



Réserve Naturelle  
LAC DE REMORAY



## Etude des flux de contaminants transférés vers le lac de Remoray par ses affluents



Etude réalisée par TELEOS-Suisse

DEGIORGI François (rapporteur)  
DECOURCIERE Hervé  
PARIS Jonathan  
PERIAT Guy



et

la RNN de Remoray (échantillonnage et logistique)

TISSOT Bruno  
CLAUDE Jocelyn  
MAZUEZ Céline  
GENS Hadrien  
BERNARD Anaëlle

Avril 2018

# Sommaire

<b>I. INTRODUCTION .....</b>	<b>4</b>
I-1. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE .....	4
I-2. OBJECTIFS DE L'ETUDE .....	6
I-3. DISPOSITIFS ET MODALITES SPATIO-TEMPORELLES DE L'ETUDE .....	7
 <b>II. CONCENTRATIONS NUTRIMENTIELLES ET ORGANIQUES DANS L'EAU .....</b>	 <b>9</b>
II-1. METHODOLOGIE .....	9
<i>Maille spatio-temporelles d'échantillonnage .....</i>	<i>9</i>
<i>Choix des indicateurs de la chimie de l'eau .....</i>	<i>9</i>
<i>Guides d'interprétation .....</i>	<i>10</i>
II-2. INDICATEURS DE CONTAMINATIONS ORGANIQUES .....	11
<i>Carbone organique total des afférences principales.....</i>	<i>11</i>
<i>Proportion de carbone organiques dissous dans les afférences principales.....</i>	<i>11</i>
<i>Carbone organique total et dissous des cours d'eau apicaux.....</i>	<i>12</i>
II-3. INDICATEURS DE CONTAMINATIONS NUTRIMENTIELLES.....	13
<i>Contamination azotée des afférences principales.....</i>	<i>13</i>
<i>Contamination azotée des cours d'eau apicaux.....</i>	<i>14</i>
<i>Contaminations des afférences principales en phosphore.....</i>	<i>15</i>
<i>Contaminations des cours d'eau apicaux en phosphore.....</i>	<i>16</i>
II-4. BILAN SUR LES INDICATEURS DE POLLUTIONS ORGANIQUE ET NUTRIMENTIELLES .....	17
<i>Gamme et dynamique des contaminations .....</i>	<i>17</i>
<i>Biodégradabilité de la MO.....</i>	<i>17</i>
<i>Comparaison avec les données antérieures .....</i>	<i>19</i>
 <b>III. CONTAMINATION ORGANIQUE ET NUTRIMENTIELLE DES MES .....</b>	 <b>21</b>
III-1. METHODOLOGIE.....	21
<i>Objectifs et stratégie mise en œuvre.....</i>	<i>21</i>
<i>Sondes turbidité et conductivité.....</i>	<i>21</i>
<i>Pièges à MES.....</i>	<i>23</i>
<i>Analyses des MES.....</i>	<i>23</i>
III-2. DYNAMIQUES DE TRANSFERT DES MES DANS LES TROIS AFFERENCES PRINCIPALES .....	24
<i>Variations de turbidité et de minéralisation du Lhaut aval .....</i>	<i>24</i>
<i>Variations de turbidité et de minéralisation de la Drésine aval.....</i>	<i>26</i>
<i>Variations de turbidité et de minéralisation du Ru de Remoray aval.....</i>	<i>27</i>
III-3. CONTAMINATIONS ORGANIQUES ET NUTRIMENTIELLES DES MES .....	30
<i>Composition des MES du Lhaut aval .....</i>	<i>30</i>
<i>Composition des MES de la Drésine.....</i>	<i>31</i>
<i>Composition des MES du Ruisseau de Remoray .....</i>	<i>33</i>

III-4. APERÇU DES CONTAMINATIONS EN MICROPOLLUANTS DES MES .....	35
<i>Contamination métalliques des MES et des sédiments</i> .....	35
<i>Contamination des MES et des sédiments en HAP</i> .....	36
<i>Contamination des MES et des sédiments en pesticides</i> .....	37
<b>IV. FLUX DE MO ET DE NUTRIMENTS ARRIVANT AU LAC .....</b>	<b>39</b>
IV-1. METHODOLOGIE.....	39
<i>Mesures et calcul hydrologiques</i> .....	39
<i>Calcul des flux</i> .....	39
IV-2. APPROCHE HYDROLOGIQUE .....	40
<i>Jaugeages</i> .....	40
<i>Enregistrement des niveaux des niveaux</i> .....	41
<i>Evaluation des débits moyens annuels</i> .....	42
IV-3. FLUX ORGANIQUES ET NUTRIMENTIELLES ANNUEL.....	44
<i>Flux de fin aout 2016 à fin aout 2017 : année sèche</i> .....	44
<i>Corrections partielles et prises en compte des variations climatiques</i> .....	45
<i>Essai d'interprétation et d'appréciation des tendances évolutives</i> .....	46
<b>V. SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>48</b>
V-1. CONTAMINATION DES AFFÉRENCES ET FLUX POLLUANTS .....	48
<i>Bilan sur la contamination organique et nutrimentielle des afférences</i> .....	48
<i>Bilan sur les transferts de matière organique et de nutriments</i> .....	48
<i>Bilan sur les contamination des afférences par des micropolluants</i> .....	48
V-2. RECHERCHE DES SOURCES DE CONTAMINATIONS ET DE LEUR TRANSFERTS.....	49
<i>Sources de contamination</i> .....	49
<i>Mécanisme de transferts</i> .....	50
<i>Réduction et appauvrissement des zones tampons</i> .....	51
V-3. RECOMMANDATIONS POUR LA REDUCTION DES FLUX ET L'INSTAURATION D'UN SUIVI .....	52
<i>Investigations complémentaires à entreprendre</i> .....	52
<i>Propositions d'amélioration de la gestion du bassin versant</i> .....	53
<i>Propositions de restauration des zones tampons et des capacités d'autoépuration</i> .....	53
<i>Dispositif de suivi recentré</i> .....	54
V-4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....	55
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>56</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>59</b>

# Etude des flux de contaminants transférés vers le lac de Remoray par ses affluents

## I. Introduction

### I-1. Contexte et problématique

La Réserve Naturelle Nationale (RNN) du Lac de Remoray se situe à quelques kilomètres au sud de Pontarlier (25), au cœur de la Haute-Chaîne jurassienne. Nichée au sud d'une dépression synclinale calcaire tapissée de dépôts morainiques, elle est constituée d'une mosaïque de biotopes forestiers, humides et aquatique. Le lac de Remoray et la partie aval de ses tributaires ainsi que leurs affluents composent un ensemble de milieux humides à fort intérêt patrimonial (fig. 1).



Figure 1. Délimitation de la RNN du Lac de Remoray et localisation des ses tributaires (modifié d'après <http://www.maisondelareserve.fr>)

Le lac Remoray s'étend dans la partie sud-ouest à une altitude de 850 m (tab.1). Ce plan d'eau de 96 ha pour 29 mètres de profondeur maximale est alimenté par deux tributaires principaux et un affluent mineur. Il occupe avec le lac Saint Point un synclinal bordé de crêts culminant entre 900 et 1174 mètres. Ce secteur jouit d'un climat semi-continentale humide pluvieux et rigoureux (tab. 1).

<b>Stations météo</b>	<b>Descripteur Paramètre</b>	<b>T° (air) Moyenne an. °C</b>	<b>Jours de gel (air) Cumul an. nb de jours</b>	<b>Précipitations Moyenne an. mm</b>
<b>Labergement (880 m)</b>		7,1	144	1440
<b>Mouthe (1040 m)</b>		6,3	169	1685
<b>Point culminant du BV (1186 m)</b>				1880

Tableau 1. Principales caractéristiques climatiques de la RNN du lac de Remoray

Ses tributaires assurent son renouvellement selon une période variant de 4 à 8 mois (Telles 2005).

1. Le Lhaut s'étend sur 4,5 kilomètres, mais son débit moyen dépasse 400 L/s.
2. La Drésine s'écoule sur 15 kilomètres et collecte plusieurs petits ruisseaux dont celui de Remoray, celui du Petit Bief et celui des Vurpillières ; son débit ne dépasse guère 250 L/s.
3. La Bonne Fontaine est un ruisseau dont le linéaire n'atteint que 827 m et dont le débit ne dépasse pas quelques litres secondes en moyenne.
4. L'émissaire du lac, la Taverne, rejoint rapidement le Doubs juste avant que celui-ci ne se jette dans le lac Saint Point ; lorsque les niveaux du Doubs sont très eau, il arrive qu'il alimente le lac, sans que sa contribution puissent être déterminée avec précision.

Le bassin versant du chevelu hydrographique alimentant le lac s'étend sur environ 27 km<sup>2</sup>. Bordé de points culminants échelonnés entre 944 et 1186 m, il est recouvert de forêts et de prairies ainsi que d'une proportion non négligeable de tourbières et de bas-marais composant une mosaïque de milieu à fort intérêt patrimonial potentiel.

Cependant, sur ce petit bassin versant rural et forestier, pourtant peu densément peuplé, des sources de contaminations potentiellement toxiques ont été suspectées ou identifiées depuis longtemps (Degiorgi 1994, Teleos 2005, fig. 2).

En particulier, la scierie de Boujon a pollué la Drésine durant au moins une quarantaine d'années (Adam 2008) jusqu'à sa fermeture en 2009. Parallèlement, entre 2004 et 2005, des flux de nutriments et de matières organiques excédentaires ont été mesurés dans le Ruisseau de Remoray, la Drésine et, en moindre mesure, dans le Lhaut (Teleos 2005). Enfin, de fortes teneurs en métaux, en hydrocarbures aliphatiques et en HAP décelées dans les sédiments de la partie basale du Ru de Remoray inclinent à suspecter des contaminations en provenance de l'ancienne décharge enterrées à proximité du ruisseau.

Par conséquent, le lac est susceptible de recevoir, par l'intermédiaire de ses affluents, un flux important de pollution organique ou/et nutritive, d'origine domestique, agricole et agro-alimentaire ainsi que des contaminations à effet potentiellement toxiques pour la faune et la flore aquatiques (ELOY et GOGUILLY 2000, ADAM 2001, Teleos 2005).

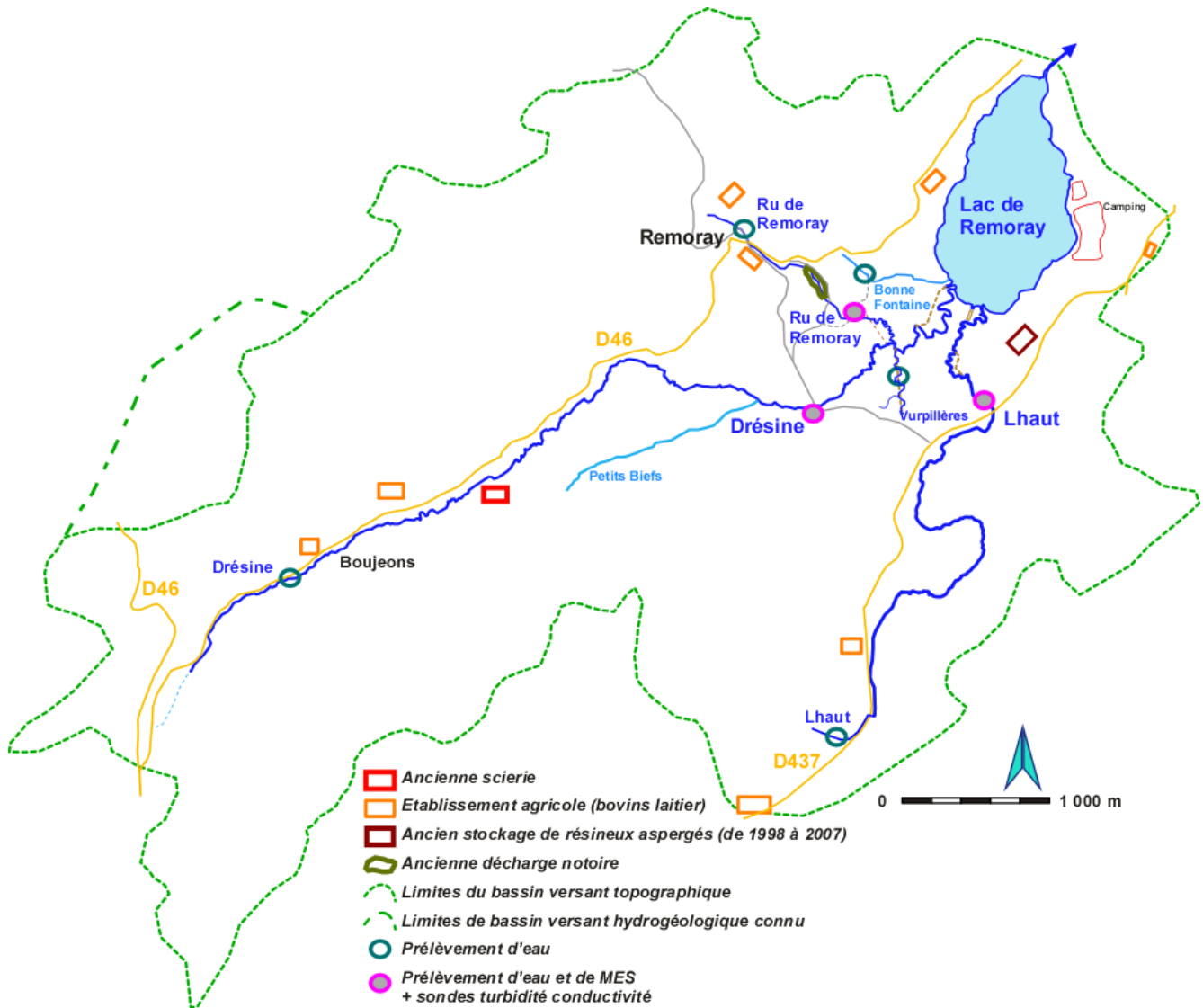


Figure 2. Localisation des pressions anthropiques connues sur le bassin versant du lac de Remoray ainsi que des stations de mesures et d'échantillonnage.

## I-2. Objectifs de l'étude

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est de caractériser l'importance, la nature et les variations spatio-temporelles des flux de contaminants parvenant au lac de Remoray depuis son bassin versant, *via* ses affluents. Cet objectif se décline selon le type de polluant et les matrices de transferts en 4 axes d'investigations et de recherches :

1. Quantifier les flux de nutriments (azote total : Nt ; phosphore total : Pt ; carbone organique total : Cot) arrivant dans le lac au cours d'un cycle annuel, en prenant en compte la variabilité de ces apports, et en particulier les pics de concentrations.
2. Distinguer les apports arrivant au lac sous formes particulières par le biais de l'étude des flux en MES et de leur teneur en Nt, P et Cot.
3. Evaluer les contaminations en micropolluants peu solubles (ETM, HAP pesticides), à la fois dans les sédiments des cours d'eau et dans les MES.
4. Différencier les apports relatifs des ruisseaux drainant la partie la plus anthropisée du bassin versant: le Lhaut et la Drésine, ainsi que son affluent majeur, le Ru de Remoray.

### I-3. Dispositifs et modalités spatio-temporelles de l'étude

Pour atteindre ces différents objectifs, l'étude a consisté d'abord à rechercher les contaminations organiques et nutritives dans l'eau et les MES des 3 cours d'eau, drainant plus de 95% du bassin versant : le Lhaut, la Drésine et le Ruisseau de Remoray. Pour chacun de ces trois cours d'eau, la majorité des prélèvements ont été réalisés sur leur partie aval, à l'entrée de la RNN (fig. 2, tab. 2).

Investigations	Lhaut RNN	Drésine RNN	Ru Remoray RNN	5 sites amont
Analyses aléatoires C, N, P	18	18	18	40
Analyses C, N, P durant les crues, à 4 reprises	16	15	16	
Sondes YSI turbidité conductivité toutes les 30 mn	1	1	1	
Analyses de MES piégées	6	6	6	
Jaugeages des débits	6	6	6	20

Tableau 2. Bilan des investigations réalisées en août 2016 et décembre 2017 sur les affluents et contraffluents du lac de Remoray

Les échantillons d'eau ont été prélevés suivant 2 mailles temporelles :

- Une maille d'un prélèvement toutes les trois semaines environ (soit 19 prélèvements par an) a permis d'évaluer les tendances moyennes ainsi que les gammes de variations courantes en matière de concentration en matière organique et en sels minéraux ;
- Un quadruple suivi des épisodes de crue advenant après une période d'étiage, à raison de 4 prélèvements toutes les 2 heures après le début de chaque crue, a servi à évaluer la gamme de concentrations organiques et nutritives durant les lessivages.

Tous les prélèvements d'eau ont été effectués par l'équipe permanente de la RNN. En effet, leur base très proche des cours d'eau leur a permis de prélever aux bons moments et à moindres coûts. En outre, leur connaissance du bassin versant leur a permis de relier les périodes de prélèvement avec la chronologie de certaines perturbations ou pression d'origine anthropique (épandages agricoles, éventuels débordements des collecteurs d'Eau Usée, incidents routiers ...).

En outre, à titre exploratoire, 8 prélèvements d'eau ont également été réalisés dans les parties apicales du chevelu hydrographique. Les ruisseaux des Vurpillières et de Bonne Fontaine, dont le bassin versant, de petite taille, est presque complètement constitué de marais et de forêt, ont été également concernés par des prélèvements.

Parallèlement, les concentrations et les flux en matière organique et en nutriments des matières en suspension ont également été mesurées pour chacun des 3 cours d'eau. Pour cette matrice solide, le dispositif d'étude fut composé de 2 procédés complémentaires, installées dans chacune des 3 stations et obéissant à des mailles temporelles complémentaires :

1. Des pièges à MES ont été prélevés à 6 reprises juste après des périodes de crues. En effet, c'est durant ces épisodes que l'eau devient turbide et véhicule de fortes concentrations en particules.
2. Des sondes installées dans chacune des 3 stations ont mesuré, suivant un pas horaire ou demi-horaire, la température, la turbidité, la conductivité et les variations de niveau.

Ces sondes ont ainsi permis d'apprécier quantitativement les contaminations véhiculées par l'eau et les MES. En effet, elles ont enregistré, en continu, les variations de la conductivité, reflétant la concentration totale en matières dissoutes, ainsi que de la turbidité, fortement corrélée au taux de MES. Enfin, durant une des six reprises, les sédiments de chacun des trois cours d'eau seront aussi prélevés en trois points par stations et homogénéisés pour être analysés.

A l'occasion d'une des 6 séries de prélèvements des MES, une recherche de micropolluants sera effectuée sur les trois stations, dans ces MES et dans les sédiments prélevés conjointement.

Les substances suivantes seront recherchées par différents laboratoires :

- HAP, ETM par le laboratoire de Chronoenvironnement ;
- Pesticides organochlorés et pyréthriinoïdes (tab. 1: EPFL Lausanne) ;
- PCB, solvants, fongicides : Carso.

Pour ces différents groupes de contaminants, les seuils de détection très bas proposés par les laboratoires permettent d'homogénéiser les répliqués, qui seront effectués sur chacun des 3 cours d'eau sans risque de diluer les éventuelles contaminations susceptibles de dépasser les seuils de toxicité. En effet ceux ci sont de l'ordre de 10 fois le seuil de détection.

## II. Concentrations nutritives et organiques dans l'eau

### II-1. Méthodologie

#### Maille spatio-temporelles d'échantillonnage

Pour évaluer l'état de contamination du chevelu hydrographique afférent au lac de Remoray par des excès de nutriments ou et de matières organiques, des prélèvements d'eau ont été réalisés sur 8 points encadrant les tributaires et contre tributaires du plan d'eau. Dans le même esprit, les échantillonnages ont été réalisés suivant 3 mailles temporelles emboîtées afin de caractériser les variations spatio-temporelles de ces évaluations.

