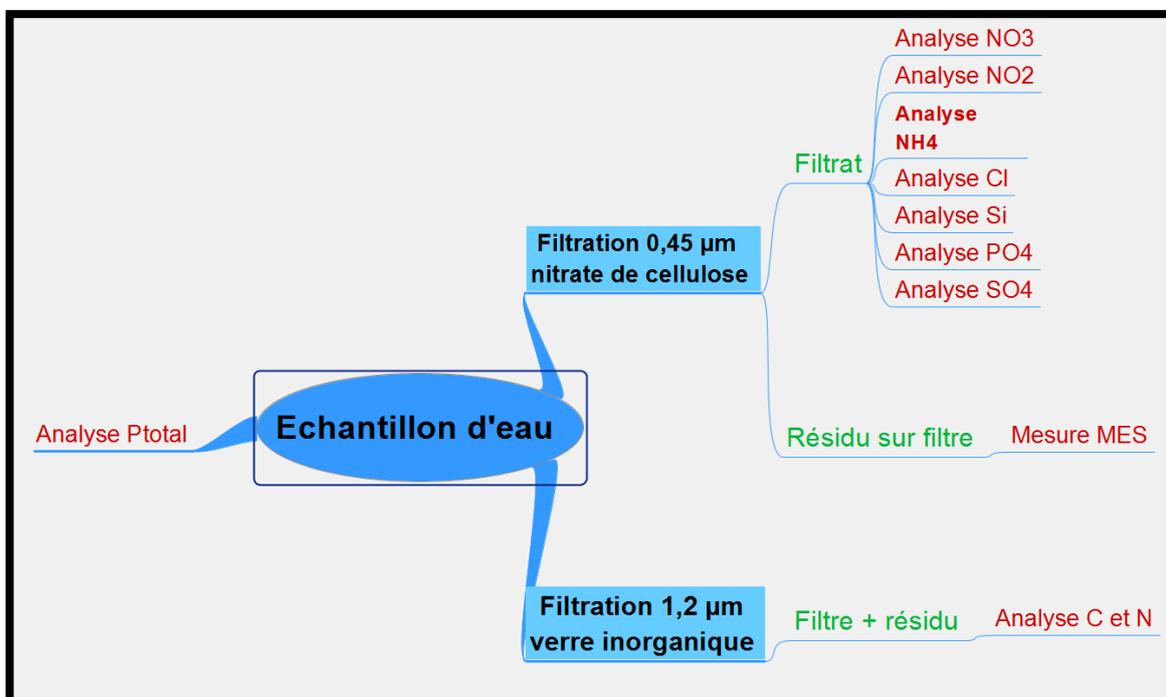


Figure 5 : Préparation au laboratoire des échantillons d'eau prélevée en vue des différentes analyses

1.2 - Résultats

Nous présentons ici les résultats sur les flux et les concentrations concernant l'état initial et dont le suivi a débuté en avril 2014 pour la station aval (pont de Signy) et en janvier 2015 pour la station amont (pont de Virey).

1.2.1 - Flux hydriques

Les résultats présentés ici concernent essentiellement l'année pour laquelle nous avons des données sur les deux stations, à savoir du 19 janvier 2015 au 19 janvier 2016. Les résultats acquis avant le 19 janvier 2015 au Pont de Signy ont été présentés dans les rapports d'étape précédents. Pour le contexte hydrologique général du bassin de la Sélune, se référer au rapport d'étape 2014 résumant les données mesurées au pont de Signy par la DREAL depuis 1990.

➤ Chronique des débits et des précipitations, et quantification des flux hydriques

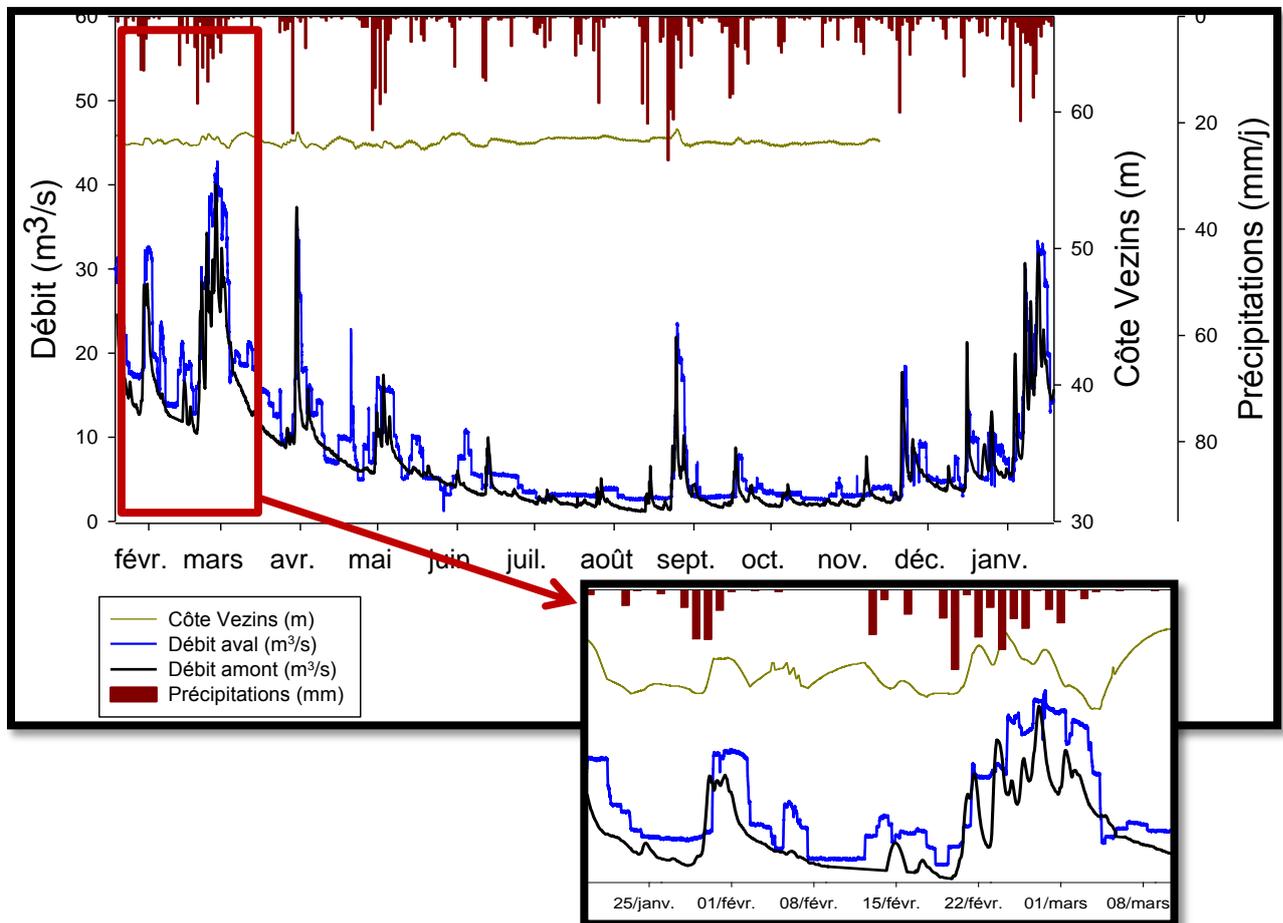


Figure 6 : Chronique des précipitations journalière à la station météo France de Saint-Hilaire du Harcouët (mm/jour), de la côte de Vezins (en mètres) et des débits à l'amont et à l'aval des barrages (m³/s)

L'année 2015 étudiée est plutôt sèche : La quantité de précipitations est de 826 mm tandis que depuis 1968 sur la station météo de Saint Hilaire, la médiane est de 901 mm avec un minimum de 634 mm en 1990 et un maximum de 1257 mm en 1994 (données Météo France).

➤ Chronique des débits à l'amont des barrages

A l'amont des barrages, le flux hydrique annuel spécifique est de $367 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{km}^2$. Une quinzaine de crues significatives¹ ont été enregistrées, avec un débit maximum instantané de $40,1 \text{ m}^3/\text{s}$ (le 27/02/2015) et un débit maximum journalier de $34,8 \text{ m}^3/\text{s}$ (le 27/02/2015). Le débit journalier minimum de $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ est enregistré le 10/08/2015.

➤ Chronique des débits à l'aval des barrages

A l'aval des barrages, l'évolution du débit ne présente pas une dynamique tout à fait classique (Fig.6). Certains événements de pluie ne s'accompagnent pas d'une augmentation de débit et inversement on peut observer une augmentation de débit sans épisode pluvieux et sans augmentation de débit à l'amont (Fig.6 : zoom). Lors des crues, les débits de pointe sont légèrement écrêtés et la décrue se fait par paliers. La gestion hydraulique des barrages a donc un impact sur le débit à l'aval, en interceptant à certaines périodes une partie des flux hydriques pour le remplissage des réservoirs et en amortissant les pics de débits. Cet amortissement ne se produit cependant que pour des crues d'intensité modérée, la gestion des barrages veillant à ce qu'ils soient « transparents » pour les fortes crues pour des questions de sécurité liées à la résistance des ouvrages.

Sur l'année de notre suivi (19/01/2015 au 19/01/2016), le flux hydrique spécifique total est de $373 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{km}^2$. Une quinzaine de crues significatives ont été enregistrées, avec un débit maximum instantané de $42,8 \text{ m}^3/\text{s}$ (le 27/02/2015) et un débit maximum journalier de $40,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (le 27/02/2015). Ce débit maximum journalier correspond à une fréquence d'occurrence comprise entre 1 et 2 % du temps (données d'occurrence des crues calculées par la DREAL Basse Normandie au pont de Signy). Le débit journalier minimum de $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$ est enregistré le 03/07/2015.

Le flux hydrique spécifique annuel est de $367 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{km}^2$ à la station amont et de $373 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{km}^2$ à la station aval. Ces flux sont assez similaires et comparables au flux hydrique spécifique moyen annuel de $379 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{km}^2$ calculé à partir des données de la Banque Hydro (1990-2014) sur la station aval. On notera que 40 % du flux d'eau annuel passe au cours du premier trimestre de notre suivi (du 19/01/2015 au 19/03/2015) pour les deux stations.

¹ Il est important de noter que dans ce rapport, le mot CRUE est employé au sens hydrologique du terme. Une CRUE, est une augmentation plus ou moins importante du débit (et par conséquent de la hauteur d'un cours d'eau) suite à des précipitations. Il ne renvoie donc pas forcément à un phénomène de forte intensité pouvant entraîner des inondations.

1.2.2 - Flux sédimentaires

Les flux sédimentaires 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 essentiellement liée aux concentrations de MES présentes, mais cette relation dépend fortement de la taille granulométrique des particules. En effet la sonde du turbidimètre est plus sensible aux concentrations des particules fines, alors que les concentrations des MES sont en revanche surtout liées à la masse des particules grossières.

Comme pour les flux hydriques, les résultats présentés ici concernent essentiellement l'année pour laquelle nous avons des données sur les deux stations, à savoir du 19 janvier 2015 au 19 janvier 2016. Les résultats acquis avant le 19 janvier 2015 au Pont de Signy ont été présentés dans les rapports d'étape précédents.

1.2.2.1 - Les barrages agissent comme des décanteurs de sédiments

➤ Chroniques de turbidité

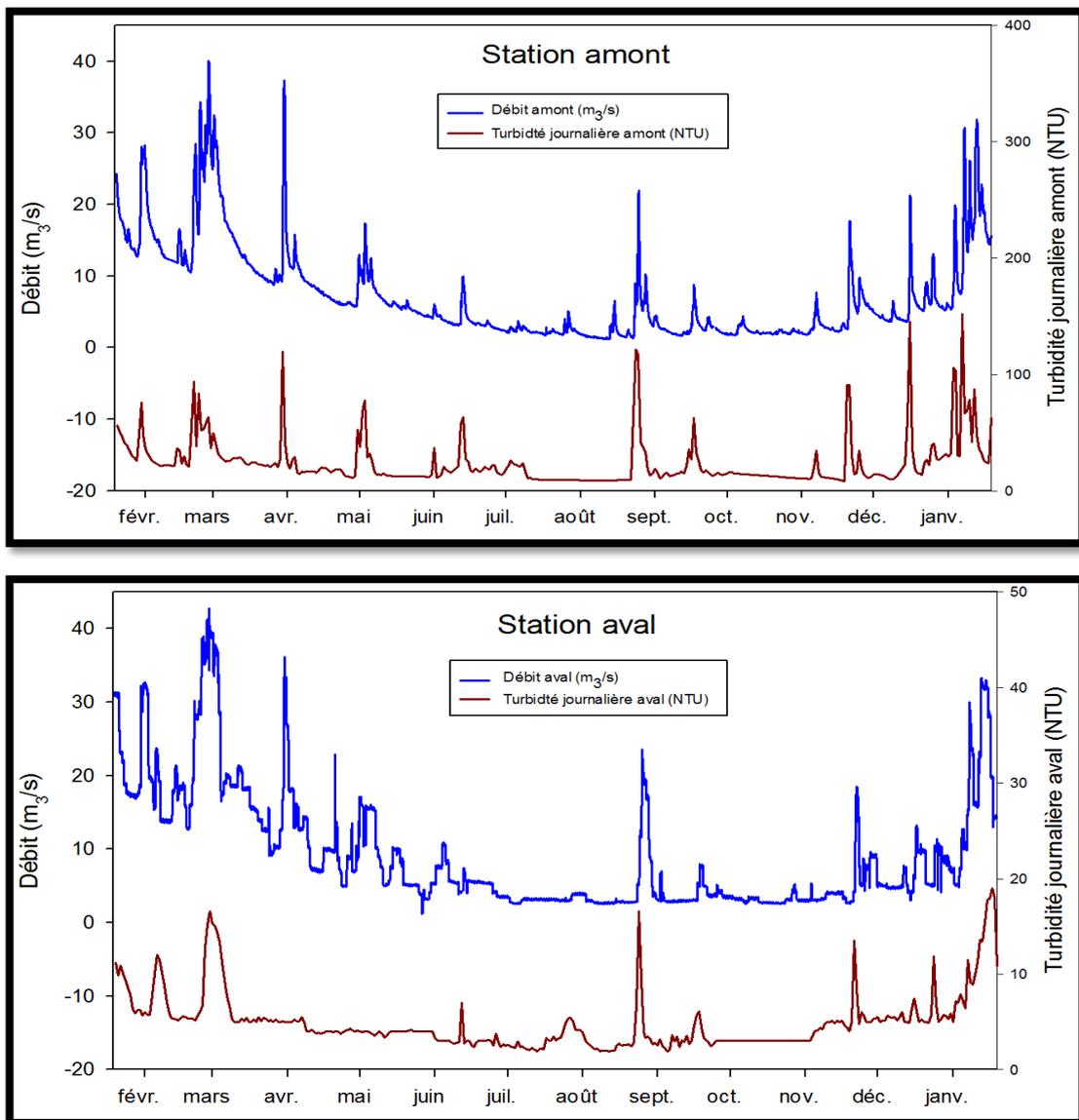


Figure 7 : Chroniques de débit et de turbidité journalière pour la station amont (en haut) et la station aval (en bas).
NB : les échelles de la turbidité sont différentes pour les deux stations.

Remarque : au printemps 2014 le développement important de renouces dans la Sélune a affecté la mesure de turbidité à la station de Signy (rapport d'étape 2014) ne permettant pas une analyse de l'ensemble de la chronique. Pour des raisons indéterminées ce développement ne s'est pas produit en 2015. Par contre à l'été 2015 les sondes de turbidité pour les stations suivies par EDF ont fourni des données non exploitables à cause de développement de biofilms encrassant les sondes optiques.

➤ Chroniques des concentrations en MES

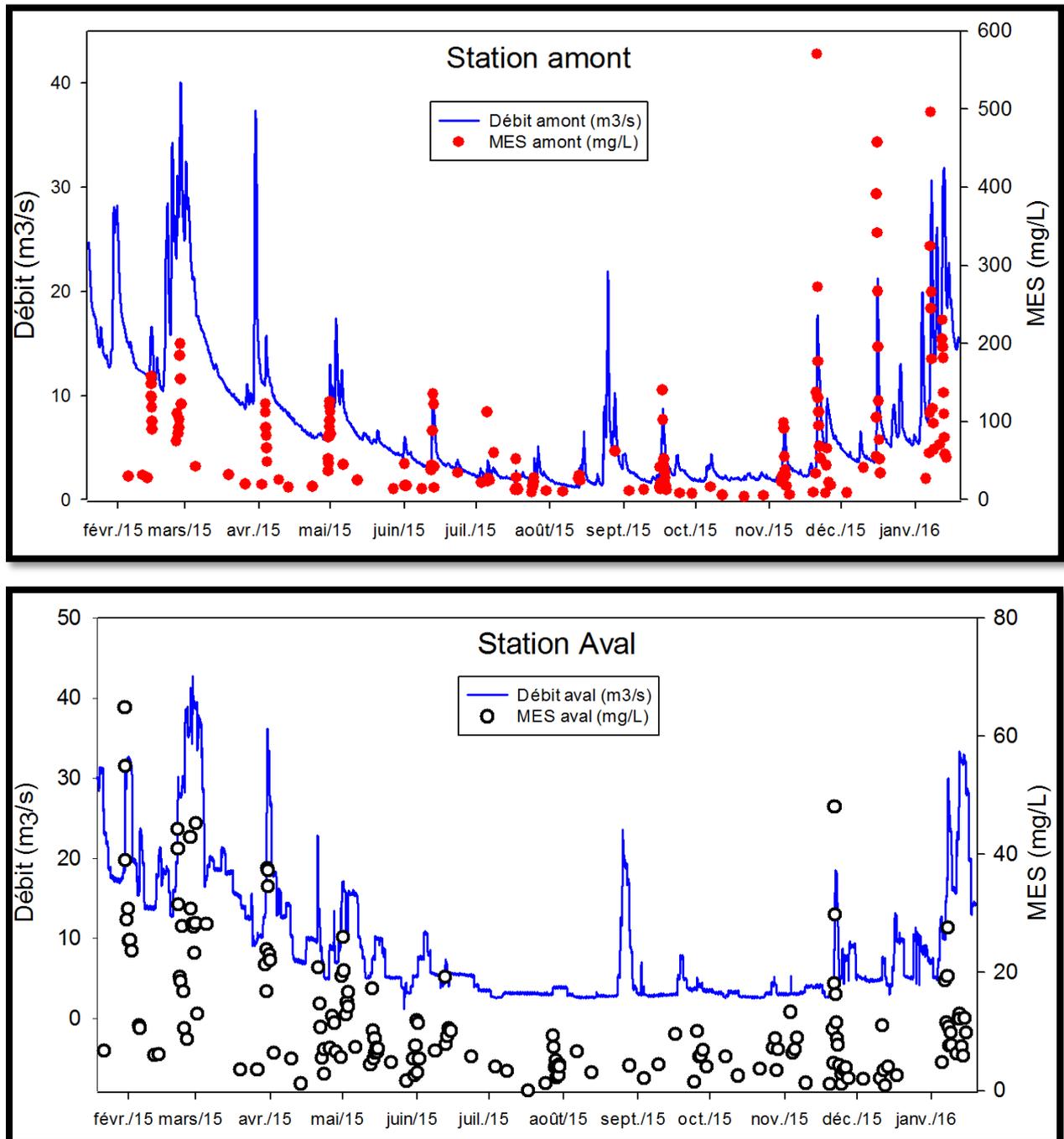


Figure 8 : Chronique de débit et des concentrations en MES pour la station amont (en haut) et la station aval (en bas).
NB : Les échelles des concentrations en MES sont différentes pour les deux stations.

A l'amont des barrages, la turbidité comme les concentrations de MES varient plus largement et dans des gammes de valeurs bien plus élevées qu'à l'aval (Fig.7 et 8). Les barrages sont donc bien, comme attendu, des décanteurs de sédiments stockés dans les réservoirs. Les suivis de turbidité aux stations intermédiaires montrent que ce stockage se produit dans le réservoir le plus à l'amont, celui de Vézins (Fig.9).

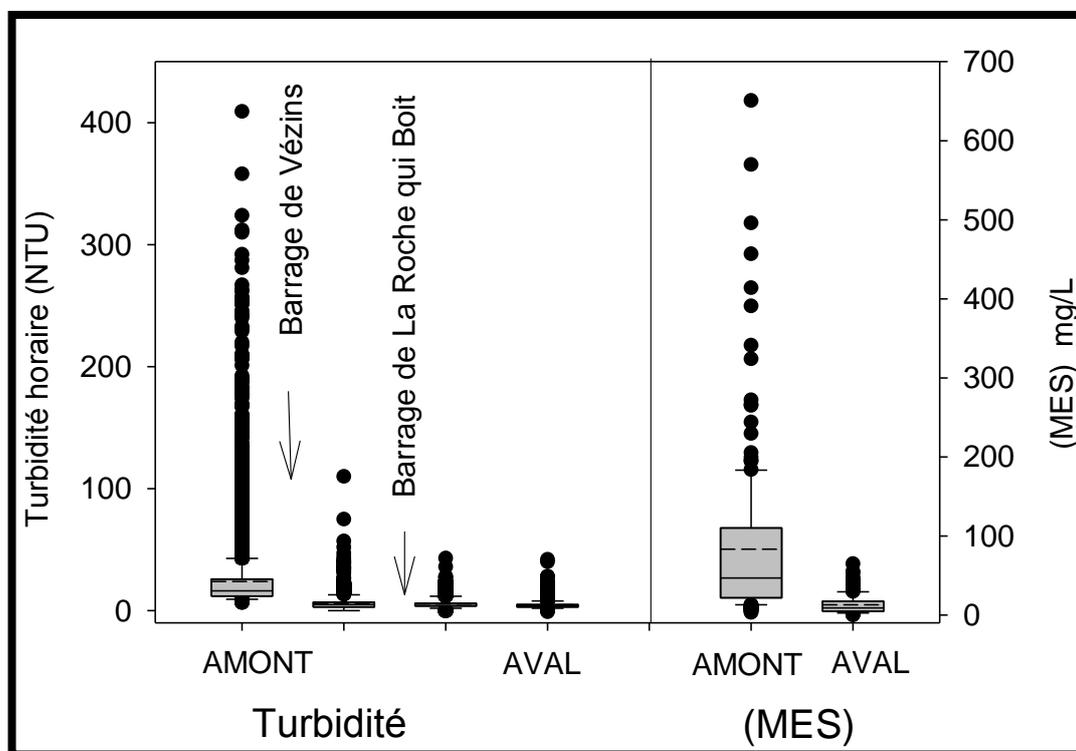


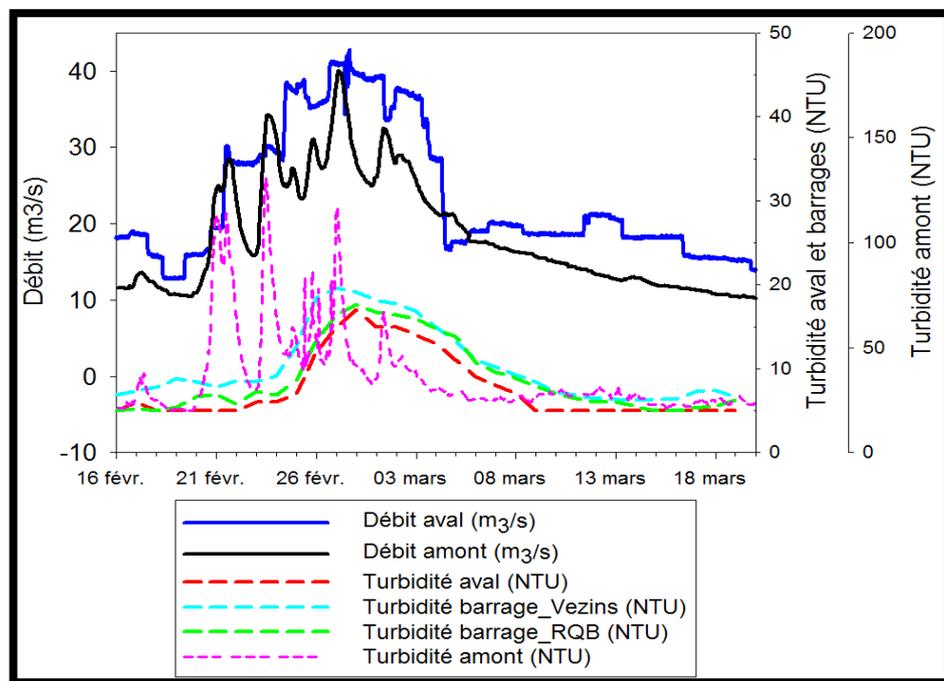
Figure 9 : Box-plots de la turbidité (moyennes horaires des mesures en continu) à gauche et des concentrations de MES (prélèvements) à droite. Mesures réalisées à la station amont (Pont de Virey), aux stations à l'aval immédiat de chaque barrage et à la station aval (Pont de Signy).

A l'amont des barrages, la turbidité instantanée varie entre 6 et 410 NTU, alors qu'elle est comprise entre 0 et 42 NTU à la station aval. A l'amont, les concentrations de MES sont assez élevées, en moyenne 18 mg/L hors crue, elles augmentent fortement lors des crues (moyenne de 100 mg/L, maximum de 651 mg/L le 16 décembre 2015). A la station aval, les concentrations observées sont extrêmement faibles, en particulier hors crue (quelques mg/L, en moyenne 4 mg/L), elles augmentent faiblement lors des crues (moyenne de 16 mg/L, maximum de 64 mg/L le 30 janvier 2015).

1.2.2.2 - Les barrages influencent la dynamique temporelle des particules lors des crues

A l'amont des barrages, les variations de turbidité comme des concentrations en MES sont liées de manière classique aux variations du débit (Fig.7 et 8). Lors des crues l'augmentation du débit entraîne l'augmentation du transfert de MES. En revanche, pour les stations aval, il n'y a pas de relation évidente entre le débit et les paramètres caractérisant les flux sédimentaires (Fig.7 et 8). Lorsque le débit augmente, les concentrations de MES restent faibles, d'autant que ce paramètre quantifie surtout la présence des particules les plus grossières dont le transfert amont-aval est le plus affecté par la présence des barrages. Quelques informations peuvent être apportées par l'analyse de la chronique de turbidité, paramètre plus sensible aux particules fines. En particulier, à l'aval des barrages, la réponse de la turbidité aux augmentations de débit varie au cours de l'année. Trois types de réponses, selon les saisons, peuvent être distinguées correspondant vraisemblablement à des origines différentes de MES :

1. En hiver (décembre, janvier, février), période de fort débit de base avec des crues successives assez fréquentes, on observe aux trois stations à l'aval des barrages une augmentation progressive de la turbidité plusieurs jours après les augmentations de débit (Fig.10). Le signal de turbidité aval est aussi de plus faible amplitude, amorti et décalé dans le temps par rapport au signal à l'amont des barrages. Il semble donc que le flux de MES arrivant à l'amont soit transféré en partie (vraisemblablement les particules les plus fines) vers l'aval avec un temps de retard dû au mélange dans le volume de la retenue. Entre les stations en amont et en aval du barrage de Vézins, le délai est de plusieurs jours, alors qu'il est beaucoup plus faible entre l'aval du barrage de Vézins et l'aval du barrage de La Roche qui Boit. Ceci s'explique sans doute par des différences, entre les deux barrages, de niveau de la prise d'eau par rapport au fond du barrage (vannes d'évacuation à 6 et 3 m sous la surface de l'eau, respectivement à Vézins et à La Roche qui Boit) et de volume d'eau dans les retenues (capacité de 19 et 1,5 millions de m³, respectivement).



2. En été et en automne, les rares crues isolées entraînent à la station aval du pont de Signy une augmentation de la turbidité, faible mais sans retard par rapport à l'augmentation du débit à la même station (Fig.11). A ces périodes, l'écart entre les crues ne permet pas à l'eau des réservoirs des barrages de se charger de manière significative en particules fines. La sonde turbidimétrique à l'aval du barrage de Vézins n'enregistre d'ailleurs aucun signal. L'augmentation de la turbidité à la station aval du pont de Signy est donc liée cette fois la mobilisation de sédiments stockés sur le tronçon de 4 km à l'aval des barrages. L'allure de la relation [MES] – débit montre que ce stock de sédiments s'épuise rapidement au cours même de la crue alors que le débit est encore élevé (Fig.11).

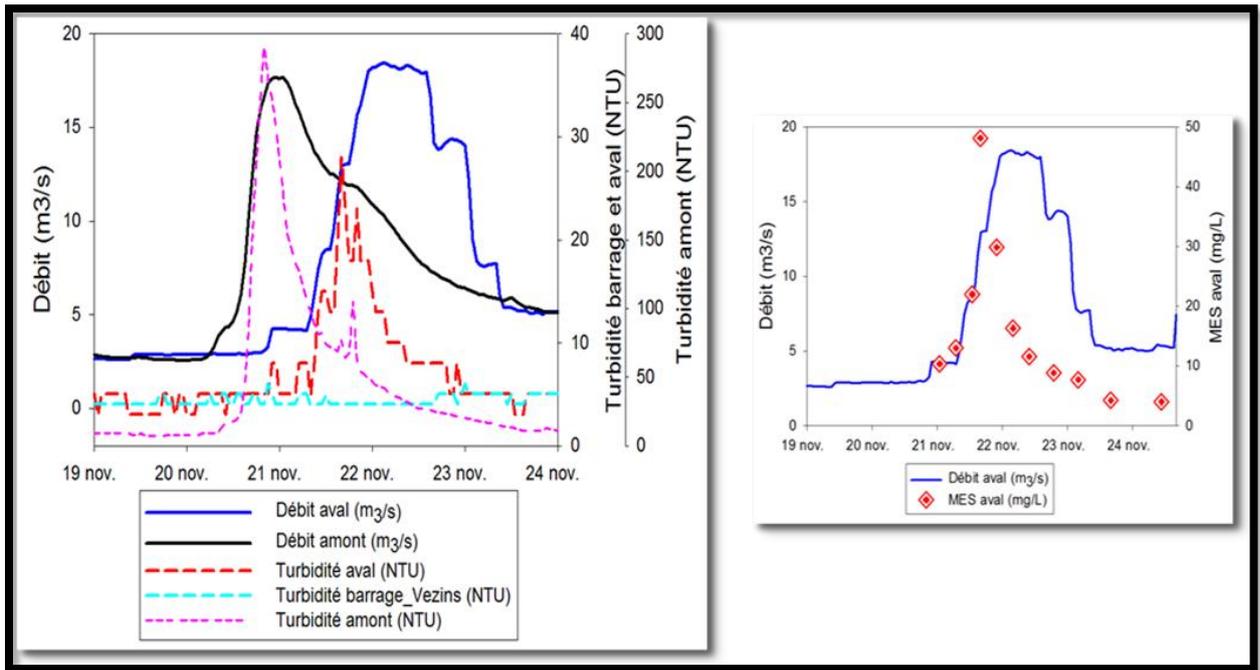


Figure 11 : Zoom sur une crue d'automne (Novembre, évolution de la turbidité et du débit (à gauche) et évolution des concentrations en MES à l'aval (à droite))

3. A la fin de l'hiver et au printemps (mars à juin), période de décrue générale entrecoupée de crues isolées, on n'observe en aval des barrages quasiment pas de réponse de la turbidité aux augmentations de débit alors que les crues mobilisent toujours des MES en amont des barrages (Fig.12). L'écart entre les crues ne permet pas à l'eau des retenues de se charger de manière significative en particules fines et le tronçon de 4 km ne produit pas non plus de MES car il est sans doute continuellement « nettoyé » à cause des débits élevés.

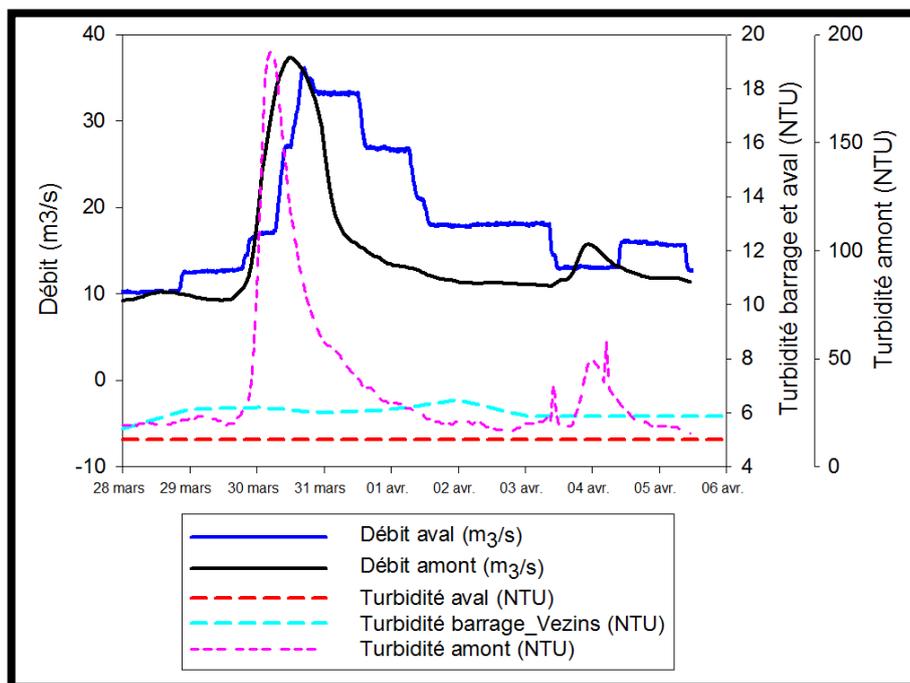


Figure 12 : Zoom sur une crue de printemps (Mars), évolution de la turbidité et du débit

1.2.2.3 - Quantification des flux de MES et de l'abattement dû à la présence des barrages

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. Le flux de MES est calculé en multipliant les concentrations par le débit puis en intégrant cette chronique sur la durée souhaitée.

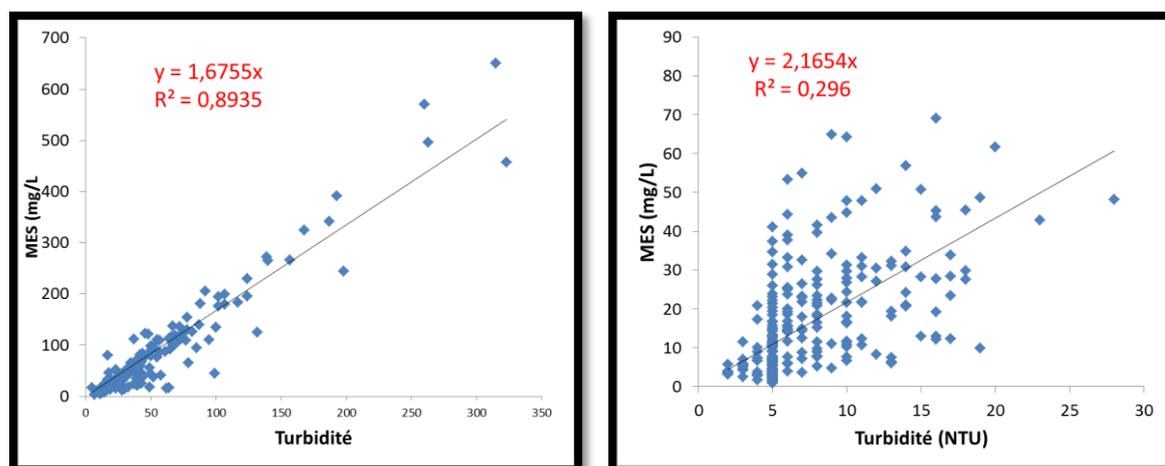


Figure 13 : Relation entre la turbidité et la concentration en MES (à gauche en amont des barrages ; à droite en aval des barrages)

Les relations d'étalonnage sont établies ici avec 181 échantillons pour l'amont et 250 pour l'aval. La relation est très bonne pour l'amont (R^2 de 0,894) mais présente une forte variabilité pour l'aval (R^2 de 0,296).

➤ Flux sédimentaire en amont des barrages

Pour la station amont, en utilisant la relation d'étalonnage (Figure 9) :

$$\text{MES (mg/L)} = 1,6755 \times \text{Turb (NTU)}$$

Nous obtenons un flux annuel de MES entrant dans les barrages de **14 533 tonnes soit un flux d'environ 23 tonnes/km²**. 9753 tonnes soit 67 % des flux sont exportés au cours du premier trimestre (mois d'hiver).