1. Toutes les trois semaines environs (soit à 19 reprises réparties sur toute l'année) entre le 31 août 2016 et le 31 août 2017, les prélèvements d'eau sont effectués dans les trois cours d'eau les plus importants du chevelu hydrographique considéré, au niveau de leur partie aval, soit à l'entrée de la Réserve Naturelle Nationale (RNN).
2. Au cours de 8 de ces 19 occasions, des prélèvements ont également été réalisés, à titre exploratoire et complémentaire, sur les parties apicales ainsi que sur les affluents et contre-affluents mineurs du lac :
  - les parties amont pérennes du Lhaut, de la Drésine, et du Ru de Remoray ;
  - les parties médianes des ruisseaux des Vurpillières (affluent basal de la Drésine, en rive droite) et de Bonne Fontaine (petit tributaire du lac).
3. L'évolution des concentrations au cours des crues a été étudiée à l'aide de 4 séries de 4 prélèvements effectués toutes les 2 ou toutes 4 heures à l'occasion de 4 épisodes de lessivages, c'est-à-dire de crues advenant après une longue période de étiage.

Comme la période comprise entre le 1<sup>er</sup> août 2016 et le 31 octobre 2017 a été marquée par une très faible hydraulité (cf. § IV), la quatrième série de prélèvements en crue a été reportée à début novembre 2017. Les épisodes de lessivages suivis ont donc compris trois crues automnales et une seule crue printanière.

En définitive, dans chacune de ces 3 afférences majeures, les contaminations en matières organiques et en nutriments ont été mesurées 32 fois entre le 31/8/2016 et le 6/11/2017.

#### Choix des indicateurs de la chimie de l'eau.

Pour chaque prélèvement, 4 groupes d'analyses ont été effectués pour mesurer treize paramètres chimiques (annexe 1).

1. La minéralisation globale a été mesurée en analysant le calcium et le magnésium, ainsi que la conductivité.
2. Les contaminations en matières organiques ont été appréciées à l'aide de l'analyse des teneurs des échantillons en carbone organique dissous et totale (Cod et Cot). La part organique des Matières en Suspension a également été mesurée (MESorg).

Parallèlement, la Demande Biologique en Oxygène a permis d'évaluer la biodégradabilité des matières organiques quantifiées dans l'eau.

3. Les contaminations en azote soluble ont été évaluées en mesurant les teneurs de l'eau en azote organique, ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), nitrites (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), et nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). La somme de ces concentrations permet d'évaluer la contamination de l'eau en azote total.
4. La contamination en phosphore a été évaluée en analysant les orthophosphates qui constituent la forme la plus soluble de cet élément, et le phosphore total comprenant le phosphore particulaire en suspension.

### Guides d'interprétation

Les différentes teneurs ont été interprétées en tenant compte des Normes de Qualité Environnementale (NQE) préconisées par l'application française de la Directive Cadre Européenne (INERIS 2012) ainsi que des valeurs guides proposées par NISBET et VERNEAUX en 1978, qui constituent un référentiel plus adapté à la problématique traitée. En effet, ces auteurs tiennent compte de la signification biologique des concentrations et surtout distinguent les potentiels d'assimilation des différents types de cours d'eau.

Pour compléter cette approche, en particulier en ce qui concerne les paramètres pour lesquels ni les NQE ni les normes biologiques n'ont été proposées, les valeurs guides proposées par la littérature nord américaine ont également été intégrées (US EPA 2000, Tank et Dodds 2003, Dodds et Smith 2015...).

Suivant ces principes, 5 seuils de qualité sont proposés, repérés par des barres de couleurs.

- Un seuil de **très bonne qualité écologique (barre bleue)** correspondant à une situation référentielle dans laquelle les matières carbonées ou nutritives peuvent être complètement assimilées permettant le développement des espèces électives du type écologique avec une variété et une abondance optimale.
- Un seuil de **bonne qualité écologique (barre verte)** correspondant à une situation pouvant présenter des excès modérés de nutriments ou des contaminations organiques limitées, sans que ceux-ci ne soient susceptibles d'entraîner à coup sûr des déséquilibres dans l'édifice biologique (ni surproduction végétale, ni régression des consommateurs).
- Un seuil de **qualité écologique médiocre (barre jaune)**, sanctionnant des excès notoires de nutriments ou / et de matières organiques susceptibles d'entraîner à coup sûr des déséquilibres dans l'édifice biologique (surproduction végétale ou et régression de la variété et de l'abondance des consommateurs les plus exigeants).
- Un seuil de **mauvaise qualité écologique (barre orange)**, caractérisé par de forts excès de nutriments ou et de matières organiques ; au dessus de ce seuil, les contaminations sont susceptibles de simplifier l'édifice biologique en entraînant de forte prolifération algales ainsi que la disparition de la plupart des espèces exigeantes au profit des organismes résistants.
- Un seuil de **très mauvaise qualité écologique (barre rouge)** caractérisé par de très forts excès de nutriments ou et de matières organiques ; au dessus de ce seuil, les contaminations sont susceptibles de simplifier drastiquement l'édifice biologique et de le réduire à quelques organismes résistants.

## II-2. Indicateurs de contaminations organiques

### Carbone organique total des afférences principales

En débit moyen et en étiage, les teneurs en carbone organique total sont le plus souvent moyennes dans la Drésine et le Lhaut, mais elles n'y descendent que rarement en dessous de la valeur guide référentielle (fig. 3). En outre, des excès notoires sont observés régulièrement dans le ruisseau de Remoray ainsi que durant les crues automnales dans chacun des 3 cours d'eau.

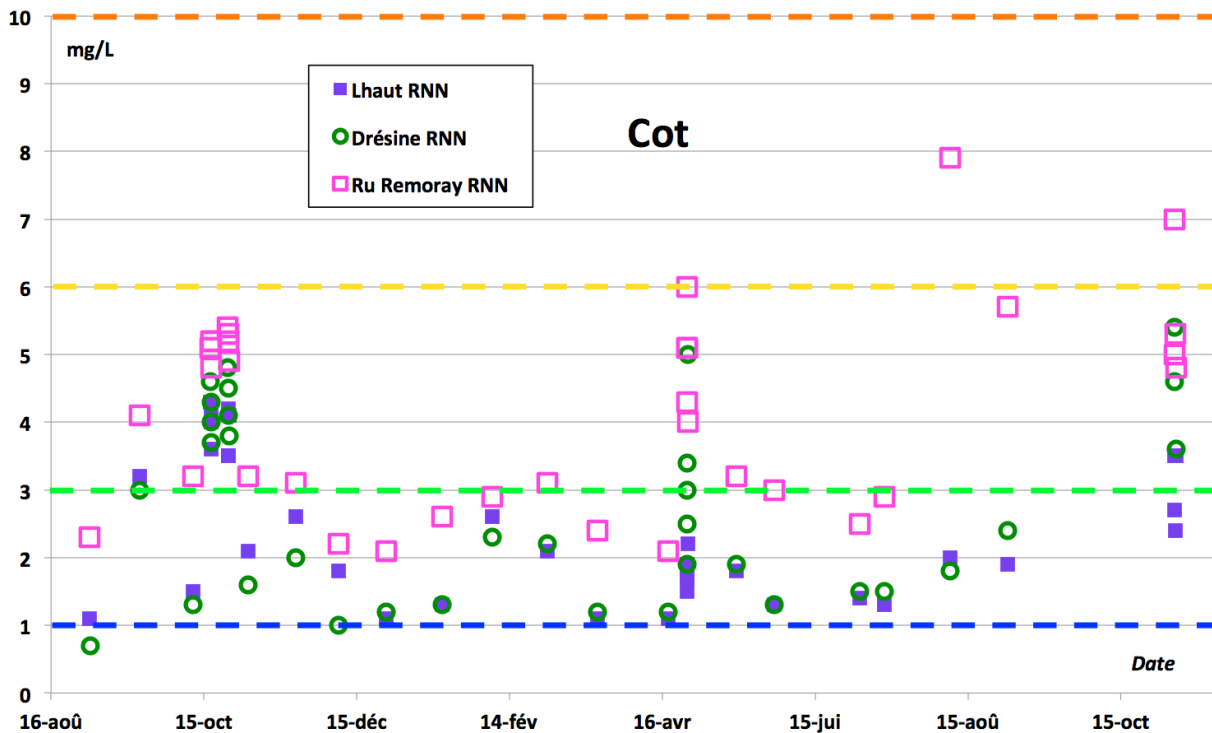


Figure 3. Evolution temporelle des teneurs en carbone organique total dans l'eau des 3 afférences principales ; cf. explication des niveaux de qualité (pointillés de couleur) en page 9

### Proportion de carbone organiques dissous dans les afférences principales

Dans les 3 cours d'eau, le carbone organique est majoritairement dissout. La proportion moyenne de carbone particulaire varie toutefois d'environ 5 % pour le Lhaut à entre 20 et 25 % dans le cas de la Drésine. Ce paramètre est nettement plus variable dans le Ru de Remoray. Les fortes teneurs en carbone organique particulaire sont observées en crue.

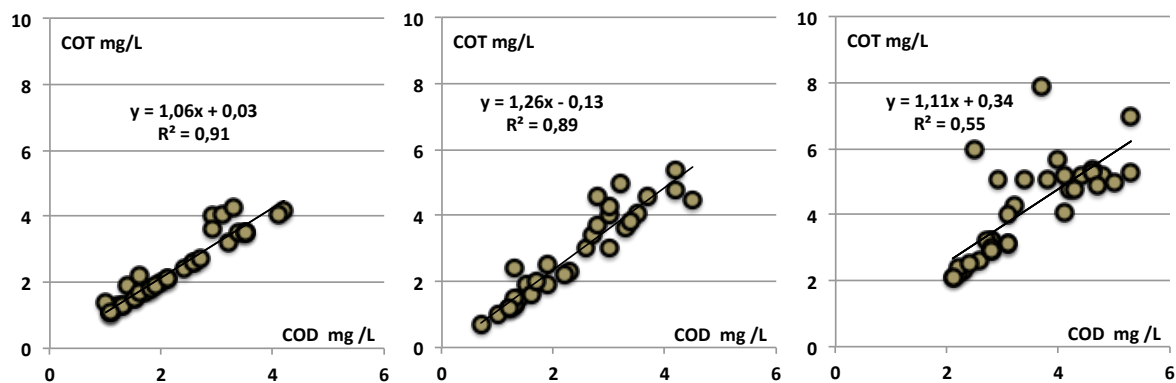


Figure 4. Proportion de la partie dissoute du carbone organique total dans le Lhaut (à droite), la Drésine (au centre) et le Ruisseau de Remoray (à gauche)

### Carbone organique total et dissous des cours d'eau apicaux

Les teneurs en carbone organiques total sont beaucoup plus faibles dans les systèmes apicaux prospectés que dans les parties aval des 3 afférences principales (fig. 5). Cependant, seules les teneurs mesurées dans une partie des échantillons des Vurpillières correspondent vraiment aux gammes de valeur typiques des « sources pures ».

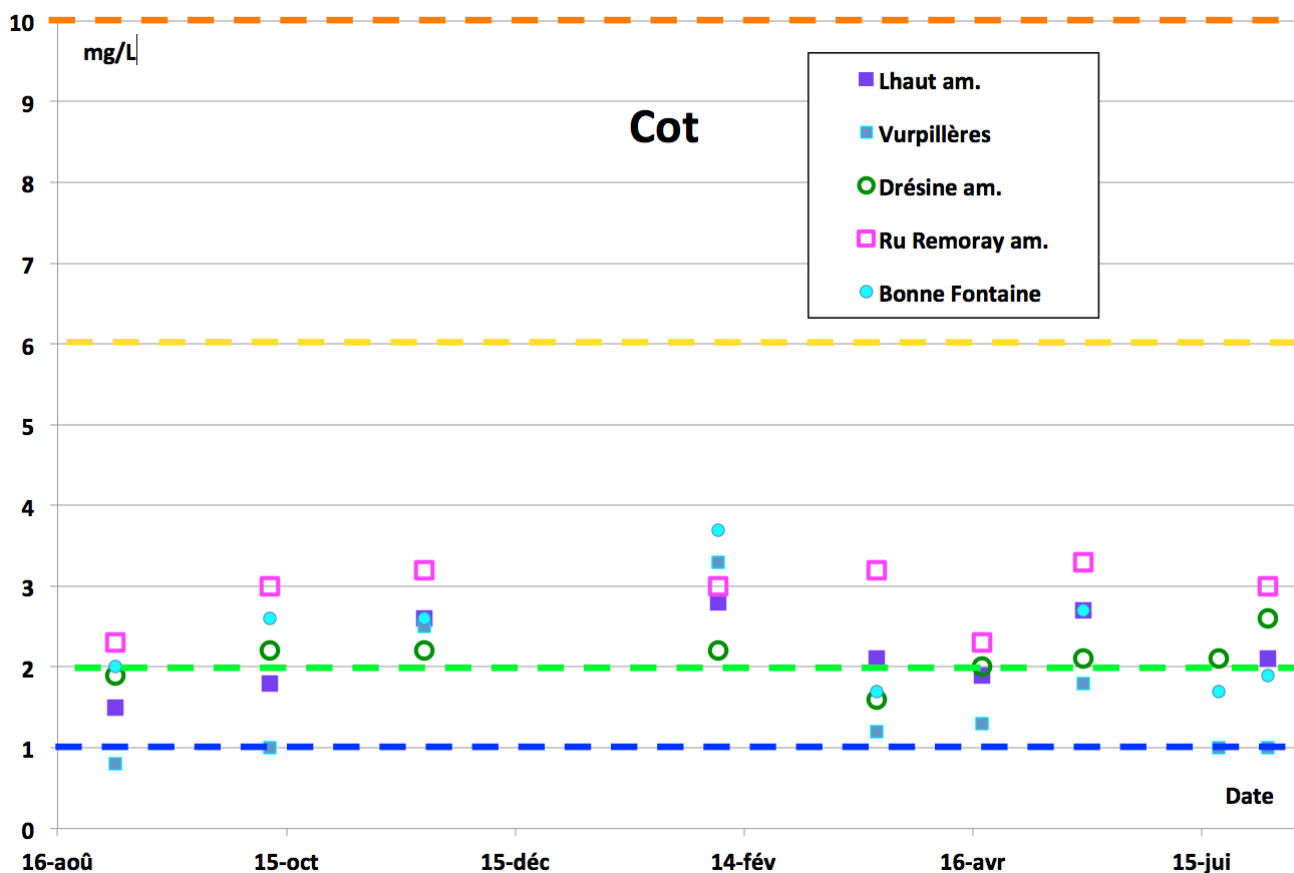


Figure 5. Evolution temporelle des teneurs en carbone organique total dans l'eau des parties apicales du réseau hydrographique ; cf. explication des niveaux de qualité (pointillés de couleur) en page 9

Tous les autres prélèvements témoignent de sur-contaminations organiques modérées à moyennes. Cette tendance est nettement plus accentuée dans le cas du Ruisseau de Remoray et de Bonne Fontaine, dont les teneurs en carbone organique dépassent systématiquement le seuil de contamination « moyenne ».

Elle pourrait s'expliquer par l'existence de pressions agricoles dès la partie la plus apicale des bassins versant étudiés (ann. 2), ou par l'influence de résurgences karstiques (cf. § IV).

Pour le Lhaut amont, la proportion de carbone organique particulaire mesurée dans l'eau est en moyenne inférieure à 1%. Cette proportion atteint en revanche 11 % dans le cas du Ru de Remoray. Pour les autres cours d'eau elle est comprise entre 2 et 5 %.

## II-3. Indicateurs de contaminations nutrimentielles

### Contamination azotée des afférences principales

Les teneurs en azote total et principalement en nitrates mesurées dans les 3 afférences principales sont systématiquement supérieures aux normes biologiques optimales (fig. 6). Elles dépassent en effet toutes 3 mg/L alors que dans des cours d'eau de ce type écologique appartenant à la zone à truite à supérieure, les teneurs moyennes en azote biodisponible devraient rester inférieures à 2 mg/L (Nisbet et Verneaux 1978).

De nombreuses espèces sensibles électives des cours d'eau apicaux régressent quand la teneur en nitrates dépasse durablement 4 mg/L (Camaro et al. 2005, Chambers et al. 2011, Grizetti et al. 2011, Azevedo et al. 2015...).

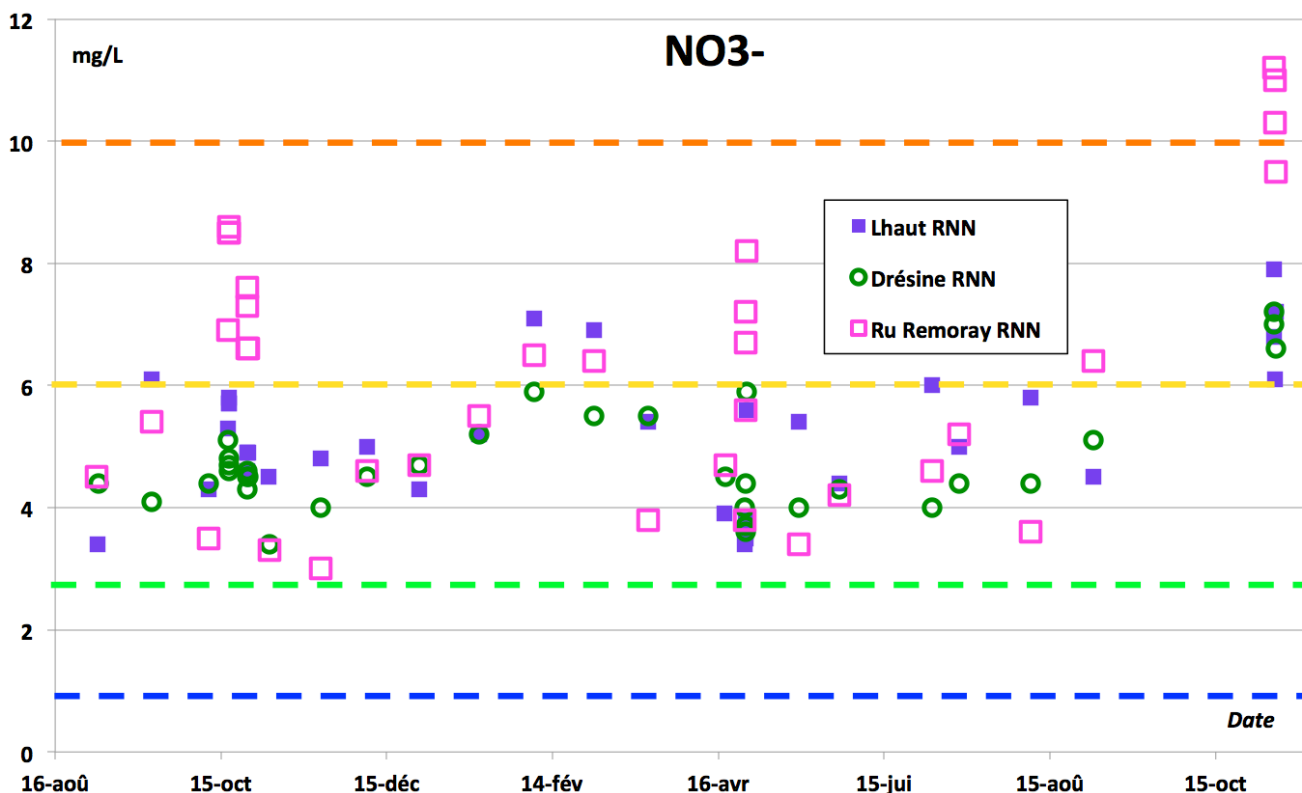


Figure 6. Evolution temporelle des teneurs en nitrates dans l'eau des 3 afférences principales ; cf. explication des niveaux de qualité (pointillés de couleur) en page 9.