➤ Flux sédimentaire en aval des barrages

Pour la station aval du Pont de Signy, toutes périodes de l'année confondues, la relation d'étalonnage entre les MES et la turbidité n'est pas satisfaisante. Ceci s'explique vraisemblablement par de fortes imprécisions dans les mesures de concentrations de MES comme de turbidité, pour la faible gamme de valeurs rencontrées.

Il semble impossible de calculer les flux sédimentaires en utilisant les mesures haute fréquence de turbidité à cette station. Nous avons néanmoins réalisé une estimation de ces flux, en nous basant sur la relation observée entre les flux de MES et le débit, une relation de type loi de puissance classique est calibrée sur les données pour modéliser le transport solide (Fig.14). Nous avons également appliqué la relation entre le flux de MES et le débit à l'amont des barrages (Fig.14), afin de comparer avec le flux aval en utilisant la même méthode d'estimation du flux solide, mais également pour comparer avec le flux obtenu à l'amont par l'autre méthode (Fig.13).

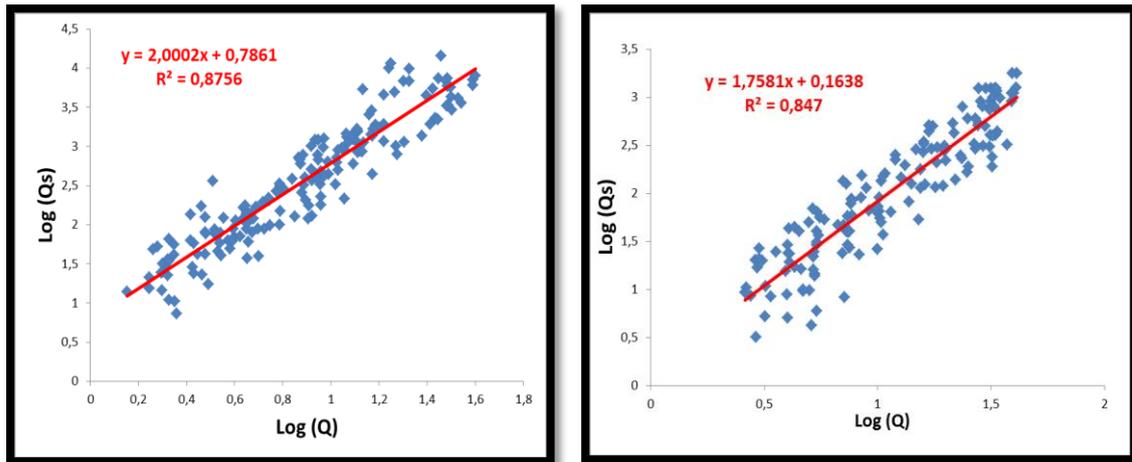


Figure 14 : Relation entre le débit $\log(Q)$ et les concentrations en MES ($\log(Q_s)$)
À l'amont des barrages (à gauche) et à l'aval (à droite)

Pour calculer le flux en aval des barrages, on utilise donc la relation :

$$\text{Log}(Q_s) = 1,7581 \times \log(Q) + 0,1638$$

En intégrant cette relation dans le temps grâce à la chronique haute fréquence de débit, on obtient un flux annuel de MES sortant des barrages de **3 395 tonnes soit environ 4 tonnes/km²**. 72 % des flux sont exportés au cours du premier trimestre (mois d'hiver).

Avec la même méthode, à l'amont des barrages, on obtient un flux annuel de MES entrant de **18 616 tonnes soit environ 30 tonnes/km²**. Ce flux est un peu différent mais du même ordre de grandeur que le flux obtenu en utilisant la relation entre les concentrations en MES et la turbidité (23 tonnes/km²).

Par comparaison Vongvixay (2012) a mesuré un flux annuel autour de 10 t/km² sur l'Oir, un affluent de la Sélune à l'aval des barrages, et un flux annuel atteignant 60 t/km² sur le ruisseau du Moulinet, un petit affluent de l'Oir. Dans la revue bibliographique de Vanmaercke et al. (2011) qui concerne 282 bassins soumis aux conditions atlantiques de l'Europe de l'Ouest et de superficie très variée, les flux spécifiques annuels de MES sont en moyenne de 100 t/km² (médiane 28 t/km²).

Au cours de l'année, environ **15 220 tonnes** de MES ont sédimenté dans les retenues. Les barrages ont engendré un **abattement de 82 % du flux de MES**.

1.2.3 - Flux chimiques

Les concentrations des éléments chimiques, dissous ou particuliers, sont décrites ci-dessous en utilisant les chroniques, obtenues sur une année à l'amont au Pont de Virey, et les chroniques plus longues sur 20 mois, obtenues à l'aval au Pont de Signy. Nous mettons en évidence la dynamique des différents éléments, successivement à l'échelle de la saison et à l'échelle de la crue, en soulignant l'effet des barrages par une comparaison amont-aval sur la période commune aux deux stations.

1.2.3.1 - Les barrages produisent un effet tampon sur les concentrations à l'aval

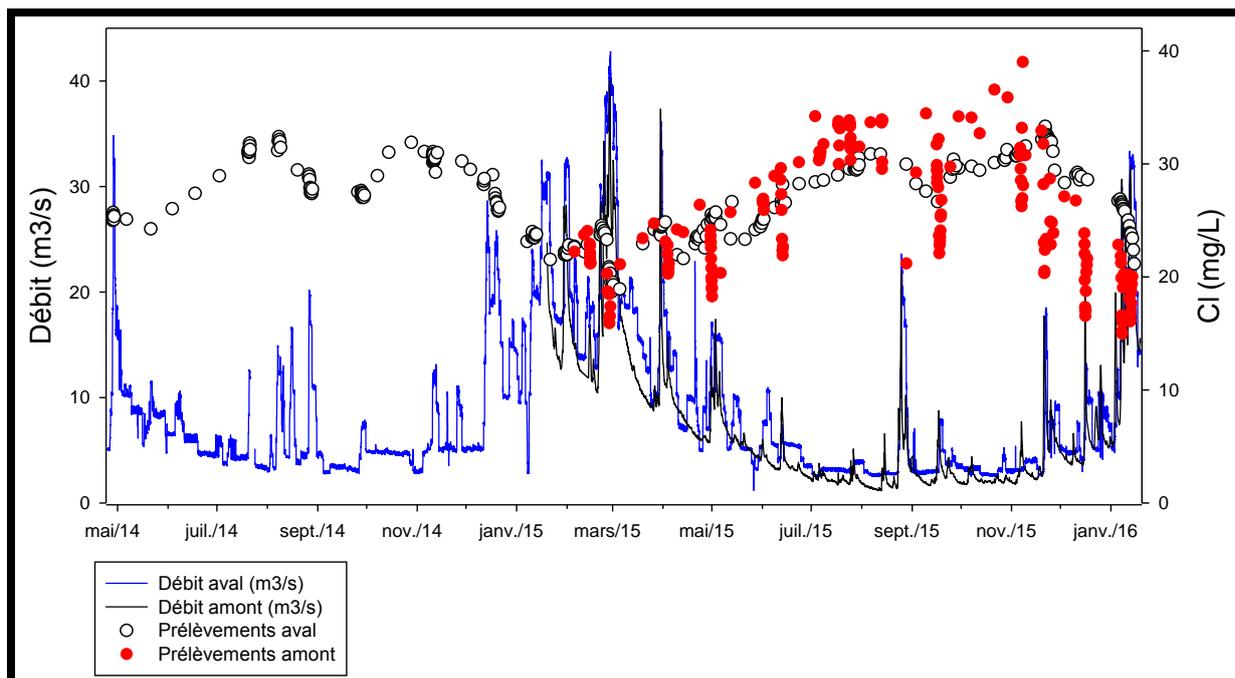


Figure 15 : Evolution de la concentration de l'ion chlorure à l'amont et à l'aval des barrages

Le chlorure est un élément conservatif, c'est à dire qu'il n'entre pas ou peu dans les réactions des cycles biogéochimiques. C'est un bon traceur hydrologique qui est utilisé pour déterminer l'origine de l'eau et son ancienneté. Les eaux de pluies (« eaux récentes ») sont moins concentrées en ions chlorure que les eaux souterraines plus « anciennes ». On notera que le chlorure rentre dans la composition des engrais agricoles.

On observe à l'amont et à l'aval des barrages la même dynamique saisonnière sur les concentrations en chlorure. Les eaux sont de façon générale plus concentrées au printemps et à l'été, lorsque la nappe, constituée d'eaux anciennes, alimente les rivières. Les concentrations diminuent progressivement à l'automne puis en hiver avec l'apport des eaux de pluie. En septembre 2014 comme en septembre 2015, la baisse observée des concentrations à l'aval des barrages est vraisemblablement liée à un certain renouvellement de l'eau des réservoirs dû aux fortes crues enregistrées les jours précédents.

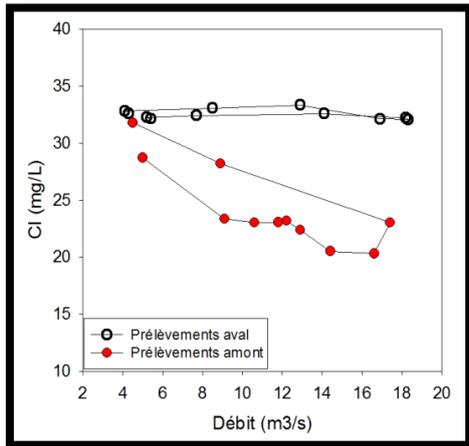


Figure 16 : Evolution des concentrations en chlorure à l'échelle d'une crue (novembre 2015) à l'amont et à l'aval des barrages
 A l'échelle d'une crue, à l'amont, on observe une dilution classique des concentrations en chlorure lorsque le débit augmente (voir par ex. Aubert et al., 2013, HESS), expliquée par l'arrivée plus importante d'eaux récentes. Cette variation n'est pas observée à l'aval, ce qui s'explique par la présence des barrages : les flux dissous entrant à l'amont des retenues se mélangent avec le volume d'eau important stocké dans les réservoirs, ce qui tamponne leurs concentrations quel que soit le débit sortant. Cet effet tampon à l'échelle de la crue est observé pour l'ensemble des éléments suivis. (cf. autres éléments du rapport et Annexe)

1.2.3.2 - Les barrages impactent certains flux chimiques via la production de phytoplancton

Carbone particulaire et azote particulaire

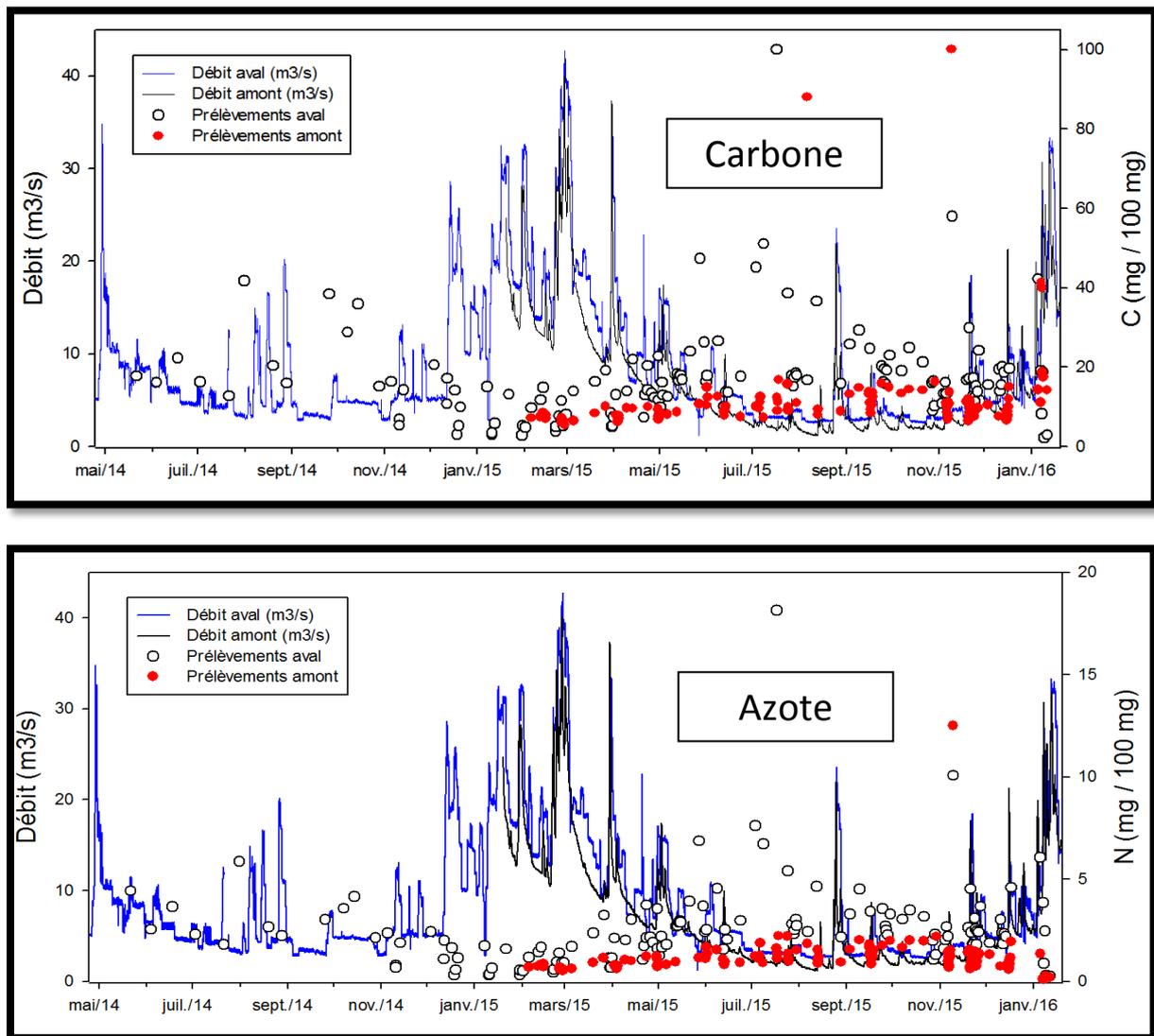


Figure 17 : Chroniques des concentrations en Carbone (en haut) et en Azote (en bas) particulaires à l'amont et à l'aval des barrages

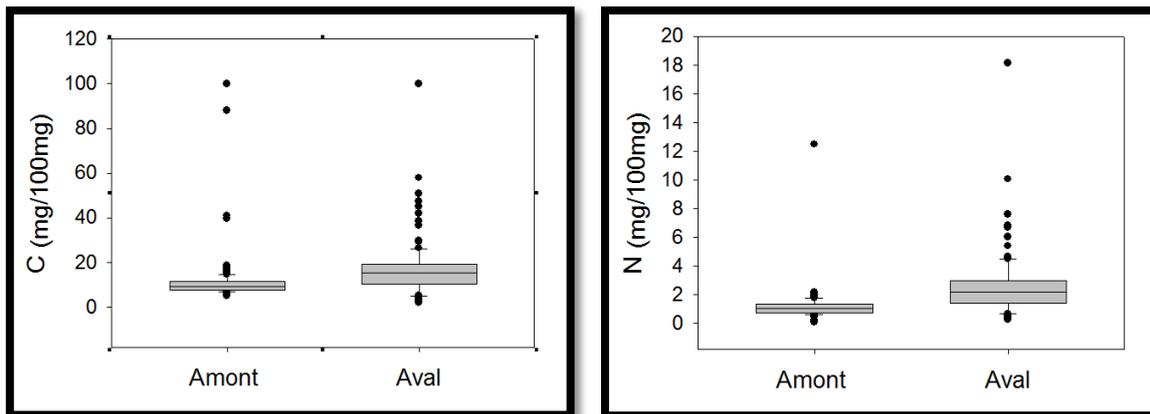


Figure 18 : Box plots des concentrations en Carbone (à gauche) et en Azote (à droite) à l'amont et à l'aval des barrages

Les teneurs en carbone et en azote des MES sont globalement plus importantes à l'aval qu'à l'amont des barrages (Fig.18). Pour le carbone la médiane est de 15,4 mg/100 mg à l'aval contre 9,4 mg/100 mg à l'amont. Pour l'azote, 2,2 mg/100 mg à l'aval contre 1,0 mg/100 mg à l'amont.

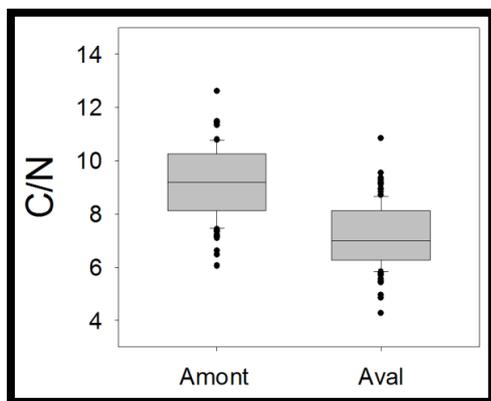


Figure 19 : Rapport C/N de MES à l'amont et à l'aval des barrages

Les MES prélevées sur la station aval sont donc plus riches en particules organiques que celles provenant de l'amont. Par ailleurs leur rapport C/N est plus faible à l'aval (médiane de 7) par rapport à l'amont (médiane de 9). Bolhin et al (2006) ont établi qu'un rapport C/N inférieur à 8 témoigne d'une origine phytoplanctonique de la matière organique, un C/N supérieur à 8 témoigne d'une matière organique d'origine terrigène.

Concernant les dynamiques saisonnières (Fig.17), les teneurs en C et N des MES sont relativement stables à l'amont des barrages, avec une légère augmentation du printemps à la mi automne. Ce phénomène est nettement plus marqué à l'aval des barrages avec notamment une forte augmentation pendant l'été.