Comme dans le cas du carbone organique, les valeurs maximales en nitrates s'observent en crue dans les afférences principales, et en particulier dans le Ru de Remoray. En étiage et en débit moyen, les teneurs observées dans les 3 cours d'eau, comprises entre 4 et 8 mg/L révèlent une contamination modérée mais continue en azote minéral.

Pour ces 3 afférences, les nitrates constituent les trois-quarts de l'azote total mesuré aux cours des prélèvements, ce qui témoigne d'une bonne oxygénation ou / et de la bonne minéralisation des formes organiques. Les teneurs en ammonium et en nitrites sont presque systématiquement inférieures aux seuils de qualité optimale et la part de l'azote organique dissous peut être considérée comme faible.

Des concentrations comprises entre 0,1 et 0,3 mg/L d'ammonium ont tout de même été observées à 2 occasions, dont une crue, pour la Drésine et le Ru de Remoray, en dépassant donc le seuil de concentration maximal optimum de 0,05 mg/L. A ces mêmes occasions, les taux de nitrites mesurés dans ces deux ruisseaux atteignaient aussi les valeurs anormales de 0,06 à 0,08 mg/L, confirmant l'existence d'une contamination organique ou et d'un déséquilibre du cycle de l'azote.

### Contamination azotée des cours d'eau apicaux

Les teneurs en nitrates mesurées dans la partie amont des 3 afférences ainsi que dans la Bonne Fontaine et dans les Vurpillières sont généralement inférieures à celles qui sont observées conjointement dans les parties aval des 3 afférences principales (fig. 7). Cependant, ces concentration restent très supérieures aux valeurs guides proposées dans la littérature pour des cours d'eau apicaux « purs », ce qui confirme l'influence de pressions agricoles dès la source de ces différents cours d'eau.

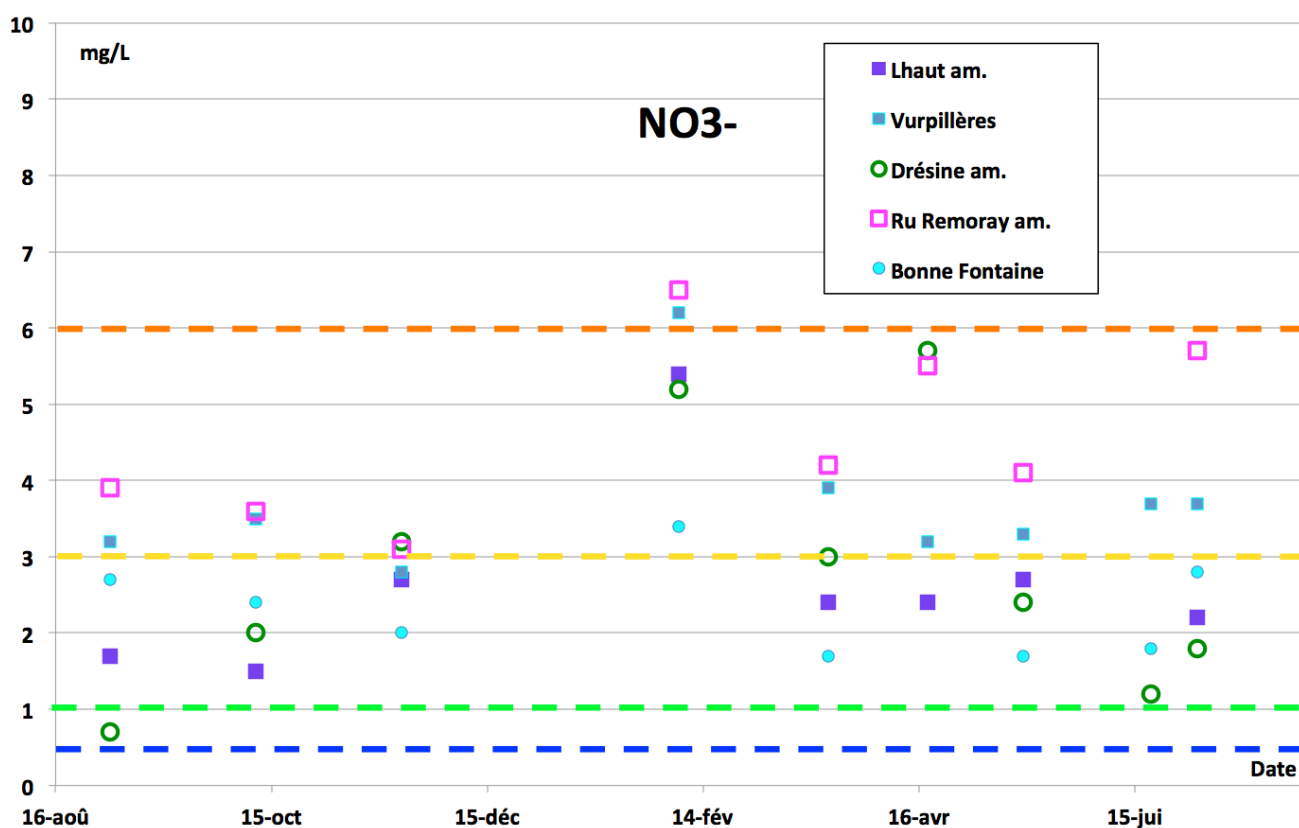


Figure 7. Evolution temporelle des teneurs en carbone organique total dans l'eau des parties apicales du réseau hydrographique ; cf. explication des niveaux de qualité (pointillés de couleur) en page 9.

Les plus fortes teneurs sont mesurées dans l'amont du Ru de Remoray et dans la Drésine. Les concentrations en nitrates des Vurpillières, un peu moins importantes, restent nettement supérieures à celles qui seraient observées à quelques centaines de mètres d'une source exempte de pollution. Cette observation corrobore l'hypothèse d'une part karstique notoire de l'alimentation des Vurpillières.

Pour les 5 sites, les concentrations maximales ont été décelées début février, en période de fonte des neiges. Toutefois il n'y a pas eu de suivi de l'évolution des contaminations durant les crues pour ces systèmes apicaux, et les pics de concentrations ont probablement été loupés.

## Contaminations des afférences principales en phosphore

Les concentrations en phosphore total et en orthophosphates mesurées dans les portions aval du Lhaut et de la Drésine sont compatibles avec le bon voire le très bon état écologique au sens de la DCE (fig. 8-9). Des valeurs dépassant cette gamme sont décelées dans la Drésine durant les crues pour le phosphore soluble et à une occasion dans le Lhaut pour le phosphore particulaire.

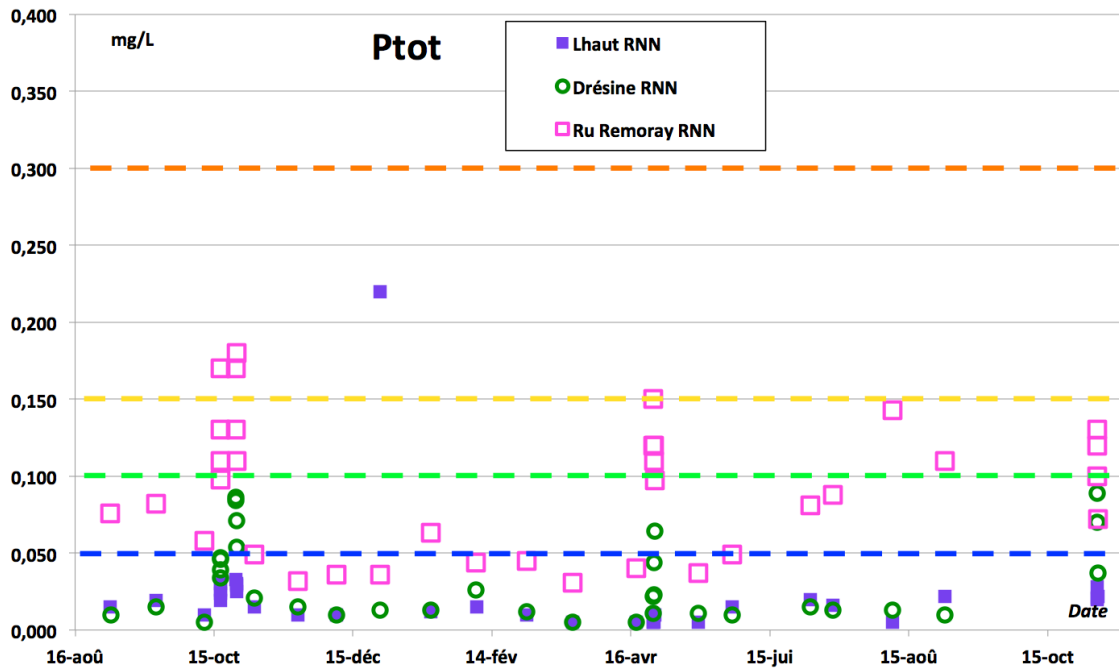


Figure 8. Evolution temporelle des teneurs en phosphore total dans l'eau des 3 afférences principales ; cf. explication des niveaux de qualité (pointillés de couleur) en page 9.

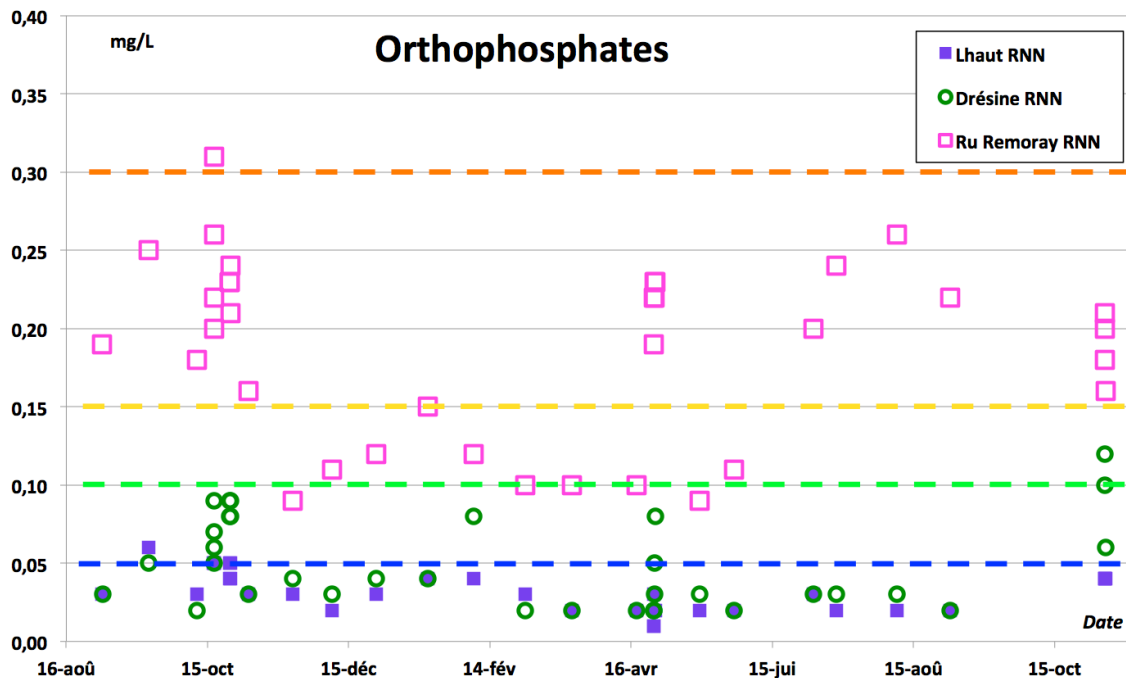


Figure 9. Evolution temporelle des teneurs en orthophosphates dans l'eau des 3 afférences principales ; cf. explication des niveaux de qualité (pointillés de couleur) en page 9.

En revanche, les teneurs mesurées dans le Ruisseau de Remoray témoignent régulièrement d'un excès en phosphore, en particulier sous la forme d'orthophosphates qui en constituent la part la plus biodisponible.

## Contaminations des cours d'eau apicaux en phosphore

Les mêmes tendances sont observées dans les zones apicales du chevelu hydrographique (fi.10-11). Dans le Lhaut amont et les Vurpillières, les valeurs mesurées pour les 2 formes de phosphore sont toutes en dessous du minimum optimal tenant compte du niveau typologique. Elles sont un peu plus importantes pour la Drésine amont, mais surtout elles sont régulièrement excessives dans le ruisseau de Remoray et ainsi que plus sporadiquement dans Bonne Fontaine.

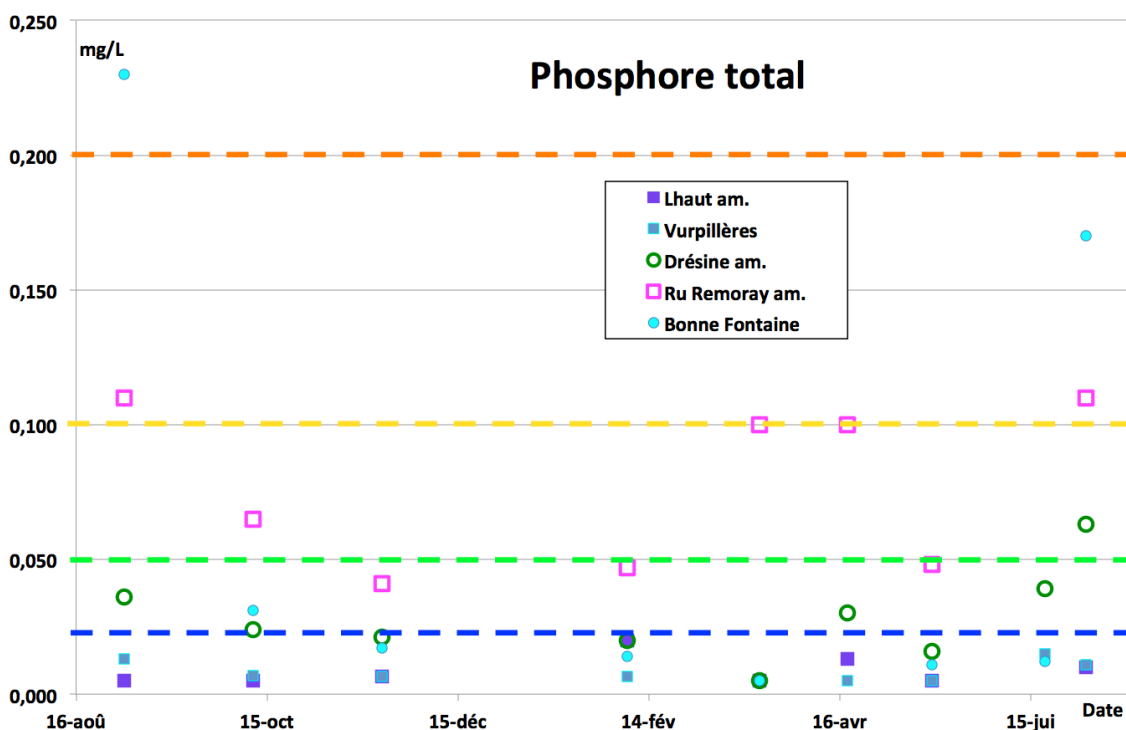


Figure 10. Evolution temporelle des teneurs en phosphore total dans l'eau des parties apicales du réseau hydrographique ; cf. explication des niveaux de qualité (pointillés de couleur) en page 9.

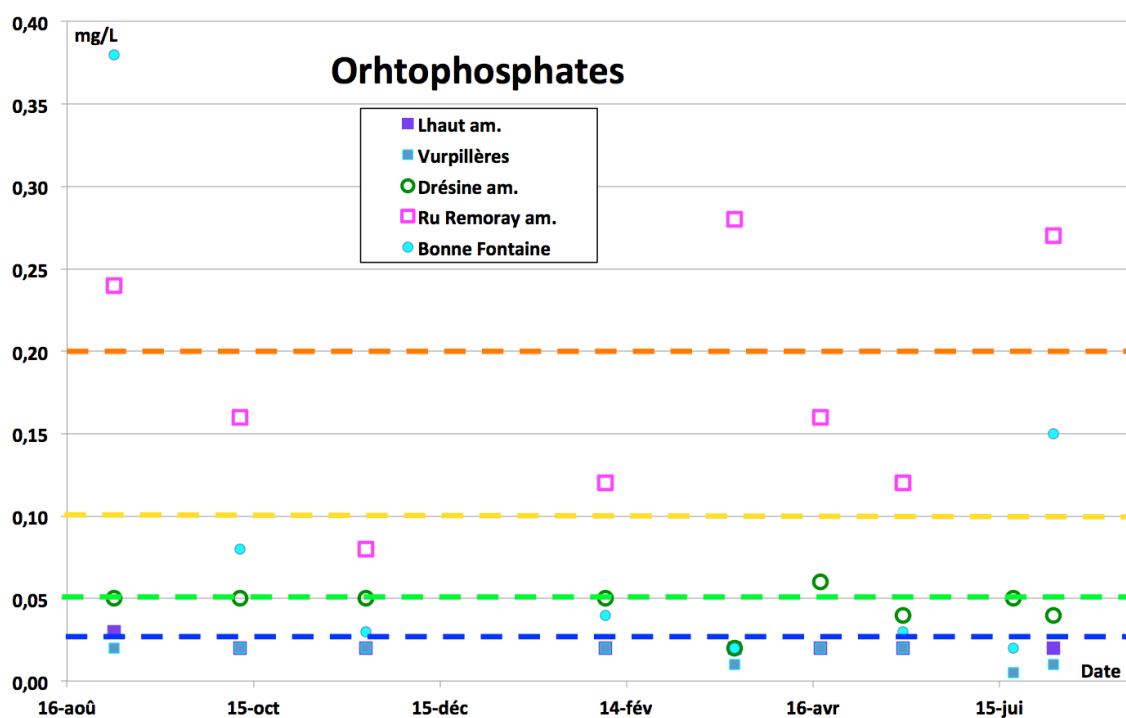


Figure 11. Evolution temporelle des teneurs en orthophosphates dans l'eau des parties apicales du réseau hydrographique ; cf. explication des niveaux de qualité (pointillés de couleur) en page 9.

## II-4. Bilan sur les indicateurs de pollutions organique et nutritives

### Gamme et dynamique des contaminations

Ce suivi chimique pluri-hebdomadaire montre que les 3 principales afférences du lac de Remoray sont moyennement à nettement contaminées par des excès de carbone organique dissous et de nitrates (tab. 3). Ces contaminations sont également sensibles dans les parties apicales du réseau hydrographique, même si elles y sont plus modérées. Elles augmentent nettement d'amont en aval.

Paramètres Stations de mesure	n	Cot		NO <sub>3</sub> -		Ntot		PO <sub>4</sub> ---		Ptot	
		mg/L	±	mg/L	±	mg/L	±	mg/L	±	mg/L	±
LHAUT RNN	35	2,4	1,1	5,2	1,1	1,5	0,3	0,033	0,013	0,022	0,035
DRESINE RNN	34	2,7	1,4	4,8	0,9	1,4	0,3	0,049	0,029	0,031	0,026
RU REMORAY RNN	35	4,2	1,5	6,2	2,3	1,9	0,7	0,187	0,058	0,092	0,044
LHAUT amont	8	2,2	0,5	2,6	1,2	0,9	0,3	0,021	0,004	0,009	0,005
VURPILLERES	9	1,5	0,8	3,7	1,0	1,1	0,3	0,016	0,006	0,008	0,004
DRESINE amont	9	2,1	0,3	2,8	1,7	1,0	0,4	0,046	0,011	0,028	0,017
RU REMORAY amont	8	2,9	0,4	4,6	1,2	1,6	0,4	0,179	0,075	0,078	0,030
BONNE FONTAINE	8	2,4	0,7	2,3	0,6	0,9	0,1	0,094	0,124	0,061	0,087

Tableau 3. Moyennes (en mg/L) et écarts-types (±) des concentrations de l'eau en carbone organique total (Cot), nitrates (NO<sub>3</sub>-), azote total (Ntot), orthophosphates (PO<sub>4</sub>---) et phosphore total mesurées entre août 2016 et novembre 2017 sur 8 stations criblant le réseau hydrographique des tributaires du lac Remoray ; RNN = aval du cours d'eau, à l'entrée de la Réserve Naturelle Nationale ; n = nombre de prélèvements analysés ; cf. explication du code couleur en page 9.