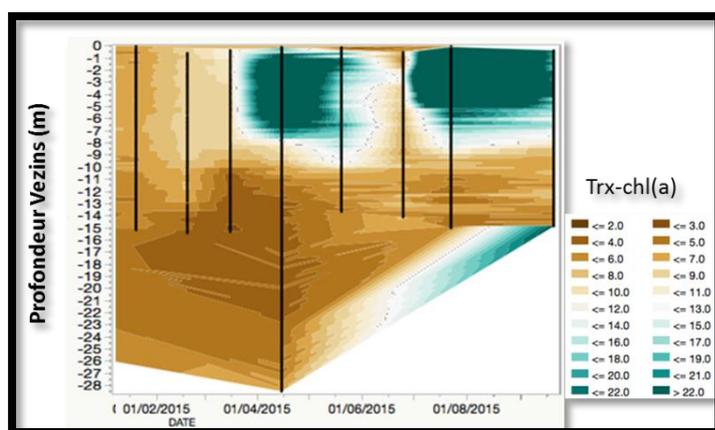


Figure 20 : Dynamique du phytoplancton révélée par la mesure de la chlorophylle a (en mg/l) (retenue de Vezins), Pannard et al, 2015

Cette augmentation estivale des teneurs en C et N à l'aval est cohérente avec la dynamique du phytoplancton dans la retenue de Vezins (Pannard et al, 2015). Le phytoplancton est présent en grande quantité dans la retenue de début avril à fin octobre. La majeure partie des MES qui transitent à l'aval du printemps à l'automne sont d'origine phytoplanctonique. Ces particules ne sont pas détectées par le turbidimètre qui est peu sensible aux longueurs d'ondes absorbées par le phytoplancton, ce qui peut expliquer

l'absence de réponse du signal de turbidité au cours des crues, observée au printemps et en été (§ 1.2.2.1).

Phosphore dissous et silice

La présence du phytoplancton impacte également l'évolution des concentrations de certains éléments dissous, comme le phosphate et la silice, éléments nutritifs principalement limitant de ces communautés.

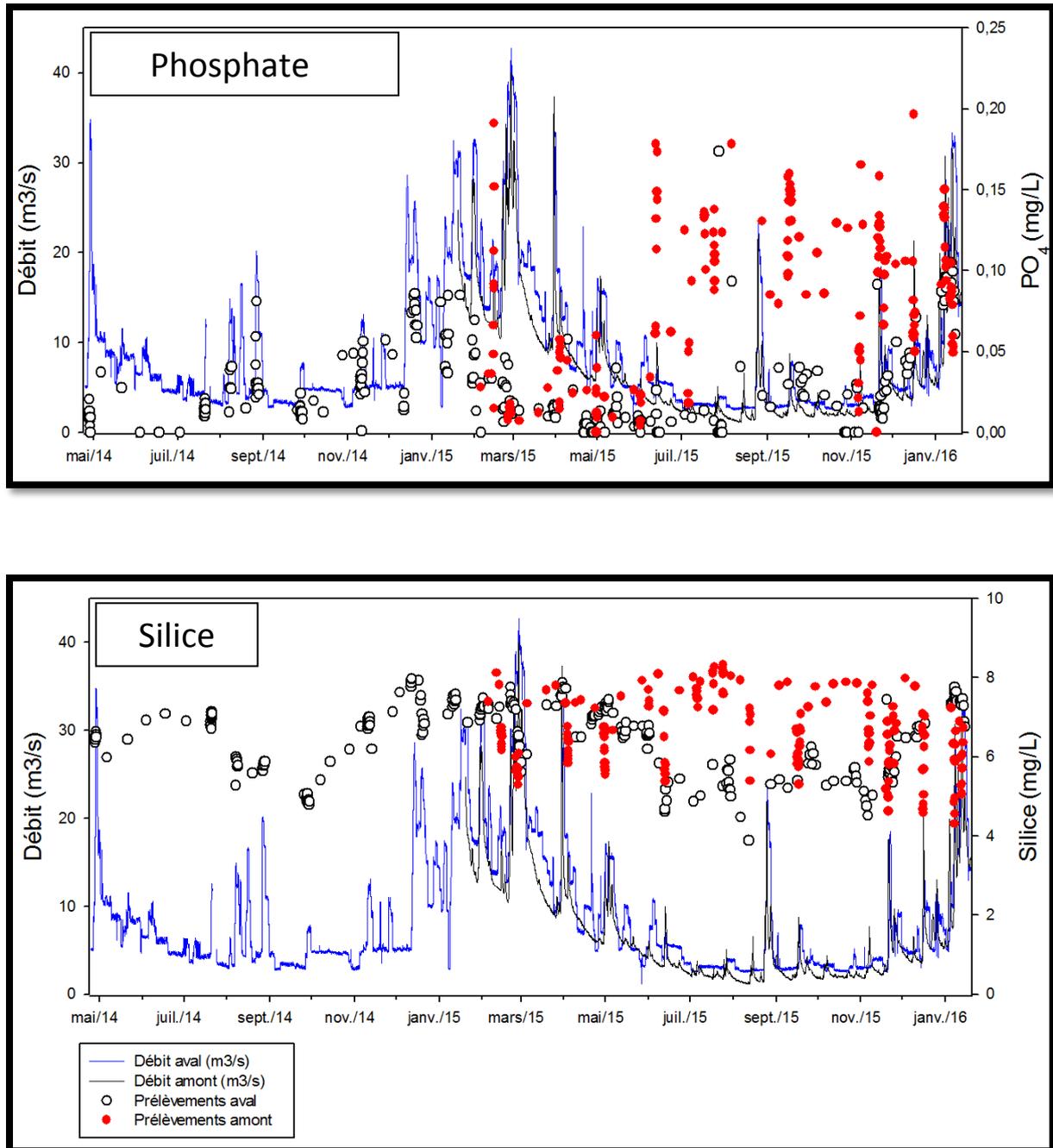


Figure 21 : Chronique des concentrations en Phosphore dissous (en haut) et en Silice (en bas) à l'amont et à l'aval des barrages

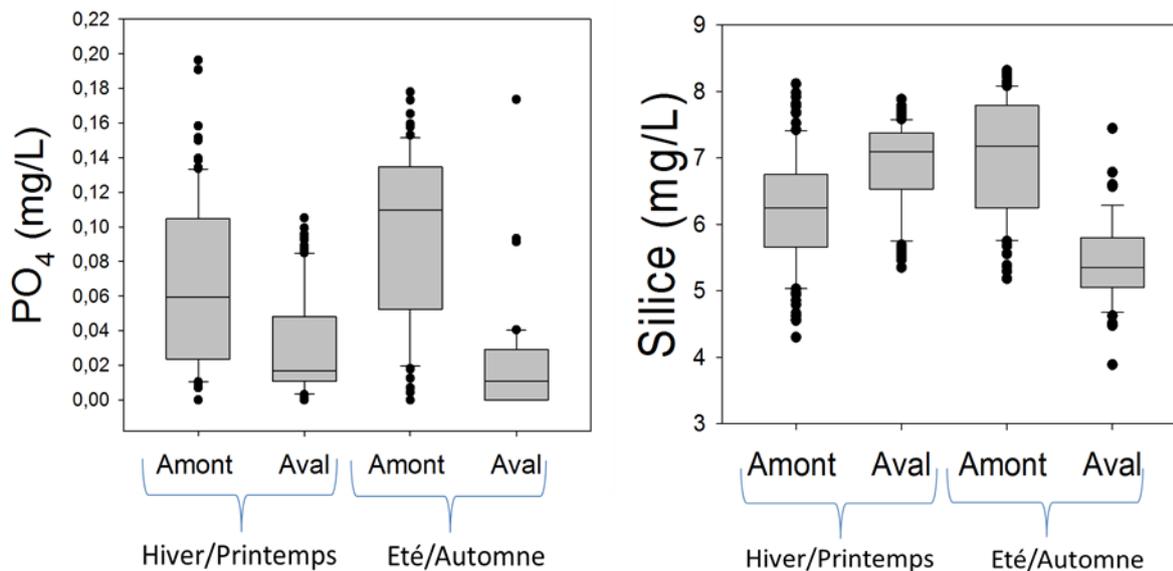


Figure 22 : Box plot des concentrations en phosphore dissous (à gauche) et en Silice (à droite) à l'amont et à l'aval des barrages et à deux périodes différentes (Hiver/Printemps et Été/Automne)

Phosphate :

On observe une dynamique saisonnière différente entre l'amont et l'aval des barrages (Fig.21 haut). A l'amont les concentrations augmentent fortement au cours de l'été et jusqu'à la fin de l'automne, et sont les plus faibles au printemps. A l'aval les concentrations en PO_4 augmentent plutôt au début de l'hiver, puis restent plus faibles le reste de l'année. Au cours de l'année 2016, les concentrations en phosphate sont globalement plus élevées à l'amont des barrages (médiane de 0,08 mg/L à l'amont contre 0,016 mg/L à l'aval). Cette différence existe en hiver et au printemps, mais l'écart se creuse fortement en été et automne, du fait des fortes teneurs mesurées à l'amont (Fig.22, gauche). On observe pour l'amont un phénomène de concentration en crue. Les exports de Phosphore depuis le bassin versant ont lieu essentiellement en crue, en relation avec les MES, lorsque la connectivité entre les sources terrigènes et le réseau hydrographique est assurée (Dupas et al., 2015 ; Mellander et al., 2016). La dynamique du Phosphore total est par ailleurs fortement corrélée à celle des MES (cf. Annexe (phosphore total)).

On notera que par rapport aux classes de qualité définies par le SEQ-EAU (Système d'Evaluation de la Qualité des cours d'eau) et au vu des concentrations médianes mesurées, la Sélune est classée de très bonne qualité en amont et en aval des barrages (concentrations inférieures à 0,1 mg/L).

Silice : comme pour le phosphate, les dynamiques saisonnières des concentrations en silice sont différentes entre l'amont et l'aval des barrages (Fig.21, bas). A l'amont les concentrations varient peu hors crue au cours de l'année (entre 7 et 8 mg/L), avec une dilution classique au cours des crues, comme pour le Chlore. A l'aval des barrages, les concentrations en silice sont légèrement plus faibles en été et automne (Fig.22, droite), avec une médiane qui passe de 7,0 mg/L à 5,2 mg/L. A ces saisons, comme pour le phosphate, on observe une forte diminution des concentrations entre l'amont et l'aval.

Pendant les crues il n'y a pas de dilution à l'aval des barrages, en raison de l'effet tampon induit par la présence des retenues (mélange des eaux).

La diminution en été et à l'automne des concentrations en phosphate et en silice entre l'amont et l'aval des barrages est à rapprocher de l'augmentation des teneurs en carbone et en azote des MES mesurées à l'aval des barrages à la même période. Par ailleurs les mesures réalisées dans les retenues montrent la présence de phytoplancton (A. Pannard (2015)) dans ces retenues (Fig.23) ce qui supporte l'hypothèse d'une consommation de phosphore liée à ce développement de biomasse primaire (Fig.24). La silice est également consommée par les microalgues, notamment par les Diatomées qui l'utilisent pour synthétiser leur squelette.

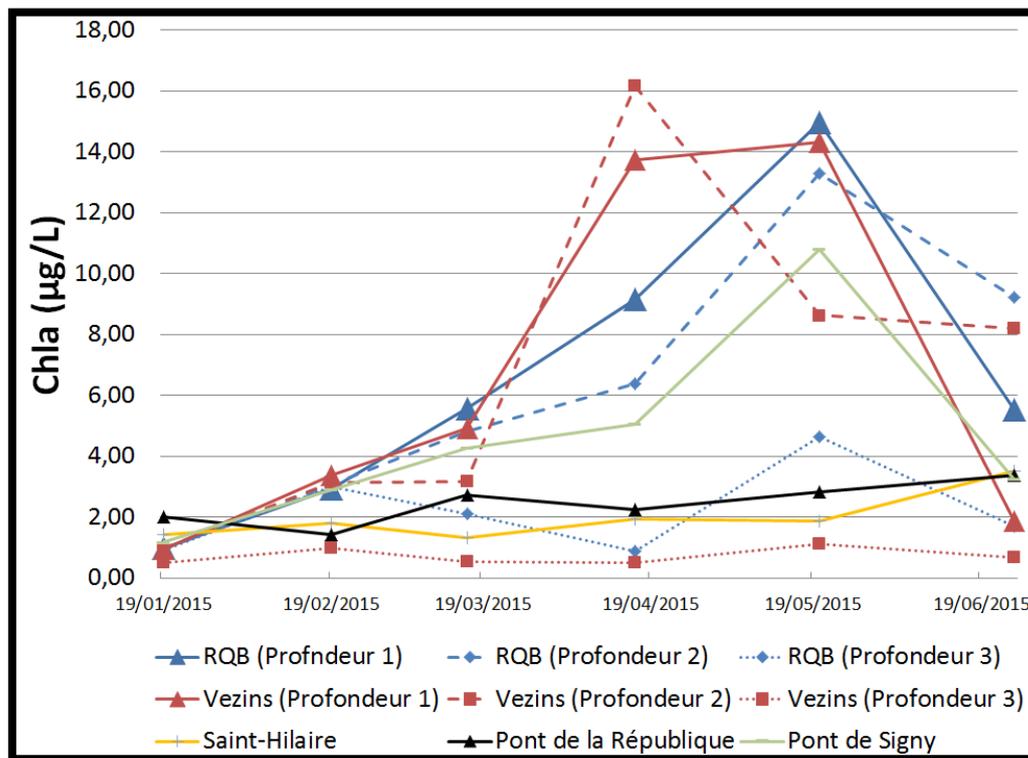


Figure 23 : Evolution des concentrations en chlorophylle a au cours de l'année à l'amont, dans les retenues à différentes profondeurs et à l'aval. Données A. Pannard.

Prof 1 : prélèvement 1 m sous la surface de l'eau ; prof 2 : prélèvement intermédiaire ; prof 3 prélèvement 1 m au-dessus du fond de la retenue

On observe nettement une augmentation de chlorophylle a dans les retenues et au pont de Signy (aval des barrages) à partir du mois de mars.

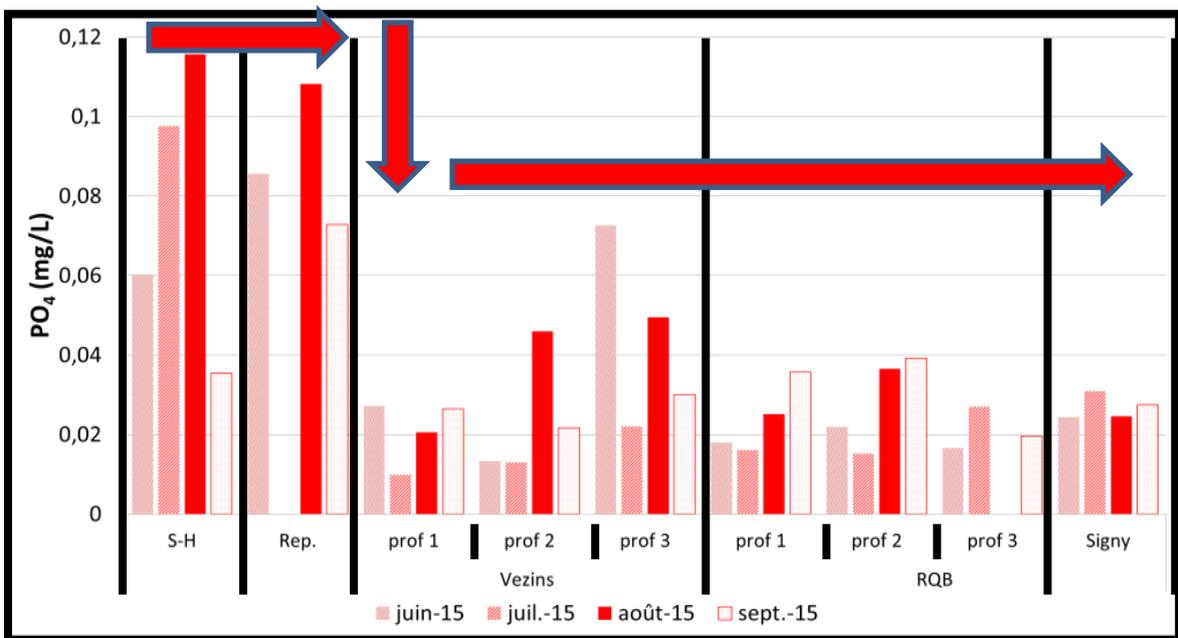
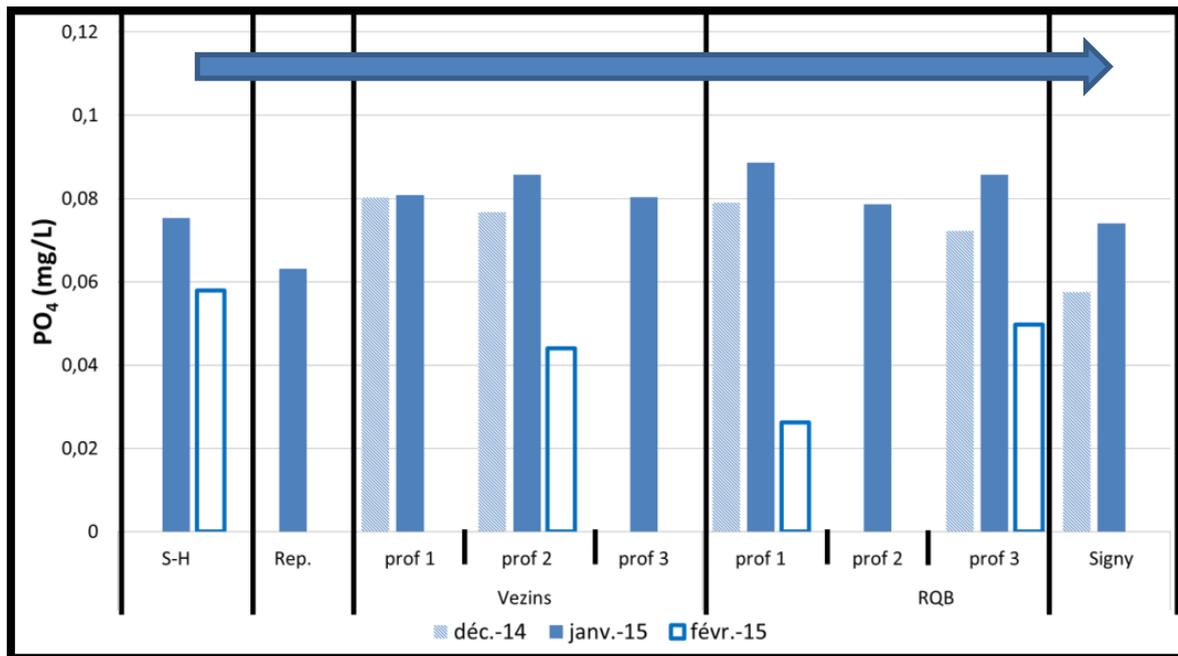


Figure 24 : Evolution des concentrations en PO₄ à différentes périodes de l'année (en haut : mois d'hiver ; en bas : période estivale), à l'amont, dans les retenues à différentes profondeurs, et à l'aval. Données A. Pannard.