Elles sont plus fortement accentuées dans le Ruisseau de Remoray. Dans ce cours d'eau on observe, en outre, des concentrations en phosphore excessives, essentiellement sous forme soluble. La surcharge phosphorée est sensible dès la partie apicale.

Pour l'ensemble des cours d'eau et des paramètres considérés, les teneurs les plus fortes en matières organiques et en nutriments sont enregistrées durant les crues. Le suivi de ces épisodes sur les parties aval des 3 cours d'eau principaux montrent que les pics des concentrations adviennent peu après le pic de débit, et que les teneurs en excès se maintiennent ensuite pendant plusieurs heures pendant la phase de décrue (cf. §).

### Biodégradabilité de la MO

Les teneurs en matières organiques carbonées, même si elles sont systématiquement en excès par rapport aux valeurs attendues sur des systèmes apicaux de moyenne montagne restent modérées. Cependant, leur biodégradabilité apparaît faible à très faible.

En effet, le rapport entre l'oxydabilité chimique et la demande biologique en oxygène est compris entre 0,5 et 1 pour des matières organiques « fraîches » intégralement biodégradables (Loehr 1977, Bliefert et Perraud 2001). Or, il dépasse fréquemment 2 pour les parties aval des 3 afférences principales (fig. 12). Suivant cette approche, la biodégradabilité de la matière organique apparaît très faible lors des crues automnales.

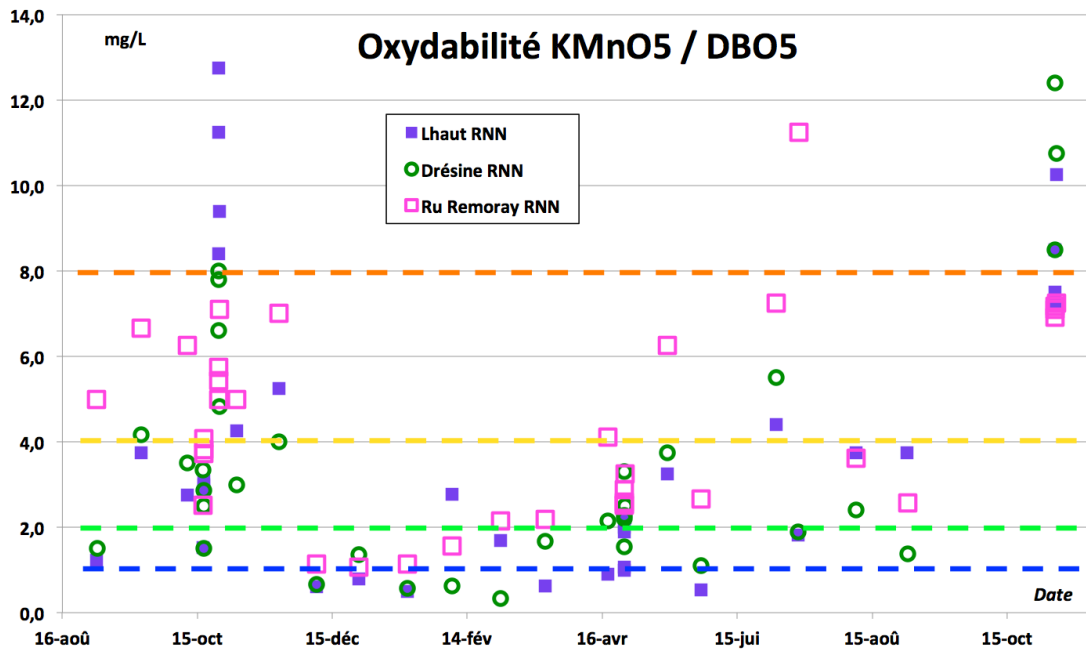


Figure 12. Evolution temporelle de la biodégradabilité des matières organiques dans l'eau des parties apicales du réseau hydrographique ; cf. explication des niveaux de qualité (pointillés de couleur) page 9.

Dans les parties apicales du réseau hydrographique, ce déficit de biodégradabilité apparaît moins intense mais tout aussi récurrent (fig. 13). Seuls de rares prélèvements réalisés en étiage dans les Vurpillières et Bonne Fontaine échappent à cette tendance.

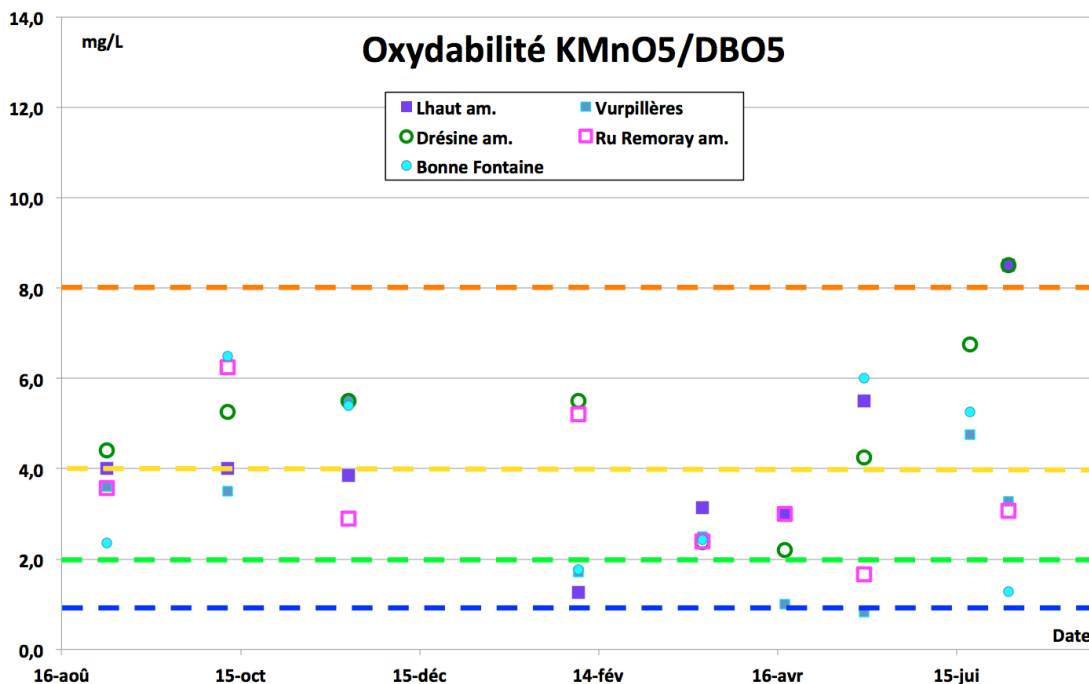


Figure 13. Evolution temporelle de la biodégradabilité des matières organiques dans l'eau des parties apicales du réseau hydrographique ; cf. explication des niveaux de qualité (pointillés de couleur) page 9.

Le déficit de biodégradabilité des matières organiques peut être du à deux processus :

- soit leur nature est à dominante humifère et provient principalement de plantes supérieures dégradées ou non, par exemple d'origine forestière ou tourbeuse ;
- soit des substances chimiques artificielles (pesticides ou substances) inhibent les processus bactériens.

Cependant, les rapports C/N mesurés dans les matières organiques dissoutes et en suspension dans l'eau sont faibles à très faibles à de rares exceptions près. Leurs valeurs moyennes sont comprises entre 8 et 10 pour les zones aval et entre 6 et 8 pour les parties apicales (tab. 4).

Station	Moy.	Ec. T.	min	max
LHAUT RNN	8,2	4,2	3,3	21,9
DRESINE RNN	9,1	5,1	2,2	23,1
RU REMORAY RNN	8,8	2,5	4,2	17,8
LHAUT am.	6,8	1,4	4,7	8,7
VURPILLERES	7,6	6,4	2,5	21,9
RU REMORAY am.	9,8	2,2	6,7	12,9
DRESINE am.	6,5	0,8	4,9	7,9
BONNEFONTAINE	7,4	2,1	5,2	11,5

Tableau 4. Valeurs moyenne (Moy), minimale (min) et maximales et écart type des rapports C/N des matières organiques mesurés entre août 2016 et novembre 2017 sur 8 stations criblant le réseau hydrographique des tributaires du lac Remoray.

Or les résidus humiques forestiers naturellement peu biodégradable ont des C/N dépassant 20 et pouvant atteindre 50 ou 100 (Meyers 1994, Lamb et al. 2006).

On en déduit la présence probable de substances chimiques inhibitrices contaminant en particulier les zones aval lors d'épisodes de crues succédant à des périodes sèches ou et en saison automnale...

#### Comparaison avec les données antérieures

Entre mai 2004 et avril 2005, des prélèvements d'eau avait été effectués à 8 occasions sur trois stations implantées sur la partie aval du Lhaut, de la Drésine et du Ru de Remoray, aux mêmes endroits que lors de la présente étude (ann. 2). Les mêmes paramètres avaient été mesurés suivant des protocoles similaires. La fréquence des mesures était alors bien plus faible, mais une partie des différences apparaît tout de même statistiquement significatives (tableau 5, à comparer au tableau 3).

Paramètres Station de mesure	n	Cot		NO3-		Ntot		PO4---		Ptot	
		mg/L	±	mg/L	±	mg/L	±	mg/L	±	mg/L	±
LHAUT RNN	8	3,7	1,0	3,4	1,1	2,4	0,5	0,037	0,030	0,031	0,018
DRESINE RNN	8	3,6	2,2	3,5	1,1	2,1	0,7	0,083	0,169	0,040	0,038
RU REMORAY RNN	8	4,3	1,7	5,4	2,1	3,0	0,8	0,226	0,189	0,106	0,040

Tableau 5. Moyennes (en mg/L) et écarts-types ( $\pm$ ) des concentrations de l'eau en carbone organique total (Cot), nitrates (NO3-), azote total (Ntot), orthophosphates (PO4---) et phosphore total mesurées entre mai 2004 et avril 2005 sur la partie aval des 3 cours d'eau principaux du réseau hydrographique afférent au lac de Remoray à l'entrée de la Réserve Naturelle Nationale (RNN) ; n = nombre de prélèvements analysés ; cf. explication du code couleur en page 9.

Dans le Ru de Remoray, les contaminations décelées en 2004 et 2005 ne sont pas significativement différentes de celles qui ont observées en 2017 et 2018. En revanche, dans la Drésine et le Lhaut, il semble que les concentrations en carbone organique et en phosphore soit inférieures pour la période actuelle par rapport à l'étude de 2004-2005. A *contrario*, les taux de nitrates sont significativement plus importants dans ces deux cours d'eau en 2016-2018.

Corrélativement, la baisse du taux d'azote organique apparaissant dans la Drésine et le Lhaut n'est pas statistiquement significative. Cependant, la variation inverse des deux formes d'azote pourrait refléter le passage de l'usage du fumier dominant à celui du lisier dominant dans les pratiques agricoles de ce bassin versant.

En effet, le premier de ces deux types d'amendements est susceptible d'apporter aux cours d'eau, par rapport au second, plus de matières organiques azotées et carbonées, mais sous des formes moins directement bio-disponibles. Le passage au lisier dominant accélère donc et aggrave les impacts sur l'édifice biologique aquatique.

## III. Contamination organique et nutritive des MES

### III-1. Méthodologie

#### Objectifs et stratégie mise en œuvre

Une partie des formes particulières du carbone organique, du phosphore et de l'azote sont pris en compte par l'analyse des échantillons d'eau, en particulier quand ceux-ci sont prélevés au moment des crues. Cependant, les pics de transports de matières en suspension (MES) ont de forte probabilité d'échapper à ce type de maille d'échantillonnage, forcément discontinue. Or, les MES transférées vers l'aval durant ces pics constituent la part majoritaire de la charge en matière organique particulaire fine.

Par conséquent, pour mieux évaluer les concentrations maximales, pour analyser leur composition, puis pour mieux quantifier les flux, deux dispositifs conjoints ont été mis en œuvre sur la partie aval des trois afférences principales. D'une part, des sondes de conductivité et de turbidité à pas demi-horaire ont été installées dans chacune de ces trois afférences, sur les stations de prélèvement d'eau. D'autre part, des pièges à MES y ont été implantés et relevés à 6 reprises.

#### Sondes turbidité et conductivité

Pour apprécier en continu les variations de la minéralisation et des concentrations en MES, 3 sondes YSI 600 OMS-V2-1-O équipées de capteurs de conductivité et de turbidité et munies d'un dispositif de nettoyage automatique (YSI 6136) ont été installées sur les parties aval du Lhaut, de la Drésine et du Ru de Remoray (cf. fig. 1).

En effet, la turbidité est la mesure indirecte de la concentration des matières en suspension dans l'eau. Elle se détermine en émettant un faisceau lumineux dans le milieu étudié, puis en mesurant la lumière diffusée par les particules présentes. Le capteur de turbidité utilise un rayonnement proche infrarouge et détecte la diffusion sous un angle de 90 degrés par rapport au faisceau lumineux incident. Conformément à la méthode ASTM (American Society for Testing and Materials) D7315, ce type de capteur est appelé turbidimètre néphélométrique dans le proche infrarouge.

Les valeurs sont exprimées en unité de turbidité néphélométrique (NTU). La plage de prise de données varie de 0 à 1000 NTU, à une résolution de  $\pm 2\%$ . L'étalonnage est réalisé à chaque changement de piles tous les deux mois environ, à l'aide d'une solution étalon, calibrée à 126 NTU.

Un inter étalonnage permettant de passer de la turbidité à la concentration estimée en MES a été effectué *in situ* sur une trentaine de points par cours d'eau (fig. 14). Pour chacune des trois sondes les concentrations de MES sont significativement et positivement corrélées aux valeurs de turbidité (Pearson,  $p < 0,01$ ). En outre, pour les plages de turbidité échantillonnées, les coefficients de conversion entre la turbidité en NTU et les concentrations en MES en mg/L sont très proches de 1.

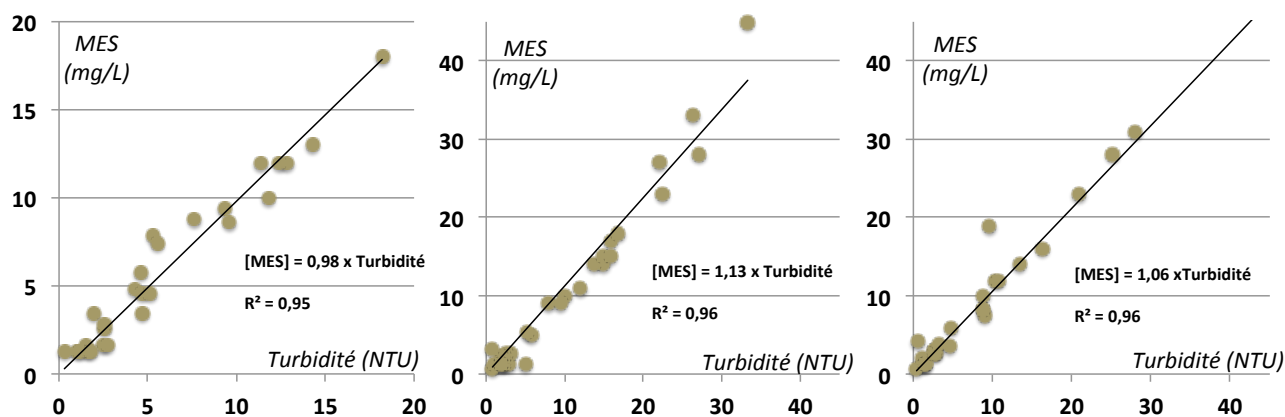


Figure 14. Relation entre la turbidité évaluée par les sondes et la concentration en MES mesurée dans les échantillons d'eau prélevés dans les parties aval du Lhaut (à gauche), de la Drésine (au centre) et du Ruisseau de Remoray (à droite).

Ces mesures nécessiteraient d'être étendues à des gammes de turbidité plus importantes qui sont atteintes durant le pic de certaines crues. En attendant ces vérifications et calages supplémentaires, les relations élucidées ont été utilisées pour estimer le taux de MES à partir des mesures de turbidité.

Parallèlement, les données de conductivité sont utilisées pour évaluer la variation des matières dissoutes totales. La plage de mesure de la conductivité est de 0 à 1000  $\mu\text{S cm}^{-1}$  avec une résolution de 0,0001  $\text{mS cm}^{-1}$ . L'étalonnage de la conductivité est réalisé avec une solution étalon YSI 3167 de 1000  $\mu\text{S cm}^{-1}$ .

Enfin, les trois sondes ont été fixées sur une berge dans un tube en PVC pour les protéger des embâcles et des intempéries (fig. 15). Les sondes sont munies d'un racleur qui permet de limiter l'encrassement du capteur de turbidité qui peut advenir par adsorption de particules fines, par encroustement calcaire, ou à cause de développements algaux.



Figure 15. Dispositif de fixation et de protection de la sonde conductivité turbidité implantée dans la partie aval du Ruisseau de Remoray (sous le pont du chemin agricole menant au Crossat).

## Pièges à MES

A l'aval immédiat de chaque sondes, des pièges à MES ont été implantés dans une veine d'eau courante. Afin de collecter une quantité suffisante de MES et de pallier la variabilité des processus de transport et de sédimentation, le nombre de pièges a été porté à 6.

Ces pièges sont constitués par des tubes en PVC de 20 cm de hauteur pour 20 mm de diamètre. Le rapport entre ces dimensions est supérieur à 9, afin de piéger les matières en suspension par simple sédimentation (Bloesch et Burns 1980). Ils sont fixés verticalement à des fers à béton qui sont insérés dans le fond du lit du cours d'eau (fig. 16).

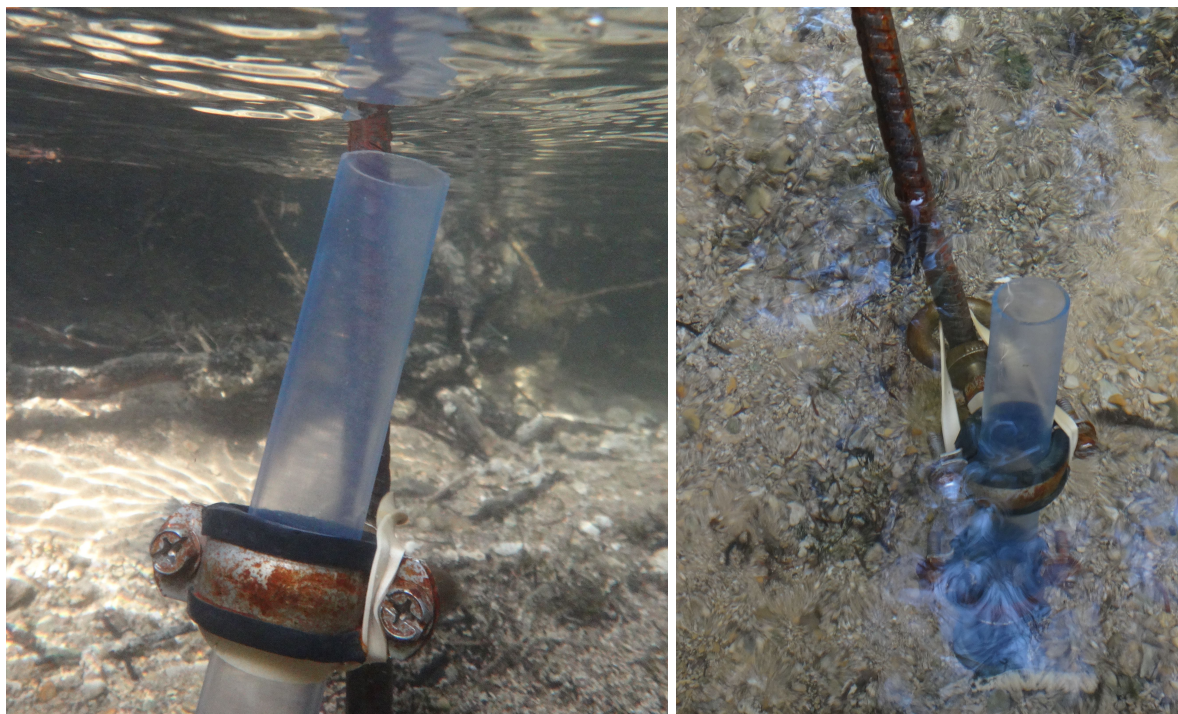


Figure 16. Pièges à MES installés dans le Lhaut aval ; vue sous l'eau (à gauche) et du dessus (à droite)

Les tubes sont positionnés de façon à ce que leur orifice soit au ras de l'eau en débit moyen. De ce fait, les pièges échantillonnent les MES fines pour les débits susceptibles d'en transporter, mais pas les particules grossières qui sont transportées en saltation, au ras du fond. Aussi, les récoltes ne sont suffisantes qu'après une crue.

Les MES échantillonnées sont alors récupérées et les pièges vidés sont réinstallés pour la campagne d'échantillonnage suivante. Les MES collectées dans chaque répliquats sont mélangées en un seul échantillon homogène.

## Analyses des MES

Trois séries d'analyses ont été pratiquées sur les MES ainsi récoltées.

1. Les nutriments (N et P) et le carbone organique ont été mesurés à six reprises par le laboratoire CARSO qui a aussi réalisé des analyses granulométriques.
2. Les Eléments Traces Métalliques (ETM) et les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) ont été analysés par le laboratoire Chrono-Environnement
3. Une série de 38 pesticides comprenant essentiellement organochlorés, organophosphorés et pyréthriinoïdes ont été quantifiés par le Laboratoire Central de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).

## III-2. Dynamiques de transfert des MES dans les trois afférences principales

### Variations de turbidité et de minéralisation du Lhaut aval

Une fois calibrée et testée, la sonde de turbidité et de conductivité placée dans la partie aval du Lhaut a enregistré la variation de ces 2 paramètres entre le 14/10/2016 et le 14/01/2018 (fig. 16). Elle a connu cependant 2 phases de dysfonctionnement.

1. La période de gel intense du mois de janvier 2017 a entraîné la perte des données de la fin novembre 2016 à la mi janvier 2017 (le Lhaut était pris en glace sur plusieurs centimètres sur le site de mesure).
2. L'intensité de l'encroustement calcaire a mis la sonde en panne durant une deuxième période allant de fin aout à début novembre 2017.

*Turbidité et concentration en MES du Lhaut aval*

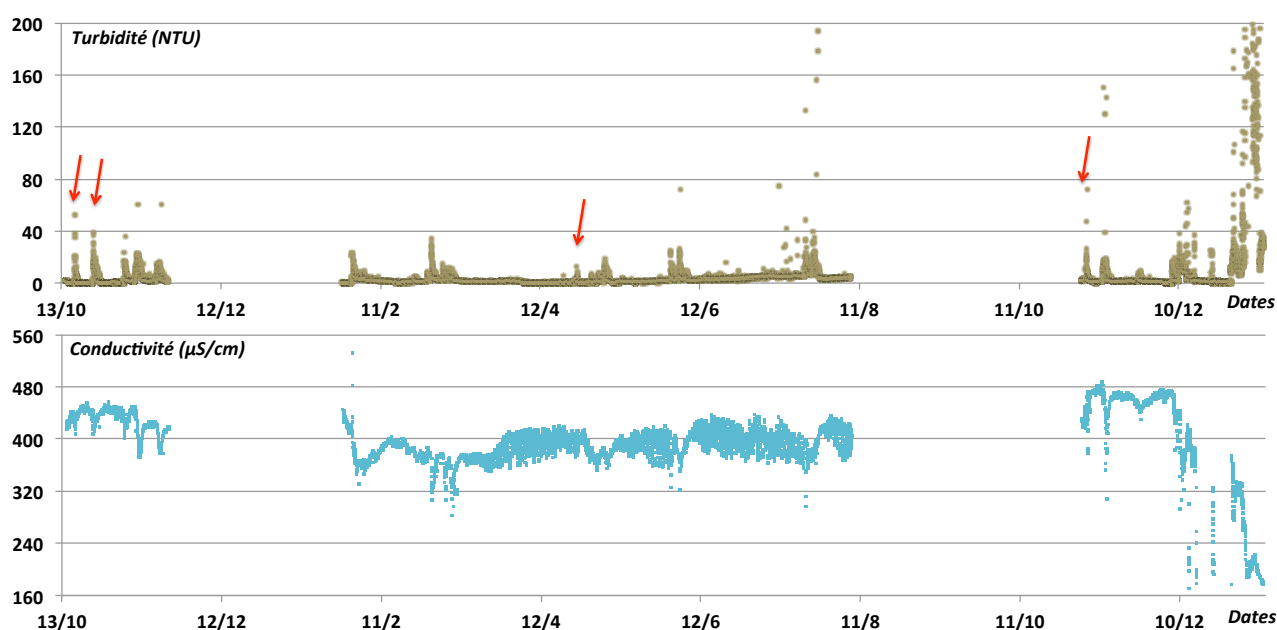


Figure 16. Suivi à pas demi-horaire des variations de turbidité (en haut) et de conductivité (en bas) dans la partie aval du Lhaut entre le 15/10/2016 et le 10/01/2018 ; les flèches rouges indiquent les 4 crues qui ont donné lieu à des campagnes de quadruple prélèvements pour analyses des concentrations en carbone et en nutriment ; sur le graphique turbidité quelques valeurs comprises entre 200 et 1100 NTU ont été tronquées pour le rendre plus lisible (cf. texte).

Les teneurs en MES estimées sur le Lhaut aval à partir de la turbidité varient couramment de moins de 1 mg/L en basses-eaux à entre 20 à 40 mg/L en hautes-eaux. Or, le seuil au dessus duquel une eau de rivière devient turbide est de 20 mg/L. Cette valeur indique aussi la concentration maximale optimale au delà de laquelle le développement harmonieux des salmonidés commence à être affecté (Berg et Northcote 1985, Bash et al. 2001, Madej et al., 2007). Les valeurs mesurées en régime « courant » dans le Lhaut témoignent donc d'un cours d'eau limpide qui trouble peu durant les crues courantes.

Cependant, quelques valeurs ponctuelles, généralement lors des crues estivales ou automnales dépassent 200 mg/L pour atteindre 330 mg/L durant quelques minutes. Surtout, durant les très fortes crues de fin décembre à début janvier, les teneurs en MES ont dépassé 1000 mg/l à plusieurs reprises et pendant quelques heures. Ces épisodes particuliers sont liés à des érosions locales mais spectaculaires induites par la succession de 2 crues vicennales et d'une crue cinquantiennale voire centennale.

*A contrario*, la succession annuelle des pics de turbidité indique que les 4 crues durant lesquelles 4 séries de prélèvements ont été pratiquées n'ont pas été les plus importantes en terme de concentration en MES.

#### **Conductivité et minéralisation du Lhaut aval**

Parallèlement, la conductivité mesurée sur le Lhaut indique une minéralisation forte pour ce type de cours d'eau apical, même en contexte géologique très calcaire. En effet, ce paramètre est généralement compris entre 400 et 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  alors que les valeurs attendues pour un cours d'eau apical non pollué ne devraient pas dépasser 300.

L'importance de la minéralisation du Lhaut est due à de fortes teneurs en bicarbonates et en calcium qui pourraient refléter l'influence prépondérante des alimentations karstiques nourrissant le débit du Lhaut (cf. § IV-1). Elle se traduit par l'intensité des phénomènes d'encroustement calcaire (tuf) qui colmatent les fonds de la partie aval du Lhaut, en particulier à l'aval immédiat de la cascade à l'entrée de la RNN.

Sur la plupart des cours d'eau franc-comtois, on observe une augmentation de la minéralisation des cours d'eau en lien probable avec une déstabilisation des sols agricoles induites par l'augmentation des amendements azotés (Mudry et al. 2015). Cependant, les données antérieures sont insuffisantes pour vérifier si la minéralisation du Lhaut a augmenté durant ces trois dernières décennies.

#### **Variation de conductivité et de turbidité en crue automnale pour le Lhaut aval**

Pendant les crues automnales « courantes », les variations de turbidité et de conductivité du Lhaut aval suivent généralement la séquence type décrite ci-dessous (fig. 17) :

1. Dans un premier temps, au début de la montée des eaux, l'augmentation des débits nourris par les ruissellements entraîne une dilution de la minéralisation.
2. Dans un second temps, la minéralisation remonte sous l'influence des apports de l'eau qui s'étaient infiltrés dans les sols.
3. Dans un troisième on observe le pic de turbidité.
4. Dans un quatrième temps, les débits diminuant doucement, on observe concomitamment la baisse de la turbidité et le réajustement de la conductivité

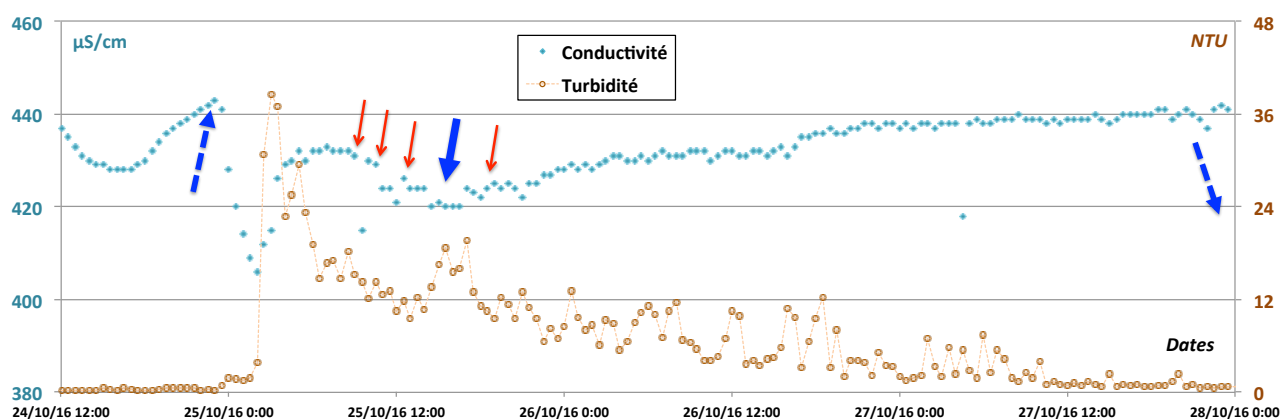


Figure 17. Suivi à pas demi-heure des variations de turbidité et de conductivité dans la partie aval du Lhaut durant la crue du 25/10/2016 ; les flèches rouges indiquent les heures des prélèvements pour analyses des concentrations en carbone et en nutriments ; les flèches bleues indique le début de la crue (pointillés à gauche), le pic de débit (trait plein) et la décrue (pointillés à droite).

## Variations de turbidité et de minéralisation de la Drésine aval

Une fois calibrée et testée, la sonde de turbidité et de conductivité placée dans la partie aval de la Drésine a enregistré la variation de ces 2 paramètres entre le 14/10/2016 et le 27/01/2018 (fig. 18). Deux phases de dysfonctionnement sont à déplorer.

1. La période de gel intense du mois de janvier 2017 a entraîné la perte des données de la fin novembre 2016 à la mi janvier 2017.
2. L'activité des truites à proximité immédiate de la sonde et d'un dépôt de sédiments fins organiques a perturbé la mesure à 2 reprises en mai et en novembre 2017.

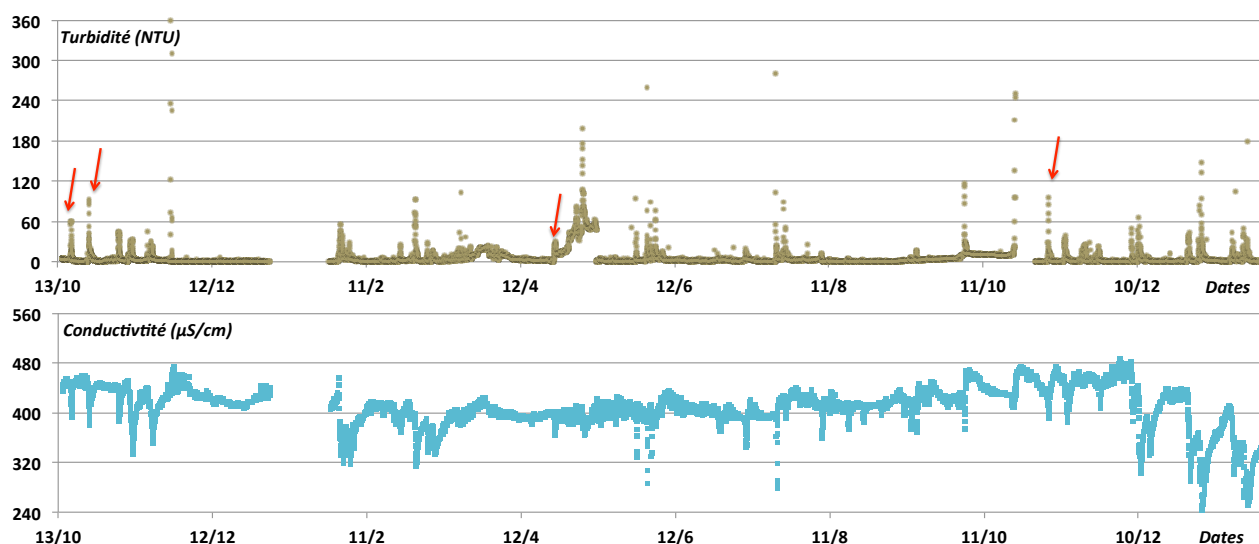


Figure 18. Suivi à pas demi-horaire des variations de turbidité et de conductivité dans la Drésine aval entre le 15/10/2016 et le 15/01/2018 ; les flèches rouges indiquent les 4 crues qui ont donné lieu à des quadruple prélèvements pour analyses du carbone organique et des nutriments ; 2 valeurs dépassant 500 NTU ont été tronquées sur le graphique de la turbidité pour le rendre plus lisible.

### *Turbidité et concentration en MES de la Drésine aval*

Dans la Drésine aval, les concentration en MES estimée à partir de la turbidité varient couramment de moins de 1 mg/L en basses eaux à entre 60 à 120 mg/L en hautes eaux. La Drésine reste un cours d'eau limpide, mais par rapport au Lhaut aval, elle se trouble plus fréquemment et plus intensément durant chacune des crues « courantes ».

Dans ce cours d'eau, les pics de turbidité adviennent non seulement en automne et en hiver mais aussi au printemps. Les valeurs et la durée des épisodes à plus forte teneur en MES sont susceptibles de perturber le développement harmonieux des salmonidés et de leurs proies (Berg et Northcote 1985, Bash et al. 2001, Madej et al., 2007)

Comme dans le cas du Lhaut aval, la succession annuelle des pics de turbidité indique que les prélèvements qui ont servi aux analyses des teneurs en carbone et en nutriments n'ont pas été pratiqués au cours des épisodes de concentrations maximales en MES.

### *Conductivité et minéralisation de la Drésine aval*

La conductivité de la Drésine aval est couramment comprise entre 380 et 420 µS/cm. Ces valeurs sont excessives pour un cours d'eau apical non pollué. Parallèlement, on observe une forte variation de la conductivité en période pluvieuse. La fréquence et l'intensité de ces épisodes inclinent à suspecter l'influence d'une décarbonatation des sols.

### Variation de conductivité et de turbidité en crue automnale pour la Drésine aval

Pendant les crues automnales « courantes », les variations de turbidité et de conductivité de la Drésine aval suivent la même séquence que celle décrite pour le Lhaut aval (fig. 19 à comparer avec la figure 17). En revanche le pic de matière en suspension et le creux de conductivité sont nettement plus accentués dans le cas de la Drésine

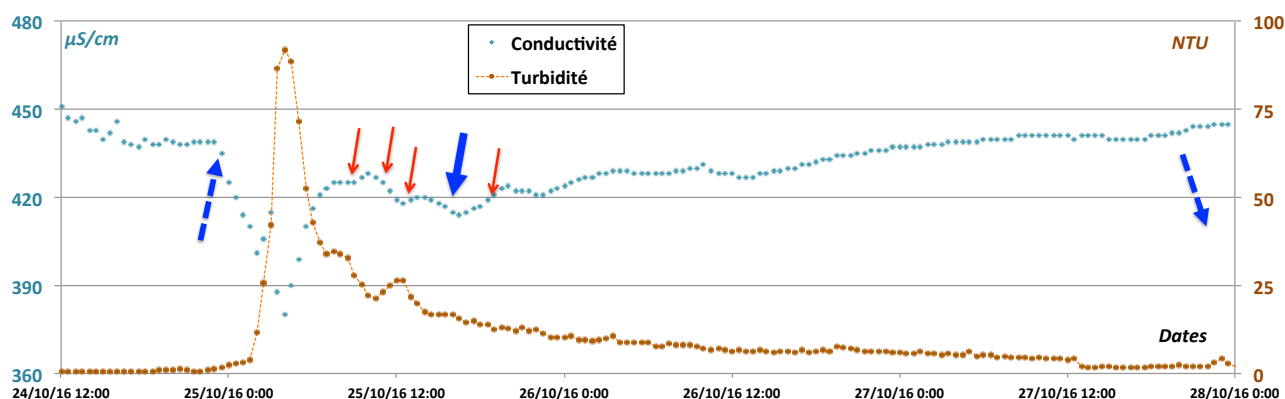


Figure 19. Suivi à pas demi-horaire des variations de turbidité et de conductivité dans la Drésine aval durant la crue du 25/10/2016 ; les flèches rouges indiquent les heures des prélèvements ; les flèches bleues indiquent le début de la crue (pointillés), le pic de débit (trait plein) et la décrue (pointillés).

### Variations de turbidité et de minéralisation du Ru de Remoray aval

Après calibrations et tests, la sonde de turbidité et de conductivité placée dans la partie aval du Ru de Remoray a enregistré la variation de ces 2 paramètres entre le 14/10/2016 et le 28/02/2018 (fig. 20). La période de gel de début janvier 2018, qui a fait entièrement geler le ruisseau, a entraîné la perte des données entre fin novembre et fin janvier 2017.