S-H : Saint-Hilaire (amont barrages) ; Rep : Pont de la République (amont retenue Vezins) ; Vezins (aval retenue de Vezins) ; RQB : retenue de la Roche qui boit (bel-Orient) ; Signy : pont de Signy (aval barrages).

Prof 1 : prélèvement 1 m sous la surface de l'eau ; Prof 2 : prélèvement intermédiaire ; Prof 3 : prélèvement 1 m au-dessus du fond de la retenue

Pendant les mois d'hiver, les concentrations en PO₄ sont identiques (environ 0,06 mg/L) à l'amont des retenues, dans les retenues (quelle que soit la profondeur) et à l'aval. Au cours de la période estivale, les concentrations à l'amont (Saint-Hilaire et Pont de la République) sont par contre nettement supérieures (environ 0,09 mg/L) à celles mesurées dans les deux retenues et au Pont de Signy (quasiment toujours inférieures à 0,04 mg/L). En cohérence avec nos mesures, cela illustre bien l'effet de consommation par le phytoplancton dans les retenues au cours de la période estivale.

1.2.3.3 - Les barrages impactent peu les concentrations en azote dissous

Nitrates

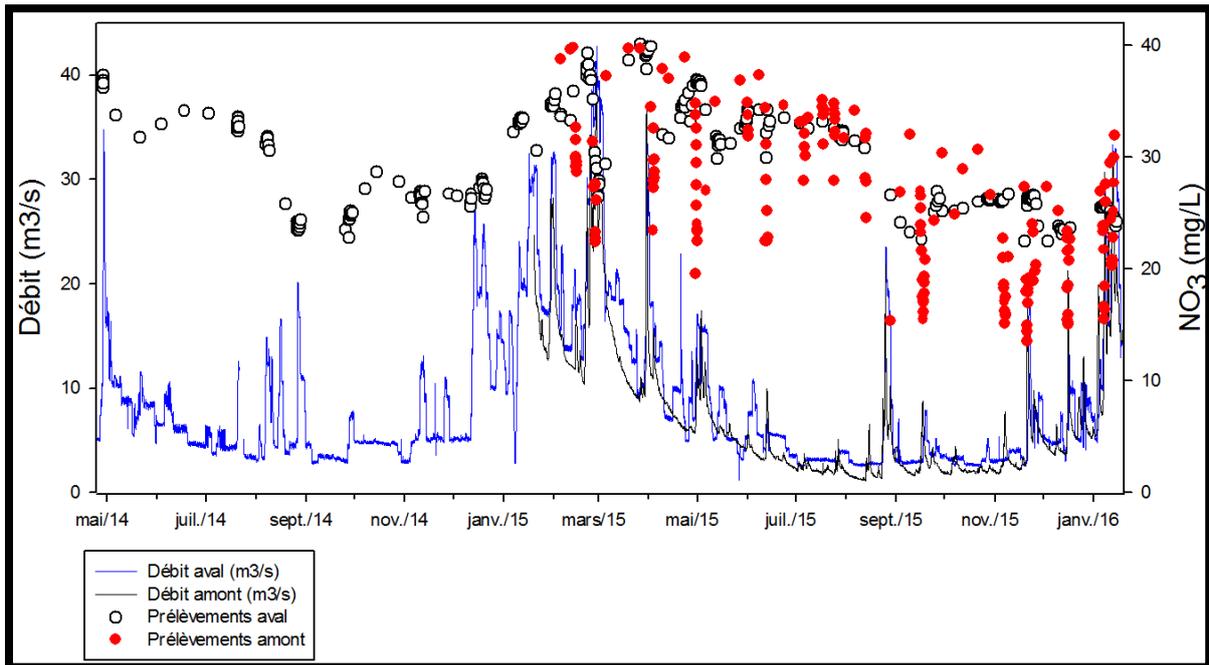


Figure 25 : Chronique des concentrations en nitrate à l'amont et à l'aval des barrages

La dynamique saisonnière des concentrations en nitrate est identique à l'amont et à l'aval des barrages, et obéit à un cycle communément observé dans les cours d'eau du Nord-Ouest de la France (Martin et al, 2004 ; Molénat et al, 2008). Les concentrations augmentent en hiver et diminuent en été. Cette dynamique est liée à la fois à des compartiments hydrologiques différents alimentant la rivière et à la saisonnalité des processus biogéochimiques dont l'absorption par les végétaux. Il n'y a pas d'effet des barrages produisant un abattement des concentrations en nitrates pendant la période estivale comme souvent observé pour d'autres retenues (Harrisson et al. 2009 ; Passy et al., 2012). Contrairement au phosphore, le nitrate est présent en plus grande quantité et n'apparaît pas limitant pour le développement du phytoplancton.

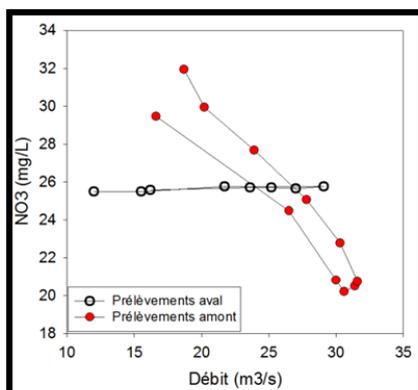
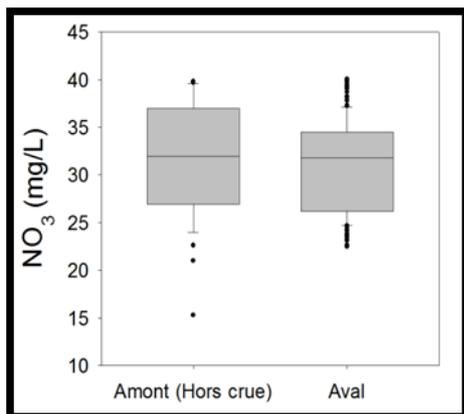


Figure 26 : Evolution des concentrations en nitrate à l'échelle d'une crue (janvier 2016) à l'amont et à l'aval des barrages

Comme pour le chlorure (et d'autres éléments, Aubert et al, 2013 HESS), on observe une dilution lors des crues à l'amont des barrages mais pas à l'aval en raison de l'effet tampon induit par les barrages.

Figure 27 : Concentrations en nitrate à l'amont des barrages (prélèvements hors crue) et à l'aval



En ne conservant à l'amont que les données hors crue, pour ne pas prendre en compte le phénomène de dilution pendant les crues, on remarque que les concentrations sont du même ordre de grandeur entre l'amont et l'aval des barrages. Les médianes se situent autour de 32 mg/L. On notera que par rapport aux classes de qualité définies par le SEQ-EAU (Système d'Evaluation de la Qualité des cours d'eau) la Sélune est classée de qualité médiocre pour le nitrate en amont et en aval des barrages (concentrations comprises entre 25 et 50 mg/L).

Nitrite et ammonium

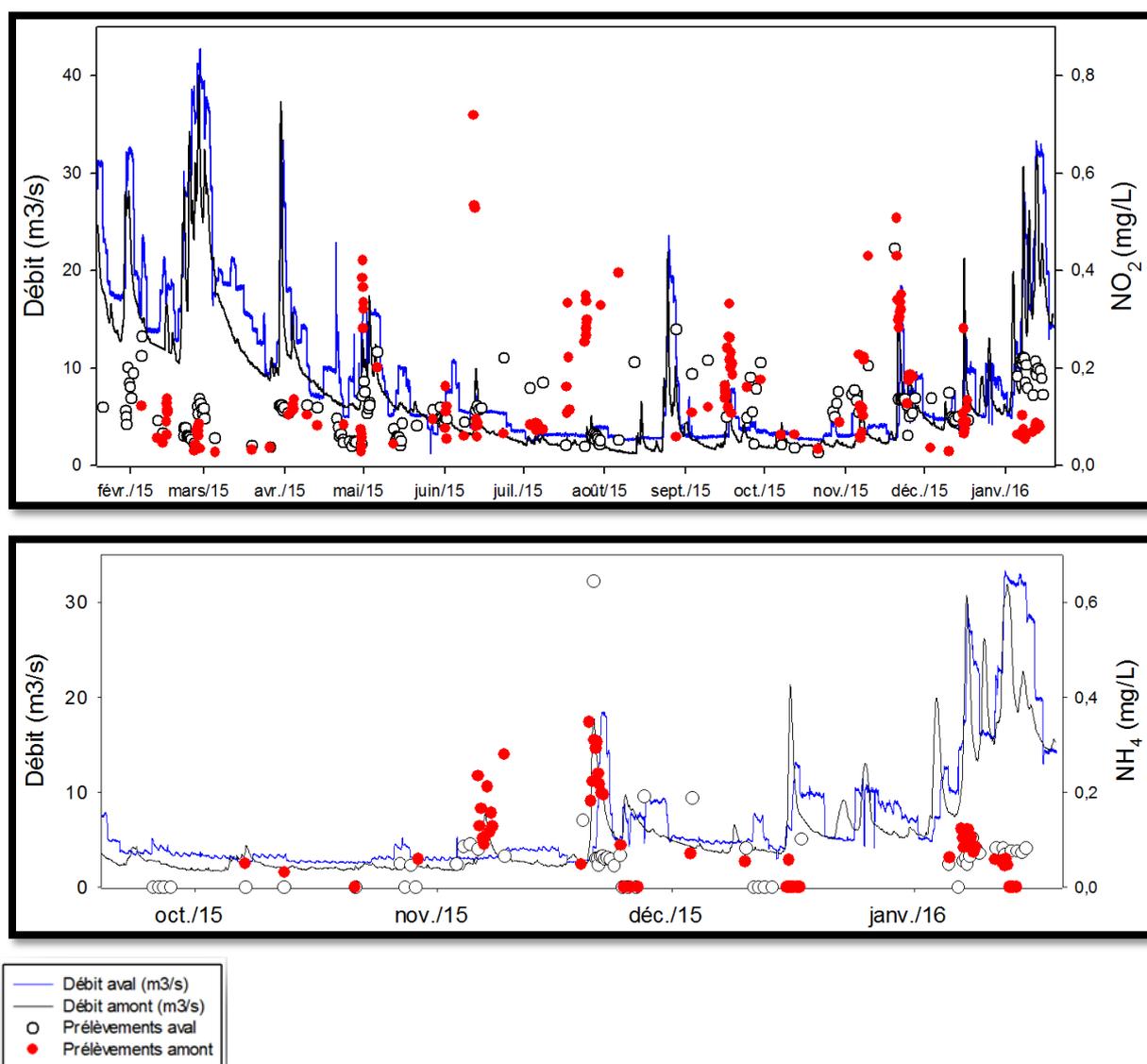


Figure 28 : Evolution des concentrations en nitrite (en haut) et en ammonium (en bas) à l'amont et à l'aval des barrages

Les concentrations en nitrites sont suivies à l'amont et à l'aval des barrages depuis février 2015, les concentrations en ammonium depuis octobre 2015.

Les deux éléments sont présents systématiquement (pour le nitrite) et quasi systématiquement (pour l'ammonium) à l'amont et l'aval des barrages. A l'amont des barrages, la gamme de concentrations s'étend de 0,02 à 0,6 mg/L pour le nitrite et de 0 à 0,4 mg/L pour l'ammonium. Les concentrations sont plus élevées lors des crues. A l'aval des barrages, les gammes de concentrations sont plus faibles, de 0,02 à 0,3 mg/L pour le nitrite et de 0 à 0,2 mg/L pour l'ammonium. Comme pour les autres éléments on observe un effet tampon lors des crues dû à la présence des barrages.

Le nitrite et l'ammonium sont des sous-produits de la dénitrification. Leur présence à l'aval des barrages pourrait être liée aux conditions lenticques et anoxiques dans les retenues, favorables au phénomène de dénitrification. Cette dénitrification est vraisemblablement faible car elle n'induit pas d'abattement clair des concentrations de nitrate. En revanche la présence de nitrite et d'ammonium à l'amont des barrages est plus étonnante car les conditions ne sont pas favorables au phénomène de dénitrification. L'oxygène dissous mesuré en continu au niveau de la station en amont des barrages varie entre 7,5 mg/L au cours de l'été et 12 mg/L au cours de l'hiver. Leur origine pourrait être due non pas à la dénitrification mais aux rejets de la station d'épuration du lieu-dit les pares balles à Saint Hilaire. Cette station d'une capacité de 15 000 EH (Equivalent Habitant) collecte les effluents des villes de Saint Hilaire, Virey, Parigny et Saint Brice de Landelles. Les eaux traitées sont rejetées dans l'Airon, 800 mètres en amont de la confluence avec la Sélune et 2 km en amont de notre station de mesure du pont de Virey (Fig.29)

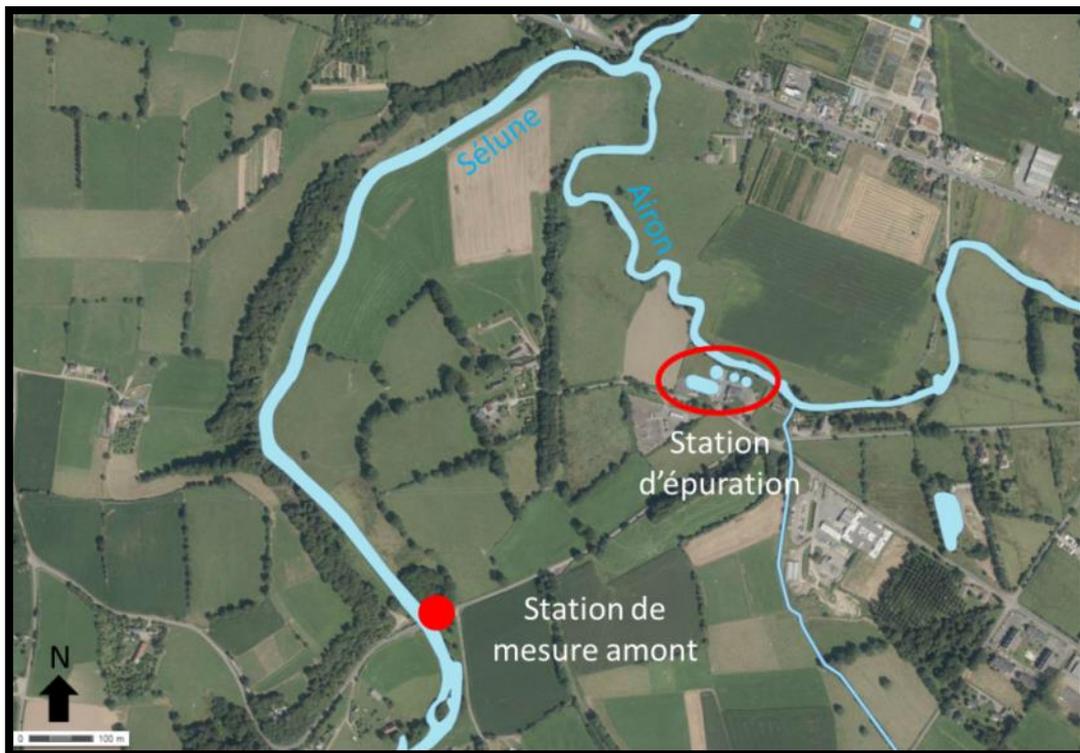


Figure 29 : Carte de localisation de la Station d'épuration de Saint-Hilaire par rapport à la station de mesure amont

1.3 Conclusion et perspectives

➤ **Conclusion**

L'étude de l'état initial de la Sélune avant arasement des barrages a été menée grâce aux données issues des stations installées en amont, en aval et au pied de chaque barrage. Le suivi des flux hydriques, sédimentaires et chimiques (particulaires et dissous) a débuté fin avril 2014 à l'aval des barrages et en février 2015 à l'amont. Nous ne bénéficions donc que d'une année complète de comparaison amont/aval. Toutefois, on observe clairement sur cette chronique un impact des barrages sur les flux et sur leur dynamique temporelle qui se manifeste par :

Flux hydriques : Un écrêtement des pics de débit pour la très grande majorité des crues, sauf les plus fortes crues en lien avec la gestion des ouvrages. Nous répétons ici que le terme de « crue » utilisé ici dans sa définition hydrologique correspond à toute augmentation du débit, petite ou forte, consécutive à un événement pluvieux.

Flux sédimentaires : Le stockage d'une part importante des sédiments dans les retenues, ce qui réduit fortement les concentrations de matières en suspension hors crue et lors des crues à l'aval des barrages. Nous avons mesuré un abattement du flux de MES annuel de l'ordre de 82 %. Ce sont vraisemblablement les particules les plus grossières et les plus denses qui sont stockées. Les plus fines continuent régulièrement à transiter, particulièrement pendant l'hiver où l'on observe une rapide homogénéisation des retenues en raison des crues successives. Les MES qui transitent à l'aval ont deux origines, la majeure partie est minérale et terrigène notamment pendant les mois d'hiver. Pendant la période estivale, en régime hors crue, les MES ont une origine organique, et sont composées en grande partie du phytoplancton produit dans les retenues et qui transite en suspension à l'aval.

Flux chimiques : Un effet tampon sur les concentrations en éléments dissous à l'aval des barrages. Les concentrations varient peu au cours des crues, au lieu d'accompagner les variations de débit. Cet effet tampon est dû au mélange des flux entrant avec le volume d'eau stocké dans les retenues.

Il n'y a donc pas de dynamique événementielle (à l'échelle de la crue) à l'aval des barrages. En revanche il existe une dynamique saisonnière, pouvant être corrélée à la dynamique saisonnière des flux entrant (éventuellement tamponnée par le passage dans les retenues) et/ou à la dynamique saisonnière de processus biogéochimiques dans les retenues. Le croisement de nos données avec celles du volet Biocénoses aquatiques travaillant sur la dynamique du phytoplancton nous a permis de consolider certaines hypothèses sur l'origine de la dynamique des concentrations et des flux chimiques.