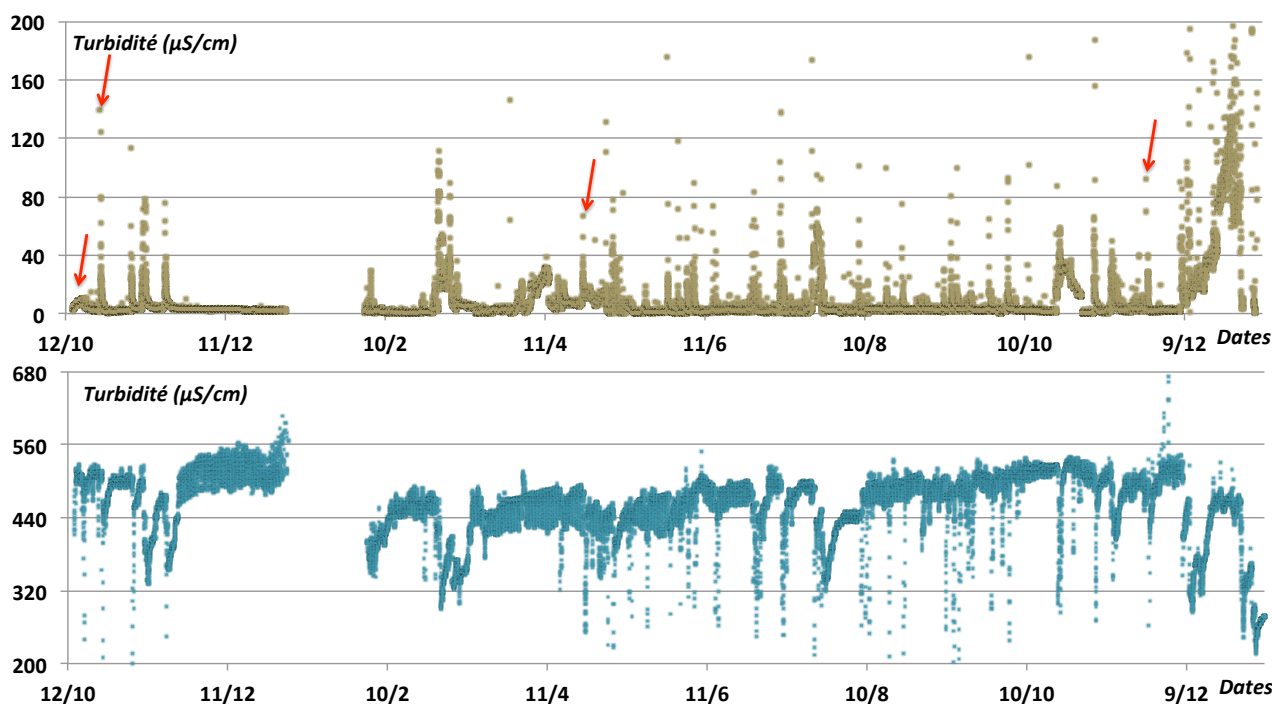


Figure 20. Suivi à pas demi-horaire des variations de turbidité et de conductivité du Ru de Remoray aval entre le 15/10/2016 et le 15/01/2018 ; les flèches rouges indiquent les 4 crues qui ont donné lieu à des prélèvements pour analyses du carbone organique et des nutriments ; plusieurs valeurs dépassant 400 NTU ont été tronquées sur le graphique de la turbidité pour le rendre plus lisible.

### *Turbidité et concentration en MES du Ru de Remoray aval*

La turbidité du Ru de Remoray aval est beaucoup plus variable et contrastée que celles du Lhaut et de la Drésine.

- En période sèche froide, le Ru de Remoray est limpide et sa teneur en matière en suspension est couramment inférieure à 2 mg/L.
- En étiage estival, il se trouble très légèrement ce qui correspond à un transport de 4 à 8 mg/L de MES.
- En crue, la turbidité augmente rapidement pour dépasser régulièrement 100 NTU, ce qui représente un peu plus de 100 mg/L de MES.
- Les phases de turbidité sont beaucoup plus fréquentes (cf. analyse de la turbidité en crue ci-dessous).
- Des pointes de turbidité à plus de 400 NTU sont fréquemment observées.

Comme dans le cas des portions aval du Lhaut et de la Drésine, la succession annuelle des pics de turbidité indique que les prélèvements qui ont servi aux analyses des teneurs en carbone et en nutriments n'ont pas été pratiqués au cours des épisodes de concentrations maximales en MES.

### *Conductivité et minéralisation du Ru de Remoray aval*

La conductivité du Ruisseau de Remoray, et donc sa minéralisation, sont elles aussi plus élevées et plus fortement variables que celles mesurées dans les portions aval du Lhaut et de la Drésine. Couramment comprise entre 400 et 520  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , la conductivité du Ru de Remoray a atteint 687  $\mu\text{S}/\text{cm}$  au cours de cette étude. Ces valeurs sont nettement supérieures à celles qui caractérisent une tête de bassin non polluée, y compris en milieu calcaire et hors contexte géologique salin.

### *Variation de conductivité et de turbidité en crue pour le Ru de Remoray aval*

Comme dans le cas de la Drésine et du Lhaut, les crues automnales se caractérisent par une phase de dilution et un pic de turbidité, mais qui sont nettement plus accentués dans le cas du Ru de Remoray (fig. 21). En outre, sur ce cours d'eau, le pic de turbidité advient plus vite et précède la phase de dilution. L'augmentation de turbidité advient en outre en plusieurs pics.

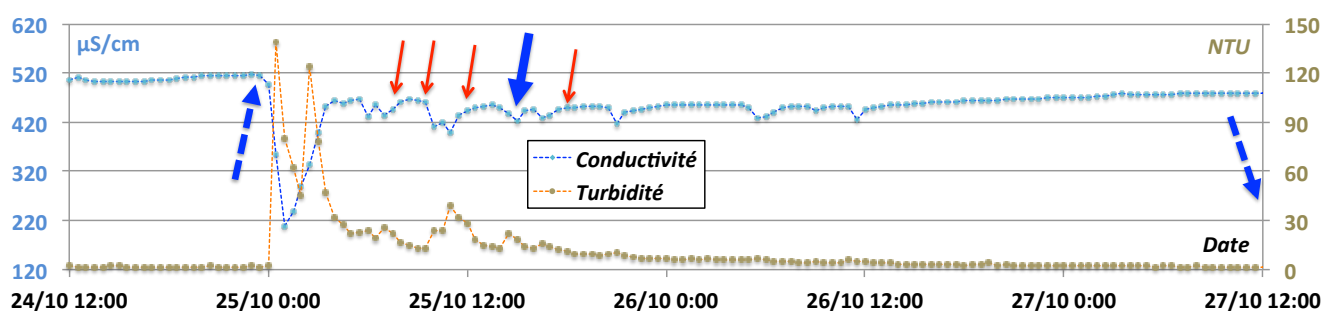


Figure 21. Suivi à pas demi-heure des variations de turbidité et de conductivité du Ru de Remoray aval durant la crue du 25/10/2016 ; les flèches rouges indiquent les heures des prélèvements ; les flèches bleues indiquent le début et la fin de crue (pointillés) ainsi que le pic de débit (trait plein).

En période estivale, la variabilité de la minéralisation et de la turbidité du Ru de Remoray est amplifiée. En effet, à chaque averse estivale, même de faible intensité, la turbidité augmente brutalement et dépasse la valeur seuil de 20 NTU (fig. 22).. Pour des pluies plus importantes, les pics de turbidité atteignent des pics compris entre 130 et 490 NTU.

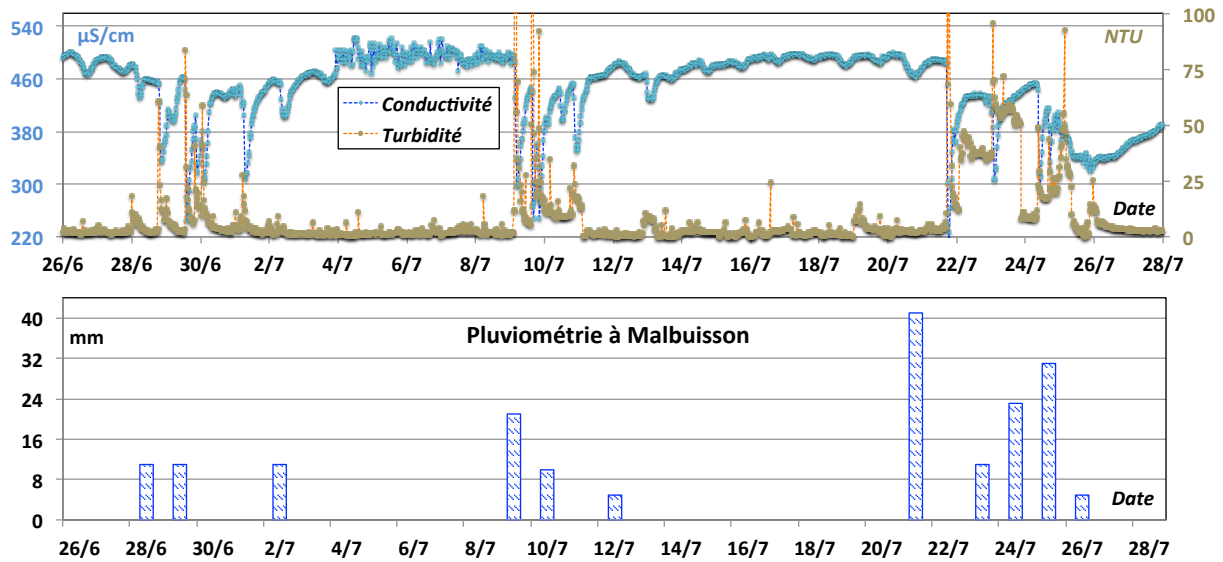


Figure 22. Comparaison des variations de turbidité et de conductivité du Ru de Remoray aval de fin juin à fin juillet 2017 avec la pluviométrie journalière enregistrée à Malbuisson (données Bruno Tissot).

Par comparaison, la Drésine et le Lhaut n'ont été que légèrement troublés et uniquement durant les 2 épisodes les plus pluvieux du 21/07 et du 24/7 (fig. 23 et 24). Le Lhaut a toutefois été victime de pic ponctuel de turbidité difficile à expliquer sinon par le passage de pêcheur en waders soulevant des fines ponctuellement.

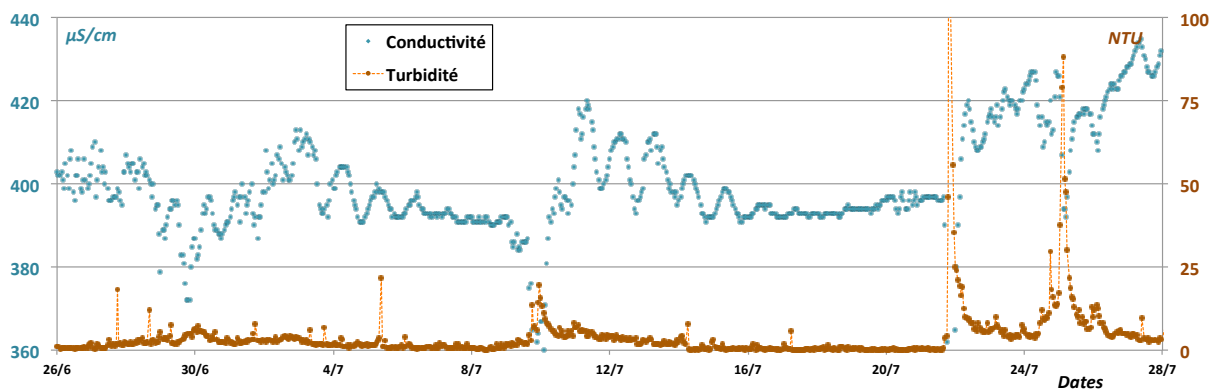


Figure 23. Variations de turbidité et de conductivité de la Drésine aval de fin juin à fin juillet 2017

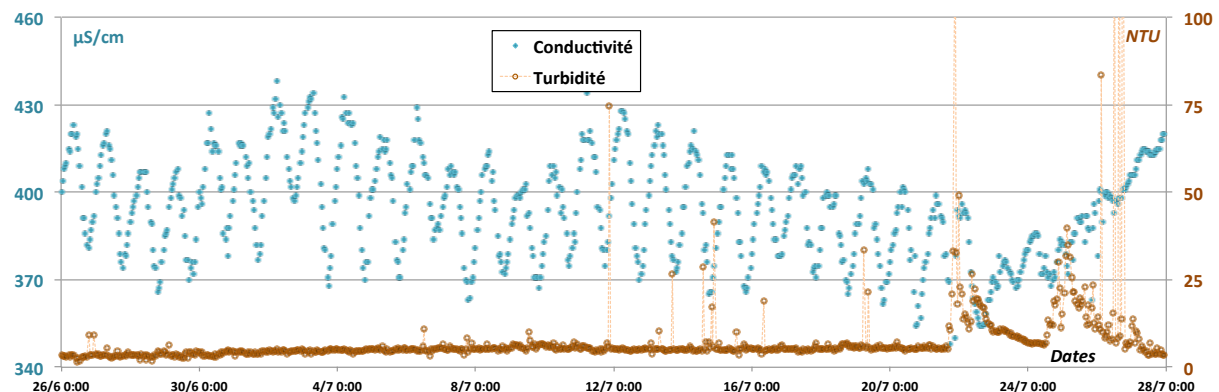


Figure 24. Variations de turbidité et de conductivité du Lhaut aval de fin juin à fin juillet 2017

### III-3. Contaminations organiques et nutritives des MES

Les MES ont été échantillonnées à 6 reprises dans la partie aval de chacune des trois afférences principales. Elles ont été piégées au cours de l'année 2017 dans le dispositif décrit en page 22 après 6 crues dont 2 hivernales (20 février et 13 mars), 2 printanières (11 mai et 8 juin), une estivale (2 août) et une automnale (6 novembre). La granulométrie confirme qu'il s'est bien agi de matières fines (annexe 3).

Les teneurs en carbone organique de ces MES varient de 3 à 10 %. Ces valeurs témoignent d'une nette contamination organique (Bowden 1977, Long et Morgan 1990).

Les C/N sont ultra-majoritairement compris entre 8 et 12, sans excéder 16. Les faibles valeurs de ce descripteur synthétique de la nature de la matière organique indiquent que les apports majeurs de matières organiques ne sont ni d'origine forestière ni d'origine tourbeuse. En revanche elles concordent avec les valeurs usuelles des C/N du lisier de bovin laitier, qui fluctuent autour de 10 (Reis et al. 2003), contre 15 pour le fumier.

Parallèlement, la plupart des teneurs en phosphore mesurées dans les MES atteignent des niveaux susceptibles de favoriser les proliférations végétales (US EPA 1979, MOE 1993, MOE 2008, PAVLOWSKY et DEREK 2010). Cette tendance est plus accentuée pour la Drésine et le Ru de Remoray. De la même façon, les teneurs en azote témoignent de contaminations nettes des 3 ruisseaux (Long et Morgan 1990, UNESCO 1996).

*L'interprétation des teneurs observées a été interprétée suivant les valeurs guides indiquées par les auteurs cités ci-dessus, sous l'optique*

#### Composition des MES du Lhaut aval

Dans la partie aval du Lhaut la teneur en carbone organique des MES prélevées à 6 reprises est moyenne à forte (tab. 5). Les C/N variant de 9 à 16 indique que les apports organiques ne sont que très faiblement influencés par des apports forestiers ou marécageux dont les C/N dépassent 25 et atteignent des valeurs pouvant dépasser 50.

Date	COT g/kg MS	N total mg/kg MS	P total mg/kg MS	C/N
20/02/17	45,3	3 400	515	13,3
13/03/17	44,2	3 500	554	12,6
11/05/17	63,7	4 800	561	13,3
08/06/17	56,4	6 400	838	8,8
02/08/17	77,9	4 900	779	15,9
06/11/17	75,7	7 400	860	10,2
<b>Moyenne</b>	<b>60,5</b>	<b>5 070</b>	<b>684</b>	<b>12,4</b>

Tableau 5. Teneurs en carbone organique en azote et en phosphore total des MES échantillonnées dans la partie aval du Lhaut à 6 reprises en 2017.

Les teneurs en azote mesurées dans les MES de la partie aval du Lhaut témoignent d'une contamination moyenne à forte (fig. 25). Sur les prélèvements qui ont été analysés les teneurs les plus importantes sont observées au printemps et en automne.

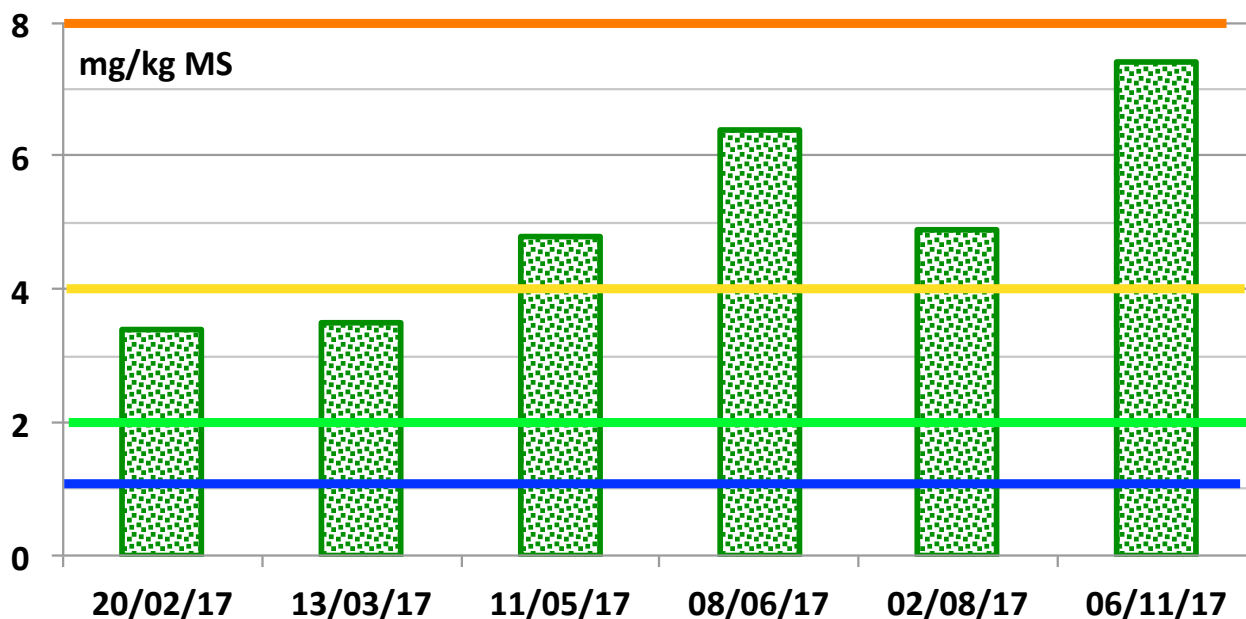


Figure 25. Variations des teneurs en azote des MES prélevées à 6 reprises dans le Lhaut aval

En revanche, les concentrations en phosphore des MES prélevées dans le Lhaut sont proches de celles que l'on peut observer dans des cours d'eau référentiels (fig. 26). Elles ne témoignent que de légères contaminations, qui sont un peu plus accentuées de la fin du printemps au milieu de l'automne.