➤ Perspectives

Le suivi des flux hydriques, sédimentaires et chimiques, doit être poursuivi pour plusieurs raisons :

- Il est nécessaire de poursuivre les efforts de comparaison des flux entre l'amont et l'aval pour bien comprendre l'impact des barrages en tenant compte de la variabilité climatique interannuelle. Nous ne disposons que d'une seule année de comparaison amont/aval pour l'état initial. Ceci d'une part en raison du temps nécessaire pour obtenir l'alimentation électrique et pour installer les stations (choix et maîtrise du matériel, installation des supports, ...), d'autre part car la décision de réaliser les prélèvements sur la station amont a été prise suite au constat que le suivi d'EDF se limiterait aux sondes multi-paramètres et au suivi hydrologique. Finalement c'est l'INRA qui réalise le suivi des flux chimiques et sédimentaires sur la station amont depuis février 2015.
- Le suivi pendant la période d'arasement permettra de définir l'impact des opérations d'abaissement du niveau d'eau (vidange) puis du rétablissement de la continuité hydrologique sur les différentes variables. En particulier le suivi des flux sédimentaires est indispensable pendant ces périodes critiques d'abaissement où il est nécessaire de suivre les éventuelles exportations de sédiments à l'aval. Nous avons donc besoin de maintenir l'effort du suivi actuel. La vidange prévue en 2017 dans le nouveau calendrier, est déjà une étape susceptible de modifier ces dynamiques suite à l'abaissement du niveau et l'ouverture des vannes.
- Afin de caractériser et de mieux comprendre les relations existant entre les flux chimiques et la dynamique du phytoplancton dans les retenues, nous allons renforcer nos relations avec les collègues du volet Biocénoses aquatiques. Une sonde optique permettant de mesurer en continu la chlorophylle a sera installée au pont de Signy dès le printemps 2016.
- Estimation des flux de MES des affluents du lac de Vezins (Daniel Delahaye (LETG-Caen)). L'objectif est de proposer des bilans quantitatifs et qualitatifs des apports hydro-sédimentaires des trois principaux affluents du lac de Vezins. Ce suivi aura pour objectif de mieux quantifier l'ensemble des sources de sédiments entrants dans les barrages, en intégrant les flux de ces affluents avec ceux provenant du bassin versant amont de la Sélune déjà mesurés. L'étude s'appuiera sur un réseau de mesure haute fréquence afin de comprendre les dynamiques spatiales et temporelles de ces transferts. La quantification des flux hydro-sédimentaires sera effectuée par un suivi en continu à l'aide d'un réseau de mesure haute fréquence. Pour ce faire 3 stations (sondes pression et turbidimètres) seront implantées à l'exutoire des sous-bassins les plus importants en termes de flux de MES. L'étude ne se limitera pas aux exutoires des trois principaux affluents du lac de Vezins, mais se focalisera également sur les sous bassins afin de mesurer les apports respectifs des différentes zones contributives et de mieux comprendre le jeu complexe dans le temps et dans l'espace des transferts hydrologiques et sédimentaires. En effet les données seront ensuite analysées en fonction de l'utilisation des sols et de l'hydrologie sur chacun des bassins versants.

2 - Etudes préliminaires

En complément du suivi des Flux hydriques, sédimentaires et chimiques de la Sélune, nous avons mené deux études préliminaires se rattachant au thème Dynamique fluviale.

La première a fait l'objet d'un stage de Master 1 (Clerc, 2015) et s'intéressait à la contamination en métaux lourds des sédiments de l'Yvrande. L'objectif était de compléter les informations apportées par des études précédentes pour envisager un suivi des métaux lourds dans les sédiments, les matières en suspension et l'eau à l'aval des barrages.

La deuxième étude a été menée en 2015 par Virginie Vergnaud, hydrogéologue de l'Université Rennes 1, dans le but de caractériser la géochimie des eaux souterraines sur le bassin versant de la Sélune. L'objectif était de caractériser l'état initial de la qualité des eaux souterraines de la zone avant les travaux d'arasement des barrages de façon à pouvoir identifier si besoin les impacts. L'arasement des barrages est en effet susceptible de modifier les échanges entre la nappe et la rivière localement. Cet état initial devant permettre d'identifier un éventuel effet de la nappe sur la qualité de l'eau du fleuve d'une part, et d'autre part de caractériser le bruit de fond des concentrations en métaux lourds afin de distinguer les conséquences d'anomalies naturelles de celles d'éventuel relargage par les sédiments contaminés objet de la première étude.

2.1 – Etude préliminaire au suivi de la contamination en métaux lourds des sédiments de l'Yvrande (extraits du mémoire de Clerc, 2015)

2.1.1 - Contexte

Lors de l'arasement des barrages, les modifications les plus importantes attendues vont concerner les flux sédimentaires, l'essentiel des particules issues de l'érosion des bassins versants étant actuellement retenu dans les réservoirs des barrages. Or des études préalables menées par l'IDRA et le BRGM ont montré l'existence d'une contamination en métaux lourds des sédiments provenant d'un affluent de la Sélune, l'Yvrandre. Cette contamination est à l'origine d'inquiétudes dans la population, en particulier des ostréiculteurs et conchyliculteurs installés en aval dans la Baie du Mont Saint Michel.

L'arasement des barrages sera très progressif, à partir de 2016 et sur plusieurs années. Il est prévu tout d'abord d'« effacer » le premier barrage à l'amont pour vider la retenue en limitant au maximum le départ des sédiments, dangereux pour l'environnement. Les sédiments devraient être stockés sur les bords du réservoir au fur et à mesure de la baisse du niveau d'eau, et les néosols ainsi obtenus revégétalisés. Les sédiments plus particulièrement contaminés en aval de l'Yvrande devraient être confinés sous des sédiments non contaminés provenant du lit actuel de la Sélune et le cours de l'affluent dévié. L'arasement du deuxième barrage aura lieu dans un second temps. Ces précautions devraient donc limiter fortement le risque de transfert vers l'aval des sédiments contaminés. Cependant, compte-tenu des inquiétudes vis-à-vis de ce risque, nous avons mené une étude préliminaire visant à compléter les informations apportées par l'IDRA et le BRGM sur la contamination des sédiments de l'Yvrande afin de mettre en place dans la suite du programme un suivi à l'aval des barrages pour contrôler la mobilisation éventuelle de ces métaux lourds.

2.1.2 - Matériel et méthodes

L'Yvrande est un affluent de la Sélune, qui se jette dans le lac de Vezins, lac artificiel, retenue du premier barrage placée sur la rivière. Le bassin versant de l'Yvrande a une superficie d'environ 18 km². Comme l'Yvrande se jette dans un lac, un cône de sédimentation s'est formé à son embouchure. Les sédiments constituant ce cône ont été identifiés comme contaminés en métaux lourds (Cd, Cr, Cu, Ni, Zn) du fait d'une industrie métallurgique anciennement implantée sur le bassin versant de l'Yvrande. Le bassin versant de l'Yvrande comme celui de la Sélune est de manière dominante occupé par l'agriculture (élevage).

10 échantillons de sédiments ont été prélevés en bordure du cône de sédimentation de l'Yvrande, et à sa surface sur les dix premiers cm (Fig.31). 6 échantillons ont été prélevés en remontant le cours d'eau dont 1 sur un affluent (près de la confluence avec l'Yvrande) qui draine le bassin versant où est localisée l'entreprise à l'origine du rejet (Fig.30). Enfin 3 échantillons de sédiments correspondent à l'emplacement de la station de mesures des flux au Pont de Signy. Par ailleurs nous avons utilisé un échantillonneur de matières en suspension (MES) placé à l'aval de l'Yvrande et recueilli ainsi 1 échantillon de MES (Fig.31).

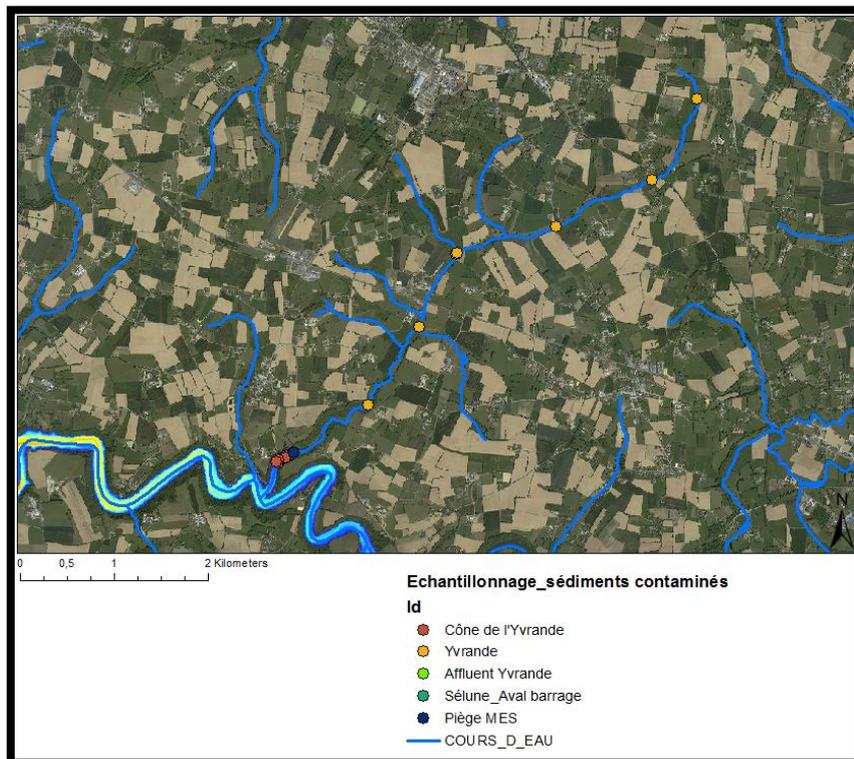


Figure 30 : Localisation des prélèvements le long de l'Yvrande

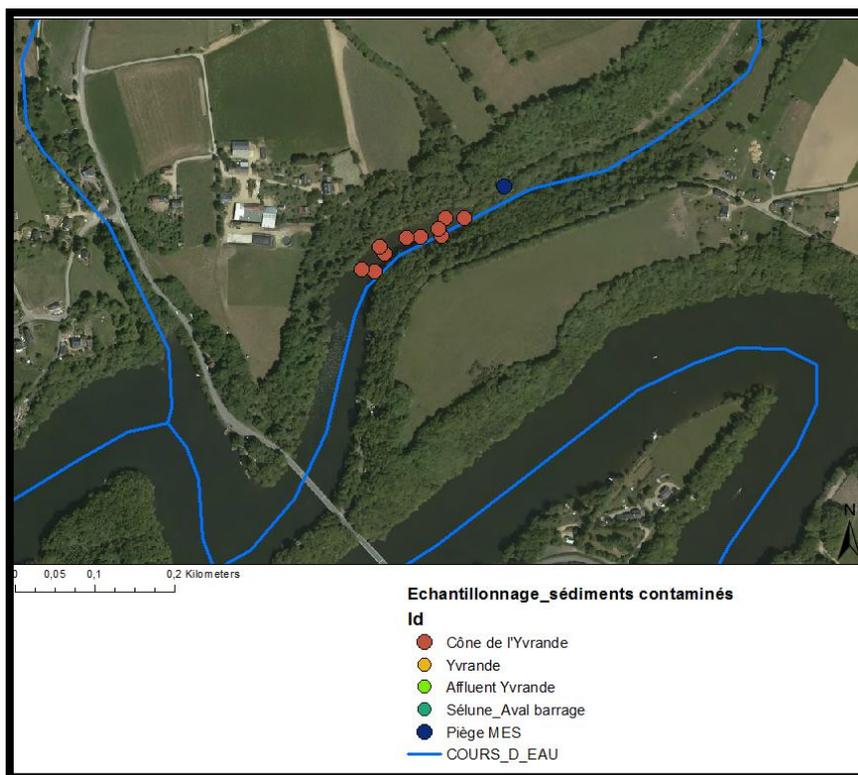


Figure 31 : Localisation des prélèvements dans le cône de l'Yvrande (zoom de la figure 1 sur la zone de confluence dans le barrage)

Les échantillons prélevés ont été séchés au laboratoire à 105°C durant deux jours puis ont été tamisés à 200 µm, avec l'hypothèse raisonnable que cette fraction granulométrique contient les particules les plus susceptibles d'être associées aux métaux lourds. Ce traitement par tamisage permet de mieux comparer les prélèvements entre eux en excluant les éléments plus grossiers d'abondance variable dans la prise d'échantillons et d'augmenter le niveau des concentrations analysées.

Après tamisage chaque échantillon a été divisé en deux parties, une partie a été envoyée pour analyse des métaux lourds au Laboratoire d'Analyse des Sols de l'INRA à Arras, l'autre partie a été utilisée pour l'analyse granulométrique.

L'analyse des métaux lourds est réalisée après destruction de la matière organique à 450°C puis attaque par les acides fluorhydrique et perchlorique. Les acides fluorhydrique et perchlorique sont éliminés par évaporation en fin de réaction, ce qui a pour conséquence l'élimination de la silice sous forme d'acide fluorosilicique (H₂SiF₆). Le dosage des concentrations totales en métaux lourds est ensuite effectué à l'aide d'une ICP AES qui est une chromatographie en phase gazeuse par torche à plasma. La liste des métaux analysés comprend le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le nickel (Ni), le zinc (Zn), qui ont été identifiés comme ayant contaminé le site, auxquels s'ajoutent le cobalt (Co), le plomb (Pb), le thallium (Tl), le molybdène (Mo) et l'arsenic (As) qui étaient proposés dans les mêmes séries d'analyses dans le catalogue d'Arras.

La taille granulométrique des sédiments a été mesurée par un granulomètre laser CILAS 1180 au laboratoire d'Archéoscience de l'Université de Rennes 1, après destruction de la matière organique à l'eau de javel puis ajout d'un dispersant l'hexametaphosphate.

2.1.3 - Résultats

Une moitié environ des échantillons prélevés ont des concentrations en Cd, Cr, Cu, Ni, Zn proches du bruit de fond géochimique et supérieures pour l'autre moitié (Tab.1). Les concentrations des prélèvements ne dépassent jamais les seuils d'autorisation d'épandage des boues de station, mais quelques échantillons ont des concentrations qui dépassent les seuils de la loi sur l'eau.

Tableau 1 : Comparaison des concentrations en métaux des sédiments avec le fond géochimique (IDRA, 2011) et les seuils réglementaires

métal	Concentration (mg/kg de MS)	Bruit de fond géochimique	Seuil S1 (loi sur l'eau)	Seuil d'épandage (boues de station)
Cr	29 à 87	25 à 50	150	1000
Cu	6 à 92	10 à 20	100	1000
Ni	7 à 63	15 à 30	50	200
Zn	24 à 281	30 à 100	300	3000
Cd	0.07 à 3.41	<0.25	2	15
Pb	10 à 30	<20	100	800
Co	2 à 20			
Tl	0.289 à 0.455			
Mo	0.146 à 0.777			
As	3.15 à 6.97		30	

Les cinq métaux contaminants sont fortement corrélés entre eux (Tab.2), ce qui tend à confirmer leur origine commune par la pollution industrielle, même si on ne peut exclure d'autres origines communes et un comportement géochimique similaire. Le molybdène et le plomb, non identifiés comme polluants sur ce site, font aussi partie de ce groupe de métaux corrélés. L'arsenic et le thallium sont beaucoup moins corrélés aux autres métaux. Le thallium n'étant pas utilisé dans l'agriculture et peu utilisé dans l'industrie il est normal qu'il soit peu présent et peu corrélé, l'arsenic n'est pas un métal et peut avoir un comportement différent.

Tableau 2 : Matrice des corrélations des concentrations des différents métaux.
En gras, les coefficients de corrélation pour lesquels P<0,0001

	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Tl	Zn
As	1									
Cd	0,494	1								
Co	0,523	0,444	1							
Cr	0,724	0,798	0,371	1						
Cu	0,562	0,925	0,471	0,838	1					
Mo	0,549	0,818	0,456	0,758	0,888	1				
Ni	0,628	0,901	0,615	0,843	0,949	0,782	1			
Pb	0,561	0,841	0,494	0,821	0,954	0,900	0,900	1		
Tl	0,563	0,521	0,824	0,334	0,456	0,351	0,58	0,399	1	
Zn	0,571	0,931	0,601	0,790	0,960	0,848	0,966	0,923	0,611	1

Compte-tenu de ces corrélations, nous avons choisi d'approfondir l'interprétation des analyses pour deux métaux seulement : le chrome représentatif de tous les autres métaux dont les concentrations sont corrélées à la sienne, et l'arsenic pour son comportement différent.

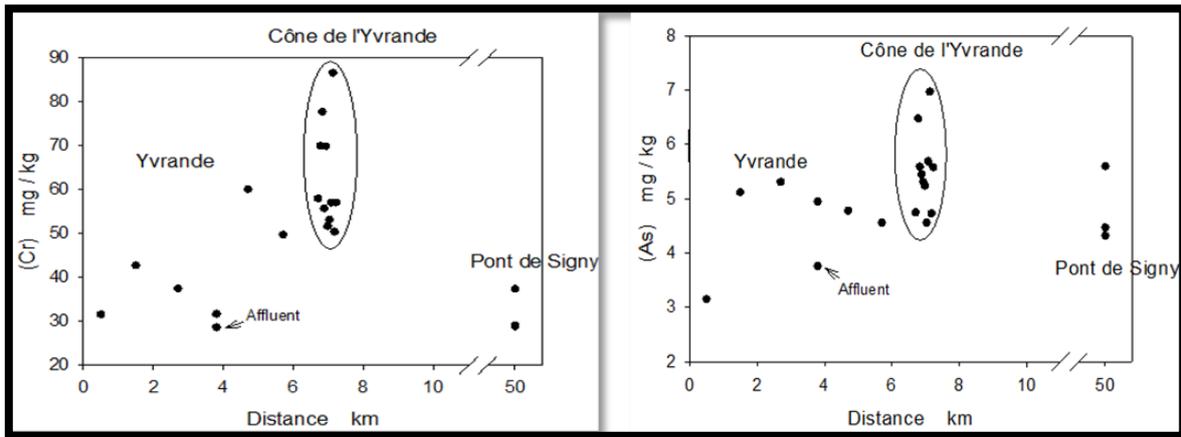


Figure 32 : Evolution des concentrations en chrome (à gauche) et en arsenic (à droite) des échantillons analysés en fonction de la distance à la source de l'Yvrande

Les concentrations en Cr sont plus faibles sur la partie amont de l'Yvrande que dans la partie aval (> 4 km après la source) et dans le cône de sédimentation. Les concentrations ont à nouveau diminué pour les sédiments au Pont de Signy, à l'aval des barrages. Les concentrations en As sont par contre moins variables en fonction de la distance à la source, jusqu'au pont de Signy, mais sont légèrement supérieures au niveau du cône de sédimentation.

Les concentrations en Cr, comme celles de tous les autres métaux fortement corrélés, apparaissent liées assez nettement à la taille granulométrique des échantillons (Fig.33). La corrélation est moins bonne pour l'arsenic mais significative ($p < 0,05$).

L'échantillon prélevé dans l'affluent potentiellement contaminé de l'Yvrande ne présente pas des concentrations particulièrement élevées.

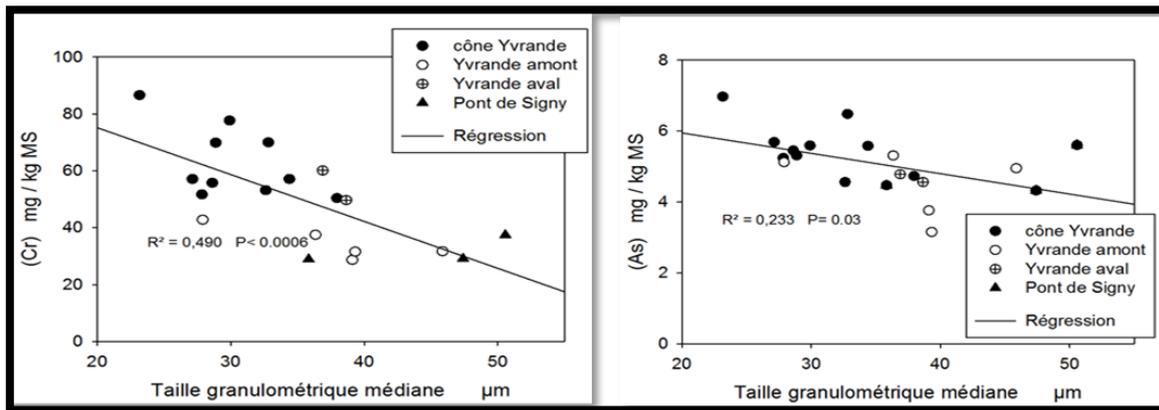


Figure 33 : Evolution des concentrations de Cr et As en fonction de la taille granulométrique médiane des échantillons

Il semble donc que les variations de concentrations observées entre le cône de sédimentation et les sédiments prélevés en amont dans l'Yvrande ou à l'aval des barrages au Pont de Signy soient dues à des différences de taille de particules plus qu'à une contamination.

A l'arrivée dans le lac de Vezins la vitesse de l'eau ralentit brusquement, favorisant à la fois la formation du cône de sédimentation et le dépôt de particules. Les sédiments déposés plus en amont dans le cours d'eau sont dans l'ensemble un peu plus grossiers à cause de conditions hydrauliques plus turbulentes.

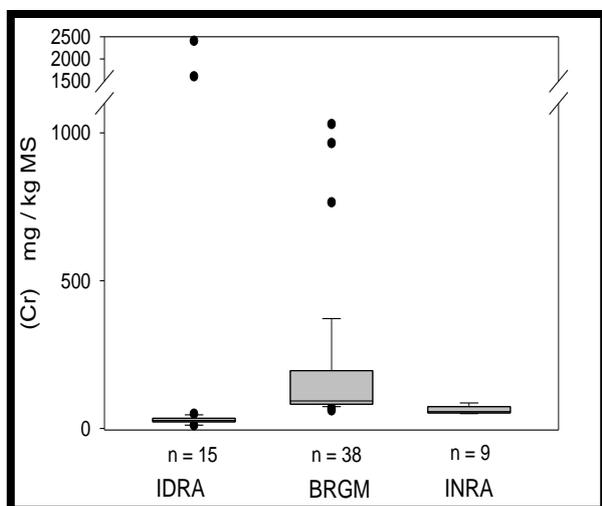


Figure 34 : Box plots des concentrations en Cr (sédiments du cône de l'Yvrande), d'après les études de l'IDRA, du BRGM et de l'INRA.

Les premières études menées par le BRGM et par l'IDRA dans la Sélune² et dans ses affluents³, montraient des concentrations très variables, assez différentes d'une étude à l'autre, ce qui a motivé en partie cette nouvelle étude par l'INRA. Les concentrations que nous avons obtenues sur le cône de sédimentation de l'Yvrande sont globalement un peu plus fortes que celles mesurées par l'IDRA (sauf pour deux de leurs échantillons, très contaminés) et toujours nettement inférieures à celles mesurées par le BRGM (Fig.34).

Des hypothèses peuvent être formulées pour expliquer ces différences :

- Nous avons montré une forte influence de la granulométrie sur les concentrations. Nos échantillons étaient tamisés à 200 μm . Le BRGM et l'IDRA ont réalisé leurs analyses sur la fraction inférieure à 2 mm. Cependant le BRGM a réalisé une analyse granulométrique de cette fraction et montre que 6 à 7% des particules échantillonnées ont une taille supérieure à 250 μm à la surface et au milieu du cône contre 17% en profondeur. Avec cette hypothèse, nos valeurs devraient être supérieures aux valeurs obtenues par l'IDRA mais aussi le BRGM.
- Nos prélèvements ont été réalisés en bordure et en surface du cône de sédimentation. L'IDRA et le BRGM disposaient de carotteurs mécaniques permettant un échantillonnage plus complet du cône. Leurs études ont été réalisées en 2010 ou 2011. Les rejets industriels de métaux lourds étant arrêtés depuis quelques années il est possible que le véritable stock de ces sédiments anciennement contaminés soit situé plus en profondeur dans le cône. Avec cette hypothèse, nos valeurs devraient être inférieures aux valeurs obtenues par le BRGM mais aussi l'IDRA.
- Les analyses sont réalisées en ICP-AES « suivant méthode interne » pour le BRGM, selon la norme NF X 31-147 par le Laboratoire d'Analyses des Sols d'Arras pour l'INRA, et avec une méthode non précisée par Eurofins Environnement pour l'IDRA.

Il est difficile de trancher si la taille granulométrique des prélèvements ou la profondeur d'échantillonnage dans le cône peuvent expliquer les différences de gammes de concentrations observées. Les laboratoires d'analyses différents, avec sans doute des méthodes d'analyses différentes, peuvent aussi contribuer à ces écarts.

² Nicolas PROULHAC, Arnaud MARREC, « EFFACEMENT DES BARRAGES DE LA SÉLUNE, GESTION DES SÉDIMENTS CONTAMINÉS ET PLAN DE GESTION », IDRA Environnement - Avril 2011

³ I. Girardeau, C. Mouvet et P. Bataillard, « Etude de la capacité de libération de contaminants par les sédiments de la Sélune (50) », BRGM/RP-62021-FR, Février 2013

2.1.4 - Conclusion et perspectives

- Conclusion

Il apparaît en tout cas essentiel de contrôler systématiquement la granulométrie des sédiments analysés pour expliquer la variabilité de contamination déjà mise en évidence sur le site des barrages. Par ailleurs une estimation plus précise du stock de métaux lourds contenus dans la totalité du cône de l'Yvrande peut être nécessaire du fait des différences de résultats entre les études actuelles.

Cependant non seulement la contamination des sédiments de l'Yvrande apparaît limitée par rapport aux seuils réglementaires, mais le volume de sédiments potentiellement contaminés est vraisemblablement très faible. S'il était à nouveau mobilisé par les crues lors de l'arasement des barrages, il serait mélangé avec les flux de sédiments issus du bassin tout entier de la Sélune. Rappelons que la surface du bassin versant de l'Yvrande représente moins de 2% de la surface totale du bassin versant de la Sélune. Les inquiétudes d'une partie de la population face à cette contamination apparaissent peu fondées.

Cette campagne de prélèvements, visant à mieux caractériser la contamination des sédiments de l'Yvrande, était une campagne préliminaire, l'objectif final étant de mettre en place un contrôle des sédiments, des matières en suspension et de l'eau à l'aval des barrages, pendant les phases de leur arasement.

- Perspectives

Les flux hydriques, sédimentaires et chimiques (PO_4 , NO_3 , NO_2 , SO_4 , Cl, Si pour la phase dissoute, et C, N, P pour la phase particulaire) sont mesurés à la station installée par l'INRA au pont de Signy, sur la Sélune, 4 km à l'aval des barrages. Il pourrait être intéressant de compléter ce dispositif pour contrôler la mobilité éventuelle des contaminants métalliques dans les matières en suspension et dans les eaux. Pour assurer un contrôle continu dans le temps mais limiter aussi le nombre d'analyses de métaux lourds à réaliser, nous proposons d'utiliser des dispositifs susceptibles d'intégrer la qualité de l'eau sur une durée d'une à plusieurs semaines.

- Echantillonneur de MES (Fig.35) : pour collecter les particules en suspension nous avons fabriqué un piège à sédiments à l'aide d'un tuyau droit d'environ 1 m de longueur et d'un entonnoir, le tout en PVC. Durant le stage, il a été placé à l'entrée du cône de l'Yvrande, solidement fixé par une armature métallique et relevé une fois par semaine. Il pourra être ensuite utilisé à l'aval des barrages.

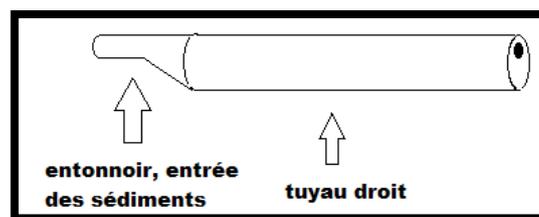


Figure 35 : Schéma de l'échantillonneur passif

L'eau chargée en MES entre par l'entonnoir et ressort par le trou à l'autre bout du tuyau. Les MES se déposent dans le tuyau, du fait du ralentissement de la vitesse de l'eau. Même si une partie seulement des MES se retrouve piégée dans le tuyau, ce dispositif permet un échantillonnage à peu près représentatif des particules qui transitent dans le cours d'eau.

- Echantillonneur intégratif pour l'eau : nous proposons un échantillonneur intégratif passif commercialisé par DGTresearch⁴. Il consiste en une armature en plastique avec à la surface une membrane filtrante et un gel de diffusion. Les métaux lourds s'adsorbent sur une couche de résine qui est ensuite récupérée pour analyse des métaux accumulés.

⁴ www.DGTresearch.com

2.2 - Bilan des caractéristiques hydrochimiques des eaux souterraines sur le bassin versant de la Sélune à proximité des barrages (Campagne de juin 2015)

2.2.1 – Contexte

En juin 2015 une campagne de prélèvement des eaux souterraines a été réalisée sur le bassin versant à proximité des barrages de Vezins et de la Roche qui Boit. L'objectif de cette campagne de mesure était triple :

- Avoir un état initial de la qualité des eaux souterraines de la zone avant les travaux d'arasement des barrages de façon à pouvoir en identifier si besoin les impacts
- Mieux comprendre les relations entre la nappe souterraine et la rivière de façon à pouvoir apporter des éléments de réponse aux éventuelles variations observées sur la qualité de l'eau de la rivière suivie par le groupe Dynamique fluviale
- Avoir un état des lieux des concentrations en métaux lourds des eaux souterraines de façon à vérifier la présence ou non d'anomalies naturelles en métaux lourds

2.2.2 - Matériel et méthodes

Les points prélevés et les caractéristiques de terrain sont répertoriés sur le tableau et la carte suivante.

Tableau 3: Points prélevés et caractéristiques de terrain

Commune	code	Niveau d'eau (m)	Mode de prélèvement	Temp. (°C)	pH	Cond. (µS/cm)	Eh (mV)	O2 dissous (mg/l)
Parigny	PAR-P	nd	Robinet	12.5	6.1	240	176.2	9.59
Ducey - La Goberdière – F2	GOB-F	1	Préleveur à bille	13.8	6.46	273	178.2	3.36
Ducey - La Goberdière- puits à drains	GOB-D	1,5-2	Robinet	16	6.5	347	68.9	2.2
Ducey - La Goberdière – nouveau piézo	GOB-Pz	1.61	Préleveur à bille	13.8	6.09	281	171	2.3
Ducey - Bas Jardin -	DUC-P	0.75	Préleveur à bille	14.4	5.95	352	209	3.94
Ducey - Bas Jardin -	DUC-F	nd	Robinet	14.3	6.26	289	38.5	2.4
Les Loges Marchis – La Courtinière -	COU-S	4.83	Robinet ?	nd	5.8	230	181	9.3
Saint Brice des Landelles - le bas cerisier -	BRI-S	nd	trop-plein	nd	6.05	259	156	8.7
Les Loges Marchis – La Courtinière -	COU-F	nd	Robinet	nd	5.7	182	176	5.8
Saint Martin de Landelle - Bois Avenel -	MAR-S	1.71	Préleveur à bille	nd	6.08	256	148	7.8

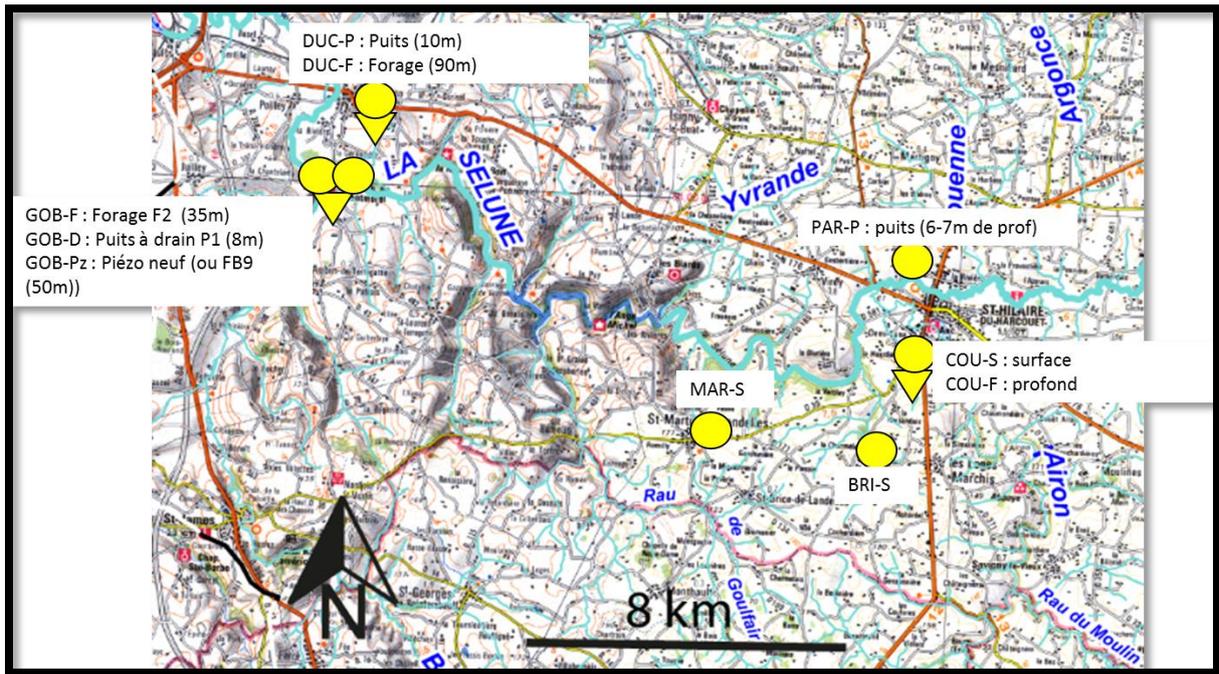


Figure 36 : Localisation des points prélevés

Sur l'ensemble de ces points ont été analysés les éléments suivants :

Tableau 4: Eléments analysés sur les échantillons prélevés

Majeurs	Traces			
HCO ₃ ⁻	Li	Ni	Cs	Tb
Cl ⁻	B	Cu	Ba	Dy
NO ₃ ⁻	Al	Zn	La	Ho
SO ₄ ⁻	Si	As	Ce	Er
Ca ⁺⁺	V	Rb	Pr	Tm
Mg ⁺⁺	Cr	Sr	Nd	Yb
Na ⁺	Mn	Y	Sm	Lu
K ⁺	Fe	Mo	Eu	Pb
SiO ₂	Co	Cd	Gd	U

2.2.3 - Résultats

- **Caractéristiques hydrochimiques :**

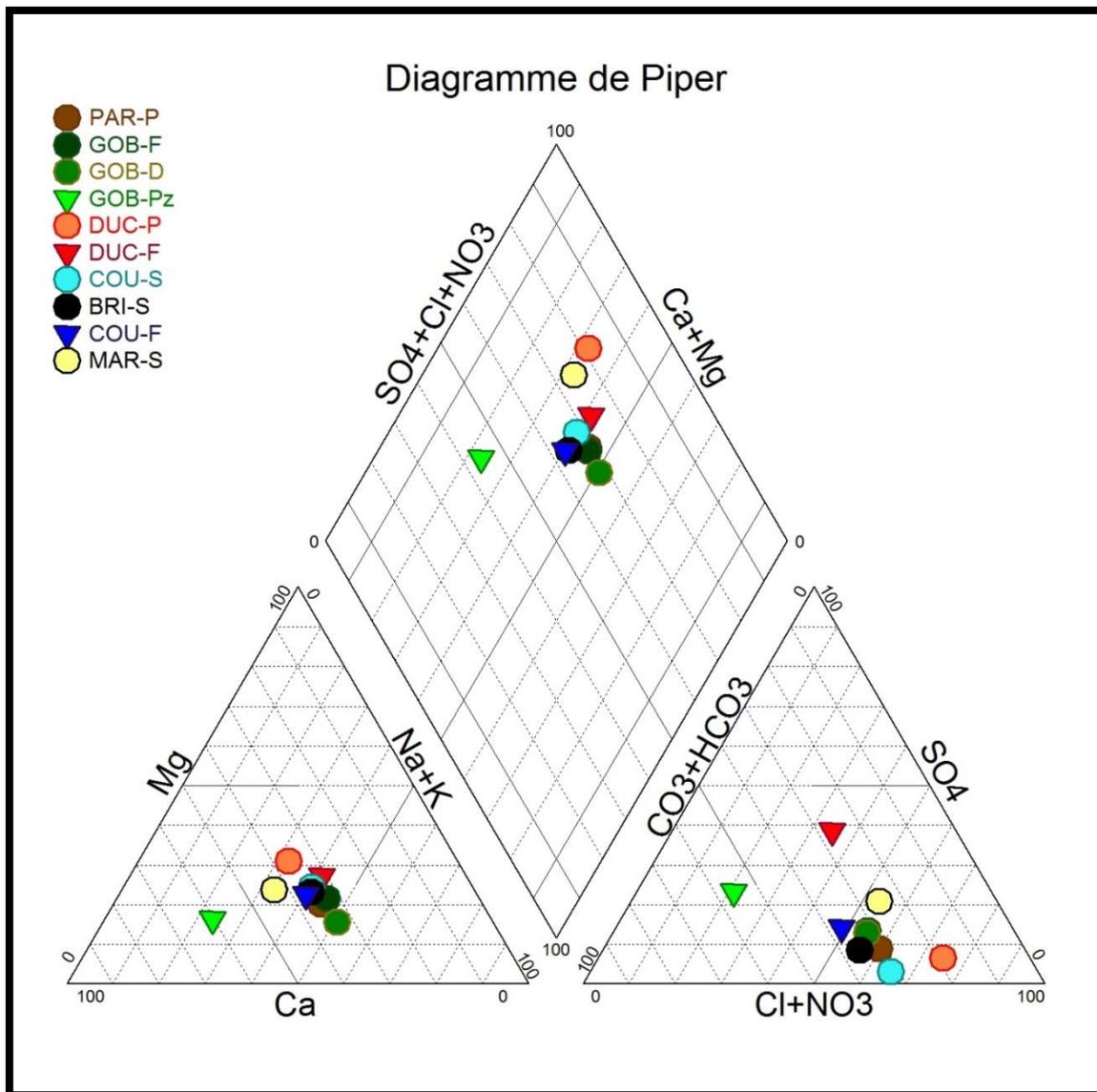


Figure 37 : Diagramme de Piper des eaux échantillonnées

Le diagramme de Piper montre une assez forte homogénéité des caractéristiques des eaux souterraines, seul le nouveau piézomètre du site de la Goberdière qui prélève une eau à 50m de profondeur semble se distinguer fortement par ses concentrations en calcium plus élevées et ses concentrations en nitrate faibles.