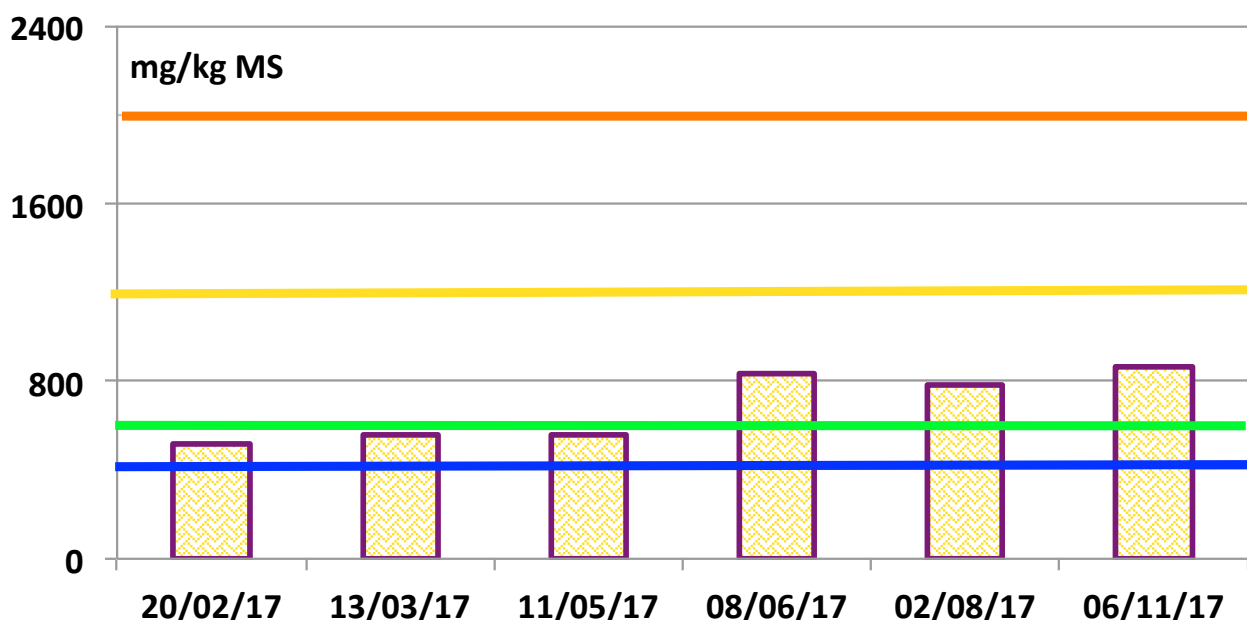


Figure 26. Variations des teneurs en phosphore des MES prélevées à 6 reprises dans le Lhaut aval

### Composition des MES de la Drésine

La Drésine transporte des MES plus nettement et plus régulièrement organiques (tab. 6). Leurs rapports C/N compris entre 10 et 13 correspondent typiquement à ceux du lisier de bovins laitiers. Leur odeur présente aussi une forte parenté avec celles de cette matière.

Date	COT g/kg MS	Ntot mg/kg MS	Ptot mg/kg MS	C/N
20/02/17	63,1	4 600	1 007	13,7
13/03/17	50,8	5 100	1 058	10,0
11/05/17	74,9	6 300	1 012	11,9
08/06/17	80,9	7 500	1 269	10,8
02/08/17	71,9	6 300	1 227	11,4
06/11/17	75,0	7,600	1 376	9,9
<b>Moyenne</b>	<b>69,4</b>	<b>6 230</b>	<b>1158</b>	<b>11,3</b>

Tableau 6 Teneurs en carbone organique en azote et en phosphore total des MES échantillonnées dans la partie aval de la Drésine à 6 reprises en 2017.

Les teneurs en azote mesurées dans les MES de la partie aval de la Drésine reflètent systématiquement des contaminations accentuées en cet élément (fig. 27). Les teneurs les plus importantes sont observées du printemps à l'automne.

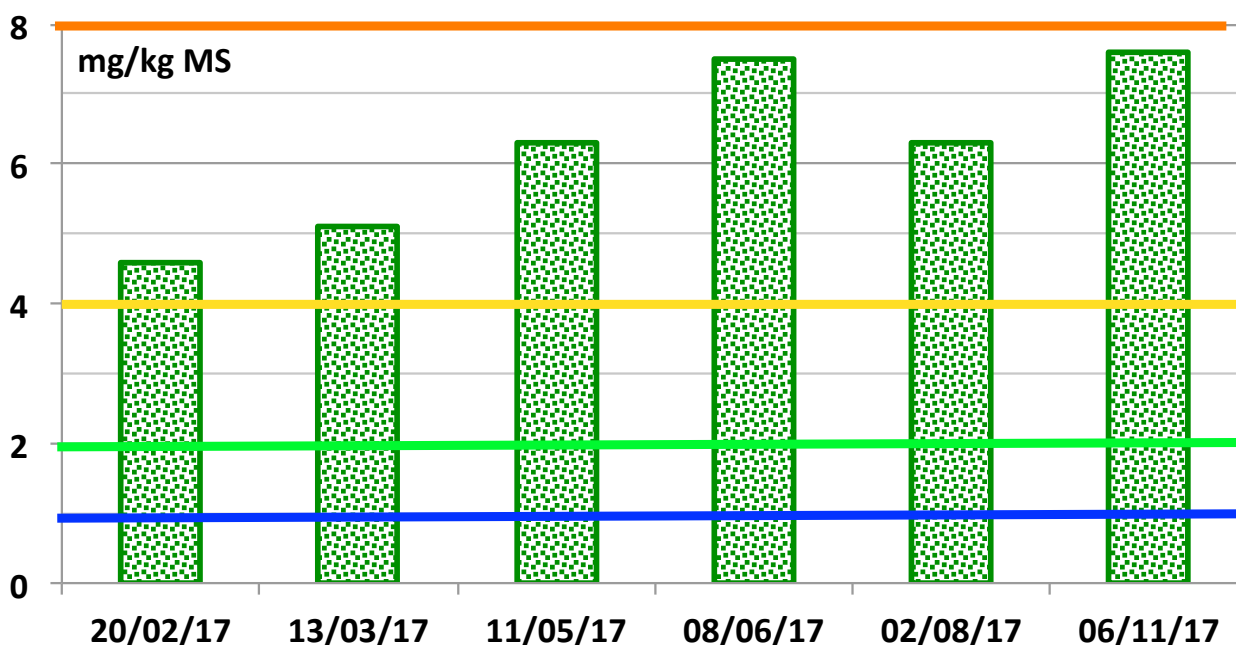


Figure 27. Variations des teneurs en azote des MES prélevées à 6 reprises dans la Drésine aval

Les concentrations en phosphore observées dans les MES de la partie aval de la Drésine témoignent également de contaminations moyennes à fortes. Dans les prélèvements les teneurs en phosphore fluctuent autour de 1200 mg/kg de MS. Cette gamme de valeurs est susceptible de provoquer ou de favoriser des proliférations végétales (US EPA 1979, MOE 1993, MOE 2008, PAVLOWSKY et DEREK 2010).

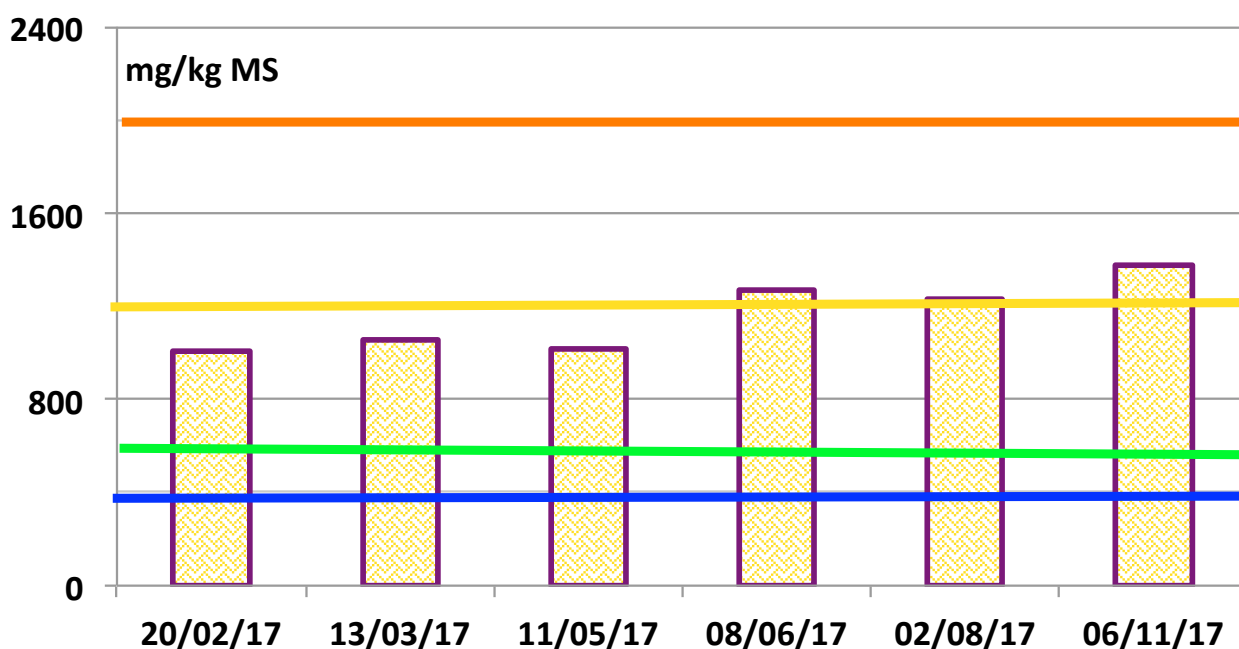


Figure 28. Variations des teneurs en phosphore des MES prélevées à 6 reprises dans la Drésine aval

### Composition des MES du Ruisseau de Remoray

Les teneurs en carbone organique des MES de la partie aval du Ruisseau de Remoray sont fortement variables. En période hivernale elles témoignent d'une contamination qui reste modérée (tab. 7). Du printemps à l'automne, ces concentrations augmentent pour atteindre des valeurs plus fortes.

Date	COT g/kg MS	N total mg/kg MS	P total mg/kg MS	C/N
20/02/17	36,5	4 000	949	9,1
13/03/17	32,7	3 000	832	10,9
11/05/17	42,1	3 900	926	10,8
08/06/17	57,0	5 800	1 325	9,8
02/08/17	73,1	6 000	1 517	12,2
06/11/17	76,9	9 300	1 761	8,3
<b>Moyenne</b>	<b>53,1</b>	<b>5 330</b>	<b>1 218</b>	<b>10,2</b>

Tableau 7. Teneurs en carbone organique en azote et en phosphore total des MES échantillonnées dans la partie aval du Ruisseau de Remoray à 6 reprises en 2017.

Les teneurs en azote mesurées dans les MES de la partie aval du Ruisseau de Remoray suivent séquence similaire. Elles reflètent des contaminations moyennes à très fortes en cet élément (fig. 29). Les concentrations les plus importantes sont observées du printemps à l'automne. Au moins de novembre, la valeur observée, qui dépasse le seuil de 8/kg de Matières sèches, coïncident avec le rapport C/N le plus faible.

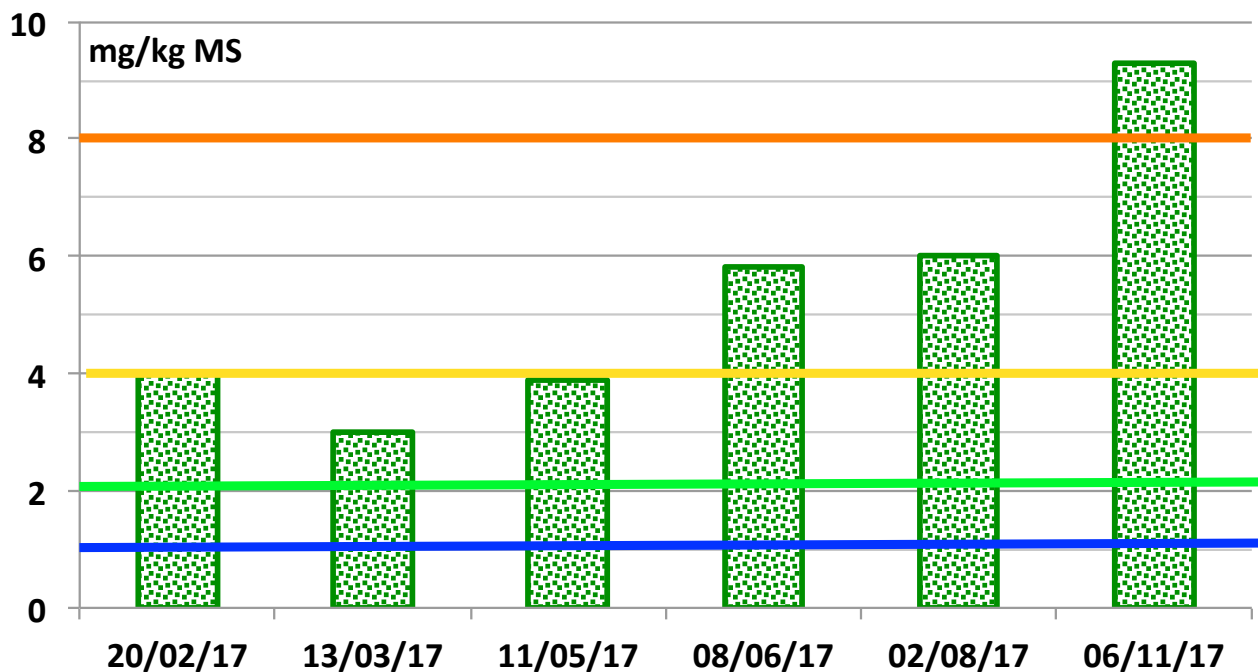


Figure 29. Variations des teneurs en azote des MES prélevées à 6 reprises dans le Ru de Remoray aval

Dans ce ruisseau, les teneurs en phosphore des MES témoignent également de contamination moyennes à forte (fig. 30). Comme dans le cas du carbone organique et de l'azote, les teneurs maximales sont observées de juin à novembre. Durant cette période les valeurs observées pour les MES prélevées dans ce ruisseau sont nettement supérieures à celles qui ont été mesurées dans les MES de la Drésine et du Lhaut aval.

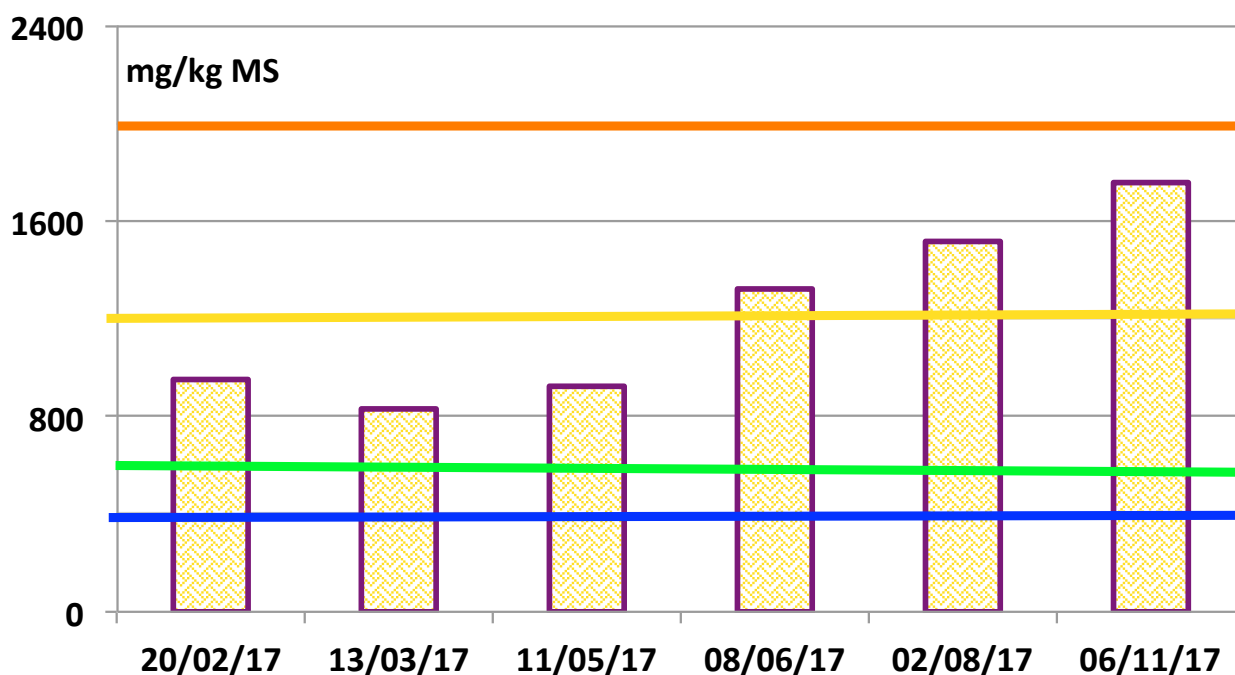


Figure 30. Teneurs en phosphore des MES prélevées à 6 reprises dans le Ru de Remoray aval

### III-4. Aperçu des contaminations en micropolluants des MES

#### Contamination métalliques des MES et des sédiments

Sur chacune des trois afférences principales, la recherche des ETM n'a été réalisée que sur un échantillon de matières en suspension, et un échantillon de sédiments, tous deux prélevés sur chacune des parties aval le 22/11/2017. Dans l'ensemble, les contaminations métalliques observées sont faibles (tab. 8).

ETM (mg/kg MS)	Station LQ	Lhaut aval		Drésine aval		Ru de Remoray aval	
		MES	Sédiment	MES	Sédiment	MES	Sédiment
<b>As</b>	0,4	8	10	22	13	4	17
<b>Cd</b>	0,001	0,39	0,55	0,59	0,66	0,70	0,45
<b>Cr</b>	0,1	14	17	30	28	27	26
<b>Cu</b>	0,1	6	5	9	7	31	13
<b>Hg</b>	0,009	0,06	0,06	0,09	0,09	0,16	0,08
<b>Ni</b>	1,0	8	9	12	14	14	10
<b>Pb</b>	0,004	7	10	16	17	31	21
<b>Sb</b>	0,005	0,31	0,28	0,44	0,33	0,69	0,37
<b>Sn</b>	0,049	0,76	0,65	1,21	1,26	4,82	2,58
<b>Zn</b>	0,3	75	47	84	161	278	111

Tableau 8. Teneurs en Eléments traces métalliques et métalloïdes des MES et sédiments échantillonnés à une occasion le 22/11/17 dans les portions aval du Lhaut, de la Drésine et du Ru de Remoray. Le code couleur est explicité en page 9. Les valeurs guides utilisées sont celles fournies par Bowden 1977, Mac Donald 2000, Crommentuijn et al., 2000, SEQ-EAU 2003.

Selon cette unique analyse, les sédiments du Ru de Remoray sont plus contaminés que ceux de la Drésine eux mêmes plus chargés que ceux du Lhaut. Cet ordre est cohérent avec celui des contaminations organiques, azotées et phosphorées ainsi qu'avec les capacités biogènes évaluées à partir de l'analyse quantitative de la macrofaune benthique effectuée en parallèle (Teleos 2015).

Les contaminations décelées à l'occasion de cette unique campagne de prélèvement portent sur les éléments suivants :

- l'arsenic dans les trois cours d'eau mais plus particulièrement dans la Drésine et le Ru de Remoray ;
- le mercure dans les 3 cours d'eau mais plus particulièrement dans le Ru de Remoray ;
- l'étain dans le Ru de Remoray ;
- le zinc dans la Drésine et le Ru de Remoray

Les contaminations en arsenic proviennent souvent de la percolation d'anciennes décharges. Elles peuvent aussi provenir de produits anciennement utilisés comme insecticides ou fongicides, dont l'arsénite de soude, qui n'a été interdit de mise sur le marché qu'en 2001.

L'étain, sous sa forme métallique inorganique, n'est toxique dans les milieux aquatiques qu'à de très fortes doses. S'il ne s'agit pas de composé organique de ce métal, les plus fortes teneurs observées à Remoray ne sont pas préoccupantes, mais reflètent probablement la percolation du ruisseau à travers l'ancienne décharge.

Ce site est en effet situé à quelques centaines de mètre en amont de la station de prélèvement. Il contient de nombreuses carcasses de voitures anciennes et de nombreux emballages métalliques étamés. La proximité de cette décharge explique certainement aussi les teneurs excédentaires en mercure et en zinc décelées dans les MES et les sédiments du Ruisseau de Remoray.