Les ouvrages superficiels de Ducey (DUC-P) et Saint-Martin des Landelles (MAR-S) se distinguent légèrement des autres points en particulier par de leur faible concentration en HCO_3 relativement à leur teneur en NO_3 .

- **Cartographie des concentrations en nitrate**

La carte ci-après présente les concentrations en nitrate mesurées en juin 2015 sur les points prélevés.

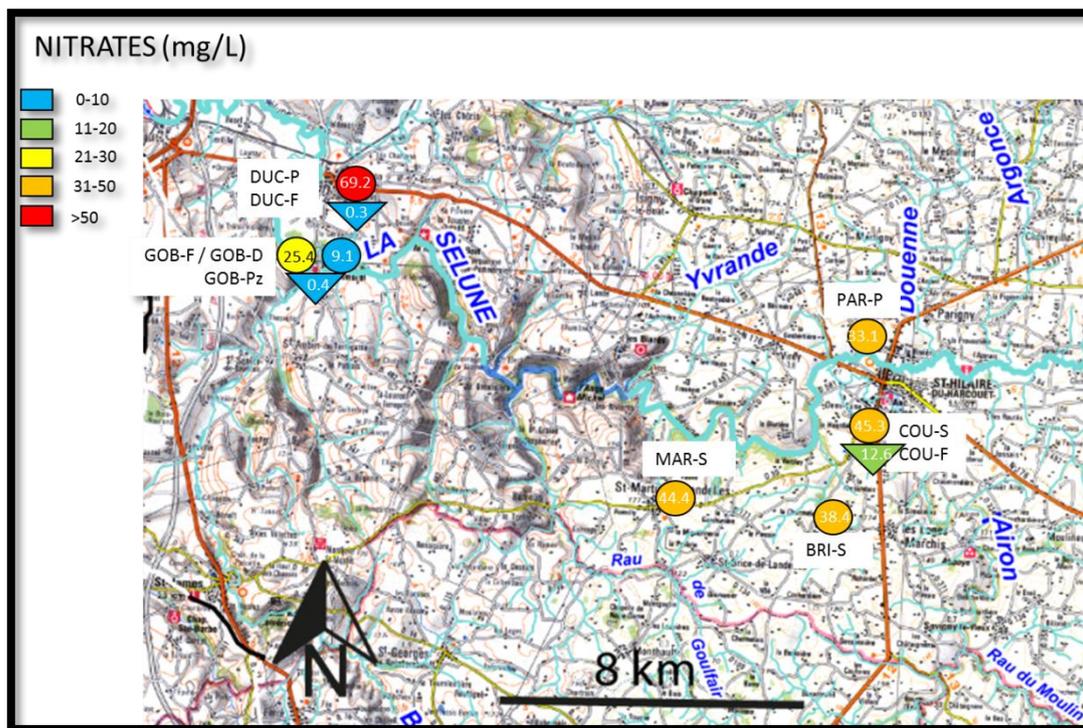


Figure 38 : Carte des concentrations en nitrate (Juin 2015)

On remarque une forte variabilité avec des valeurs quasi nulles de 0,4 mg/L dans GOB-Pz (qui est le nouveau piézomètre) à 69,2 mg/L dans le puits situé à Ducey. Les concentrations dans les ouvrages superficiels (puits et sources) sont plus élevées que les ouvrages profonds, ce qui est classiquement observé dans cette région. Les concentrations moyennes autour de 30-40 mg/L dans les eaux superficielles sont cohérentes avec celles observées dans la rivière (cf. Chap 1 : étude des flux hydriques sédimentaires et chimiques).

On n'observe pas de réelle évolution est-ouest d'autant plus que le nombre de points échantillonnés reste limité pour conclure.

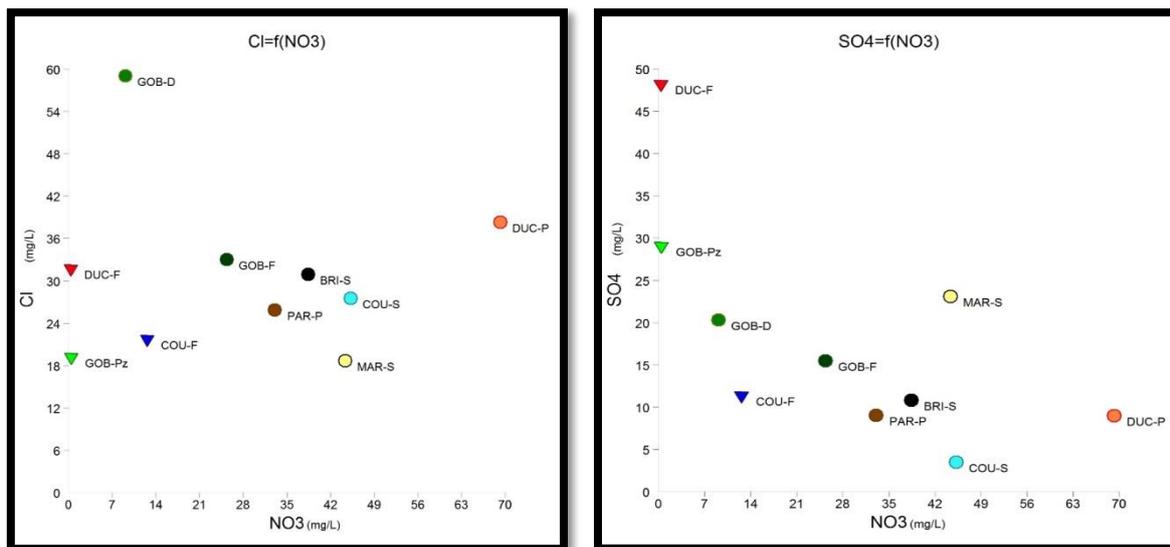


Figure 39 : Concentrations en chlorure et en sulfate (mg/L) en fonction du nitrate (mg/L)

La comparaison des concentrations en nitrate et en chlorure (Fig.39) montre une légère relation positive (augmentation des teneurs en nitrate liée à une augmentation des teneurs en chlorure) qui est classiquement observée en contexte agricole : les engrais contiennent non seulement du nitrate mais également du chlorure. Seul le puits à drain de la Goberdière (GOB-D) montre une concentration en chlorure importante avec des concentrations en nitrate faibles. Une autre source de chlorure sera donc à rechercher éventuellement.

Une relation négative nette existe entre les concentrations en nitrate et en sulfate (diminution des teneurs en nitrate liée à une augmentation des teneurs en sulfate). Cette relation est caractéristique des processus de dénitrification dits autotrophes (par interaction du nitrate avec les minéraux soufrés de la roche). Néanmoins pour les points profonds (GOB-Pz, DUC-F) les concentrations en sulfate peuvent également être le résultat d'interactions eau-roche plus longues. D'autres investigations (datation, isotopie) pourraient permettre de faire la part des choses entre sulfates issus de la roche ou liés à la dénitrification.

- **Autres éléments chimiques (métaux lourds) :**

Une pollution aux métaux lourds a été identifiée dans les sédiments de l'Yvrande et dans les retenues. De façon à apporter des éléments supplémentaires dans la compréhension de cette pollution et son éventuelle migration, les métaux lourds ont également été analysés sur les eaux souterraines échantillonnées (voir annexe pour les résultats bruts).

Aucune eau prélevée ne présente des concentrations supérieures aux normes de potabilité pour les eaux destinées à la production d'eau potable (Annexe II de l'arrêté du 11/01/2007). La seule campagne de juin 2015 ne permet pas de conclure sur l'origine naturelle ou non de ces valeurs en métaux lourds mais elle permet un premier état des lieux des concentrations dans les eaux souterraines et de mettre en évidence quelques points avec des signatures spécifiques.

Fer : l'ouvrage profond à Ducey (DUC-F) et le puits à drain de la Goberdière (GOB-D) présentent des concentrations en fer assez importantes : >5 mg/L et 0,9 mg/L respectivement alors que la moyenne est de 0,02 mg/L sur les autres ouvrages.

Cadmium : l'ouvrage de Parigny (PAR-P) présente une concentration en cadmium de 0,6µg/L, valeur 10 fois supérieure à la moyenne sur les autres points (0,05µg/L). Le nouvel ouvrage à la Goberdière (GOB-Pz) présente une concentration intermédiaire de 0,148µg/L.

Chrome : les valeurs en chrome sont variables dans les eaux souterraines de 0.033 µg/L dans le forage de Ducey (DUC-F) à 0.733µg/L dans la source de Saint-Martin-des-Landelles (MAR-S). La moyenne est de 0.238 µg/L sur l'ensemble des points prélevés.

Cuivre : 5 points dépassent le milligramme par litre (PAR-P, GOB-F, GOB-D, DUC-F et BRI-S), MAR-S et GOB-Pz sont proches du milligramme par litre.

Nickel : le forage de Ducey (DUC-F) présente une concentration de 21µg/L largement supérieures aux autres points dont la moyenne est de 4,2 µg/L.

Plomb : les ouvrages de Parigny (PAR-P) et Saint-Brice-des-Landelles (BRI-S) présentent des valeurs significativement plus élevées (6,5 et 1,3 µg/L respectivement) que les autres ouvrages (moyenne de 0,1µg/L).

Zinc : la source de Parigny a des valeurs 10 fois plus élevées que les autres ouvrages (208 µg/L pour une moyenne de 27,6µg/L)

Ces concentrations en métaux, même si certaines valeurs paraissent importantes, restent largement en dessous des seuils de potabilité réglementaires. Par contre les contrastes observés marquent clairement des signatures géochimiques spécifiques pour certains points qui aideront à comprendre les interactions entre les différentes masses d'eau et potentiellement à mieux contraindre les éventuels transferts de métaux des sédiments vers la nappe s'ils existent.

2.2.4 - Conclusion

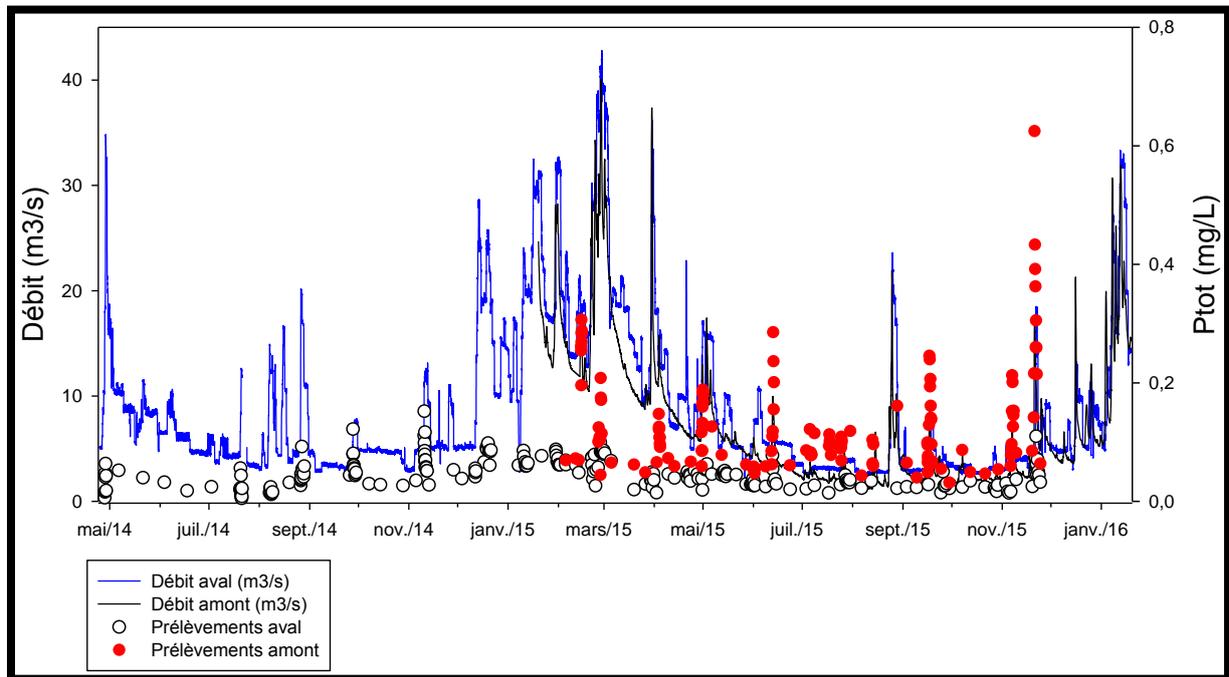
Cette étude est une première approche : une seule campagne d'analyse a été réalisée à l'heure actuelle. Or les eaux souterraines sont certaines fois fortement influencées par le cycle hydrogéologique, et les caractéristiques en basses-eaux (étiages) peuvent différer des valeurs en hautes-eaux. En outre, le nombre de points échantillonnés par rapport à l'échelle de la zone étudiée reste assez faible et il pourrait être intéressant de disposer d'un maillage d'ouvrages plus important tant géographiquement qu'en fonction de la profondeur. Ce maillage plus serré géographiquement et temporellement permettrait également de mieux aborder les relations nappes/rivière.

Cette étude est néanmoins un premier état des lieux prometteur des caractéristiques chimiques des eaux souterraines. Les résultats montrent des signatures contrastées entre la profondeur et la surface, et entre les ouvrages prélevés, ce qui devrait permettre à terme de mieux comprendre le fonctionnement du bassin versant et de suivre l'impact d'un éventuel changement de régime hydrologique.

Références bibliographiques

- Aubert A., 2013. Analyse des motifs temporels d'une chronique décennale haute-fréquence de qualité de l'eau dans un observatoire agro-hydrologique : Méthodologies, typologies et processus. Thèse de doctorat, Agrocampus Ouest, 198 p.
- Bohlin HS., Morth M Carl., Holm G N., 2006. Point source influences on the carbon and nitrogen geochemistry of sediments in the Stockholm inner archipelago, Sweden. *The Science of the Total Environment*, Volume 366 : 337-349.
- Clerc A., Etude préliminaire au suivi de la contamination en métaux lourds des sédiments de l'Yvrande, 2015 Mémoire de Master 1, Université de Rennes 1. 11 p.
- Dupas R., Tavenard R., Fovet O., Gilliet N., Grimaldi C., Gascuel-Oudou C., 2015. Identifying seasonal patterns of phosphorus storm dynamics with Dynamic Time Warping. *Water Resources Research*.
- Dupas R., Gruau G., Gu S., Humbert G., Jaffrezic A., Gascuel-Oudou C., 2015. Groundwater control of biogeochemical processes causing phosphorus release from riparian wetlands. *Water Resources Research*, Volume 84 : 307-314
- Friedl G., Wuest A., 2002. Disrupting biogeochemical cycles - Consequences of damming. *Aquatic Sciences* 64(1): 55-65.
- Girardeau I., Mouvet C., Bataillard P., 2013 « Etude de la capacité de libération de contaminants par les sédiments de la Sélune (50) », BRGM/RP-62021-FR.
- Harrison J. A., Maranger R. J., Alexander R. B., Giblin A. E., Jacinthe P. A., Mayorga E., Seitzinger S. P., Sobota D. J., Wollheim W. M., 2009. The regional and global significance of nitrogen removal in lakes and reservoirs. *Biogeochemistry* 93(1-2): 143-157.
- Jossette G., Leporcq B., Sanchez N., Philippon X., 1999. Biogeochemical mass-balances (C, N, P, Si) in three large reservoirs of the Seine Basin (France). *Biogeochemistry* 47(2): 119-146.
- 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
- Martin C., Aquilina L., Gascuel-Oudou C., Molenat J., Faucheux M., Ruiz L., 2004. Seasonal and interannual variations of nitrate and chloride in stream waters related to spatial and temporal patterns of groundwater concentrations in agricultural catchments. *Hydrological Processes*, 18, 1237-1254.
- Mellander PE., Jordan P., Shore M., McDonald NT., Wall DP., Shortle G., et al., 2016. Identifying contrasting influences and surface water signals for specific groundwater phosphorus vulnerability. *Science of the Total Environment* 2016; 541: 292-302.
- Molenat J., Gascuel-Oudou C., Ruiz L., Gruau G., 2008. Role of water table dynamics on stream nitrate export and concentration. in agricultural headwater catchment (France). *Journal of Hydrology*, 348, 363-378.
- Passy P., Garnier J., Billen G., Fesneau C., Tournebize J., 2012. Restoration of ponds in rural landscapes: Modelling the effect on nitrate contamination of surface water (the Seine River Basin, France). *Science of the Total Environment* 430: 280-290.
- Proulhac N., Marrec A., 2011 « Effacement des barrages de la sélune, gestion des sédiments contaminés et plan de gestion », IDRA Environnement.
- Vanmaercke M., Poesen J., Verstraeten G., de Vente J., Ocakoglu F., 2011. Sediment yield in Europe: Spatial patterns and scale dependency. *GEOMORPHOLOGY*, Volume 130, Issue: 3-4 : 142-161.
- 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.

- **Phosphore total**



- **Sulfate**