### Contamination des MES et des sédiments en HAP

Les prélèvements de MES et de sédiments prélevés à une occasion automnale sur les parties aval des trois afférences principales du lac de Remoray sont toutes nettement contaminées par des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP, tab. 9). Les contaminations des sédiments et des MES observées dans le Lhaut aval sont moins importantes que celles qui sont mesurées dans les deux autres cours d'eau.

Molécules ( $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{MS}$ )	Station LQ	Lhaut		Drésine		Ru de Remoray	
		MES	Sédiment	MES	Sédiment	MES	Sédiment
naphtalène	31,3	<LQ	<LQ	32	<LQ	<b>103</b>	<LQ
acénaphtylène	1,8	22	13	20	13	<b>136</b>	50
acénaphène	3,3	<LQ	15	16	47	<b>57</b>	48
fluorène	2,7	5	23	23	96	<b>96</b>	85
phénanthrène	14,9	46	218	224	1433	868	867
anthracène	2,8	34	62	58	208	218	200
fluoranthène	7,6	343	788	684	2758	2473	2152
pyrène	5,2	306	559	475	1868	1625	1422
benzo(a)anthracène	0,7	148	262	208	521	631	542
chrysène	2,6	171	263	222	409	671	476
benzo(b) fluoranthène	2,0	173	226	236	338	759	540
benzo(k) fluoranthène	2,6	159	212	222	268	774	471
benzo(a) pyrène	0,8	177	202	252	228	830	545
indéno(1,2,3-cd) pyrène	1,1	154	130	193	133	669	357
dibenz(ah) anthracène	0,2	58	24	57	30	177	92
benzo(ghi) perylène	1,1	132	112	159	103	569	330
<b>Total</b>		<b>1927</b>	<b>3109</b>	<b>3081</b>	<b>8453</b>	<b>10656</b>	<b>8176</b>

Tableau 9. Teneurs HAP des MES et sédiments échantillonnés à une occasion le 22/11/2017 dans les portions aval du Lhaut, de la Drésine et du Ru de Remoray. Le code couleur est explicité page 9. Les valeurs guides utilisées sont celles proposées par McDonald et al. 2000 et SEQ-EAU 2003.

Les sédiments de la Drésine sont moins impactés que ceux du Ruisseau de Remoray. En revanche, les MES de ce derniers cours d'eau sont nettement plus contaminées, y compris par les molécules dont la masse moléculaire est la plus faible, qui sont de loin les plus volatiles (vers le haut du tableau 9). Cette tendance pourrait indiquer que des sources de contaminations récentes affectent encore les MES du Ruisseau de Remoray.

### Contamination des MES et des sédiments en pesticides

Parmi les 6 échantillons de MES et de sédiments prélevés à une seule occasion sur les parties aval des trois afférences principales du lac de Remoray, 5 sont contaminés par de 3 à 6 des 38 pesticides recherchés (tab. 10).

Pesticides (ug/kg sec)	LOD	Lhaut		Drésine		Ru Remoray	
		MES	SED	MES	SED	MES	SED
alpha HCH	0,06	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
HCB	0,06	<b>0,14</b>	<LOD	<b>0,09</b>	<LOD	<b>0,14</b>	<b>0,12</b>
beta HCH	0,08	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
gamma HCH (Lindane)	0,28	<b>1,44</b>	<LOD	<b>2,12</b>	<b>0,40</b>	<b>1,64</b>	<b>0,76</b>
delta HCH	0,11	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Acetochlor	0,11	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Chlorpyrifos-methyl	0,11	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
heptachlor	0,11	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
aldrin	0,11	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Chlorpyrifos-ethyl	0,11	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
oxychlordane	0,11	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
heptachlor epoxide cis	0,11	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
hept. Epox. trans	0,11	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
chlordane gamma	0,11	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
op' DDE	0,28	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Endosulfan-I	0,28	<LOD	<LOD	<b>0,74</b>	<LOD	<LOD	<LOD
chlordane alpha	0,11	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
nonachlor trans	0,11	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
dieldrin	0,11	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
pp' DDE	0,08	<b>0,67</b>	<LOD	<b>0,11</b>	<LOD	<b>0,74</b>	<b>0,40</b>
endrin	0,11	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Endosulfan-II	0,28	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
op' DDT	0,28	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
pp' DDD	0,08	<LOD	<LOD	<b>0,15</b>	<LOD	<b>0,38</b>	<b>0,14</b>
Endrin aldehyde	0,11	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
op'DDD	0,28	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Endosulfan-sulfate	0,08	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
pp' DDT	0,08	<b>0,36</b>	<LOD	<b>1,68</b>	<b>0,47</b>	<b>0,75</b>	<b>0,91</b>
Endrin ketone	0,11	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Methoxychlor	0,11	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
mirex	0,14	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Cyhalothrin lambda	0,11	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Cypermethrin	0,28	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Deltamethrin	0,28	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Permethrin	0,28	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Pendimethalin	0,08	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Propiconazol	0,28	<LOD	<LOD	<LOD	<b>3,6</b>	<LOD	<LOD
Tebuconazol	0,28	<LOD	<LOD	<LOD	<b>1,0</b>	<LOD	<LOD
Somme DDT		<b>1,03</b>	<LOD	<b>1,93</b>	<b>0,47</b>	<b>1,86</b>	<b>1,45</b>
Somme pesticides		<b>2,61</b>	<b>0,0</b>	<b>4,88</b>	<b>5,47</b>	<b>3,64</b>	<b>2,34</b>

Tableau 10. Teneurs en pesticides des MES et sédiments échantillonnés à une occasion le 22/11/2017 dans les portions aval du Lhaut, de la Drésine et du Ru de Remoray. Le code couleur est explicité page 9. Les valeurs guides utilisées sont celles proposées par McDonald et al. 2000, Crommentuijn et al., 2000, SEQ-EAU 2003, EAWAG EPFL 2014

D'après les critères de qualité et guides d'interprétation utilisées, aucune de ces concentrations prises individuellement n'est susceptible d'induire à courts termes des effets létaux sur les organismes aquatiques (McDonald et al. 2000, Crommentuijn et al. 2000, SEQ-EAU 2003, EAWAG EPFL 2014). Cependant, les valeurs observées peuvent induire à long terme des régressions pour les espèces les plus sensibles ou contribuer à créer des déséquilibres entre les différents étages de l'édifice biologique. En outre les risques entraînés par leurs effets conjugués ne sont pas connus.

Parallèlement, les contaminations observées pourraient constituer des témoins d'altération des sols. En effet, la plupart des substances décelées sont des pesticides à forte rémanence dont l'utilisation est désormais interdite, parfois depuis plusieurs dizaines d'années, comme le Lindane ou le DDT, parfois plus récemment comme l'endosulfan. Leur présence actuelle dans les sédiments et surtout dans les MES pourrait résulter de la déstabilisation des sols agricoles en lien avec les quantités croissantes d'azote épanchée sur prairies utilisées pour l'élevage laitier (MUDRY et al. 2014).

Comme dans le cas des métaux et des HAP, le Lhaut paraît moins affecté par ces contaminations que les deux autres ruisseaux. En effet, aucune des substances recherchées n'a pu être décelées dans les sédiments du Lhaut. En revanche, ses MES sont bien contaminées comme celles des autres cours d'eau.

Dans le cas de la Drésine, les sédiments sont en outre contaminés par deux fongicides utilisés principalement pour le traitement du bois. Ces concentrations, très modérées, pourraient témoigner de l'influence amoindrie mais persistante de la pollution émise pendant plusieurs années par la scierie de Boujons.

## IV. Flux de MO et de nutriments arrivant au lac

### IV-1. Méthodologie

#### Mesures et calcul hydrologiques

Pour passer des concentrations aux flux de matières transitant par les trois afférences principales du lac de Remoray vers le plan d'eau, il était nécessaire d'évaluer les débits de chacun des trois cours d'eau, au moment des analyses puis de calculer les débits annuels.

Pour mesurer ou évaluer, 4 types d'investigations ont été menés :

1. Une série de jaugeages ont été réalisés pour mesurer les débits des afférences principales et des systèmes apicaux.
2. Des enregistreurs de niveaux « Levelogger Junior M5 » ont été installés sur la partie basse de chacune des 3 afférence principales ; le pas de mesure choisi a été de un quart d'heure. La précision est d'environ 5 mm.

A la suite de plusieurs problèmes techniques, les Levelogger n'ont pu commencer à enregistrer les niveaux qu'à partir de juin 2017.

3. Les débits ont aussi été estimés à partir de deux stations hydrométriques proches dont les données horaires ont été fournies par la DREAL :
  - la station U2002010 sur le Doubs à Mouthe ;
  - la station U203505002 sur le Drugeon à Vaux-et-Chantegrue
4. La pluviométrie à Mouthe et à Malbuisson a également été utilisée ainsi que les valeurs d'évapotranspiration pour déduire les écoulements annuels à partir des surfaces des bassins versant topographiques. Cette approche a surtout été suivie pour apprécier l'existence de pertes ou de résurgences karstiques

#### Calcul des flux

Connaissant les débits, les flux de carbone organique, de phosphore et d'azote ont été calculés suivant deux méthodes :

1. La moyenne des concentrations a été multipliée par le volume annuel écoulé
2. La moyenne des concentrations a été d'abord pondérée par la valeur des débits au moment de mesures puis multipliée par le volume annuel écoulé

Ces calculs ont été pratiqués pour la période allant de fin aout 2016 à fin aout 2017 qui correspond à une année hydrologique particulièrement sèche. Puis ils ont aussi été étendus à l'automne 2017 et au début de l'hiver 2017-2018 qui a été particulièrement humide. Enfin un essai d'approche des flux pour une année moyenne a été effectué.

## IV-2. Approche hydrologique

### Jaugeages

Les jaugeages ont été effectués pour des débits contrastés, en couvrant plusieurs saisons. Pour les jaugeages réalisés sur la partie aval des 3 afférences principales, la variation des débits mesurés est bien corrélée à celles des débits du Doubs à Mouthe (fig. 31). La même relation s'applique aux mesures effectuées sur la Drésine amont et sur les Vurpillières.

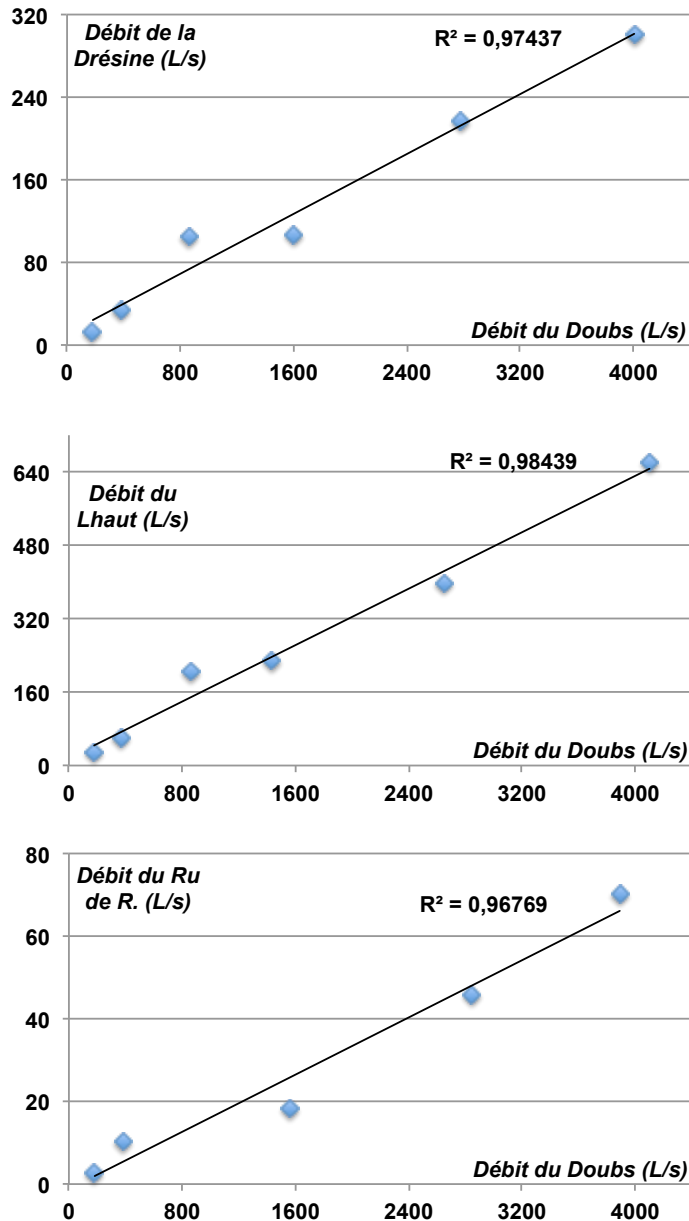


Figure 31. Corrélation entre les débits jaugeés sur le Lhaut, la Drésine et le Ruisseau de Remoray et les débits fournis pour le Doubs par la station hydrométrique de Mouthe

Pour ces 5 sites, les débits mesurés sont nettement moins bien corrélés avec les débits enregistrés aux mêmes moments par la station de Vaux et Chantegrue sur le Drugeon. En revanche, la variation des débits sur cette dernière station reflète d'avantage celle des débits du Lhaut amont, du Ru de Remoray amont et de Bonne Fontaine.

Toutefois que les jaugeages ont été effectués hors période de gel, de neige ou d'orages violents. Il est probable que les relations entre les régimes des différents cours d'eau soient en fait beaucoup plus complexe et changent par intervalles saisonniers et météorologiques.

### Enregistrement des niveaux des niveaux

Les enregistreurs de niveaux ont été calés et synchronisés sur la partie avale de chacune des trois afférences principales à partir du 08/06/2017. Les variations de niveaux respectives des trois cours d'eau ont été ramenées à la même échelle de hauteur relative pour pouvoir être comparées (fig. 32).

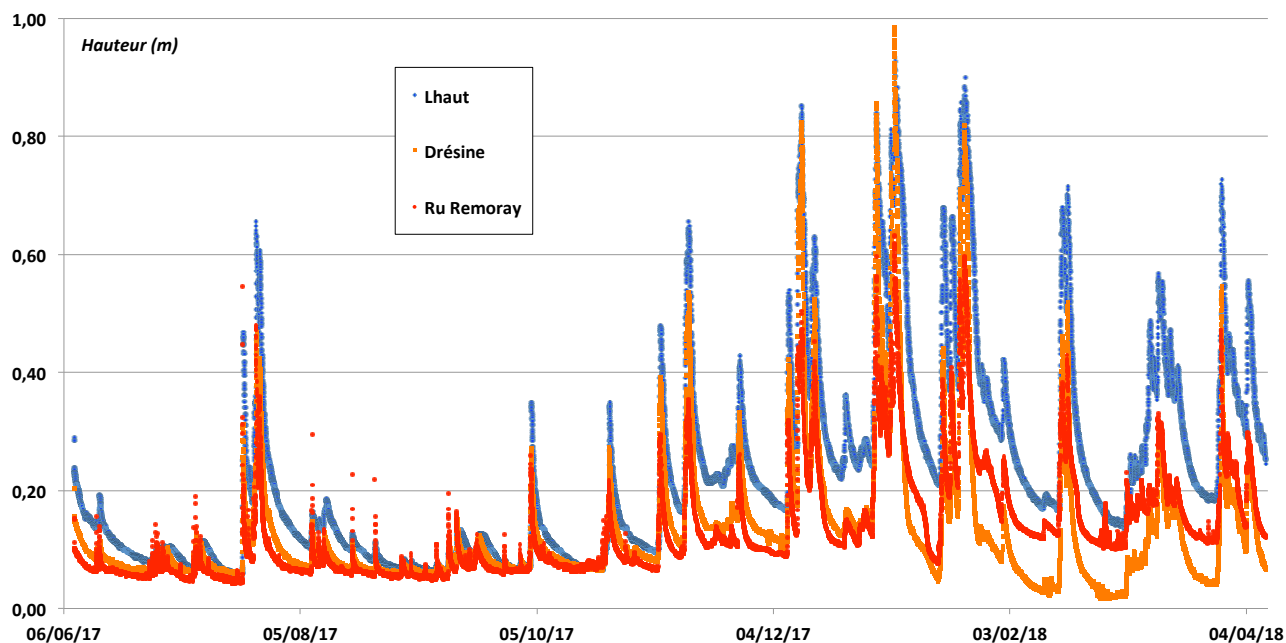


Figure 32. Variations de niveaux enregistrées du 6/6/2017 aux 04/04/2018 dans la partie aval des trois afférences principales du lac de Remoray.

Pour chaque crue, les variations de niveaux des trois cours d'eau suivent des schémas très similaires, mais avec un décalage temporel qui est lui même variable (fig. 33). En règle générale, le ruisseau de Remoray monte plus vite que la Drésine dont la crue précède elle même celle du Lhaut.

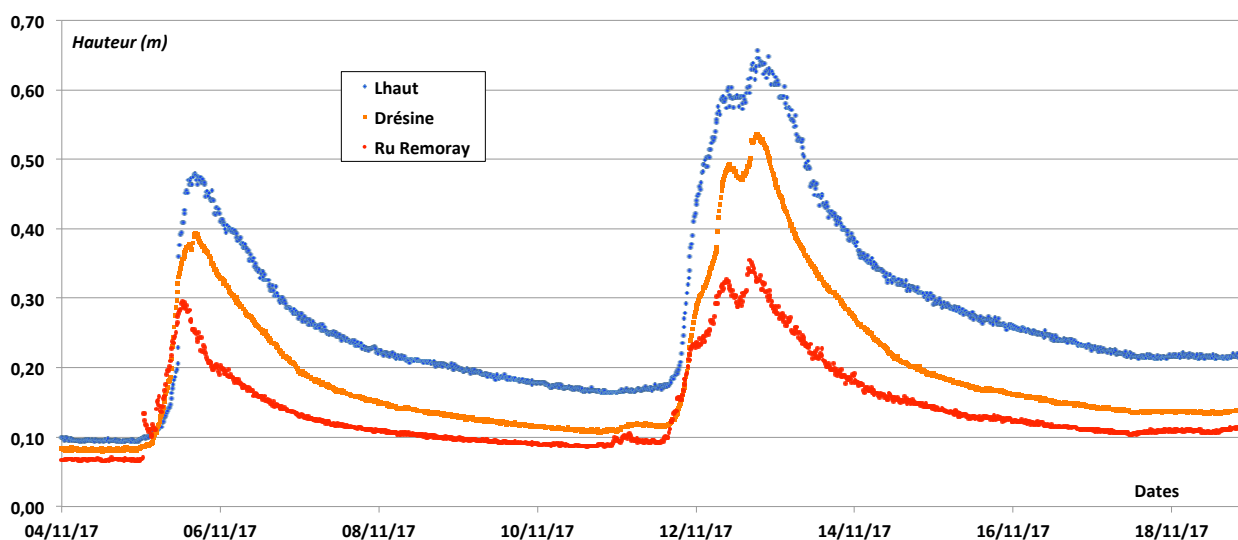


Figure 32. Variations de niveaux enregistrées lors des crues du 5/11 et du 12/2018 dans la partie aval des trois afférences principales du lac de Remoray.

Cet ordre est susceptible de changer suivant les saisons ainsi que lors d'orages localisés. En revanche, dans presque tous les cas, les niveaux de la Drésine décroissent plus rapidement que ceux des deux autres cours d'eau.

### Evaluation des débits moyens annuels

Les débits moyens annuels ont été calculés à l'aide des données de pluviométrie et des surfaces de bassin versant des afférences (fig. 34 et tab. 11 à 13). Ces estimations ont été comparées, à celles obtenues par les jaugeages et l'enregistrement des niveaux, ainsi qu'aux mesures réalisées par la DIREN (devenue DREAL) de 1993 à 1994 (ann. 4).

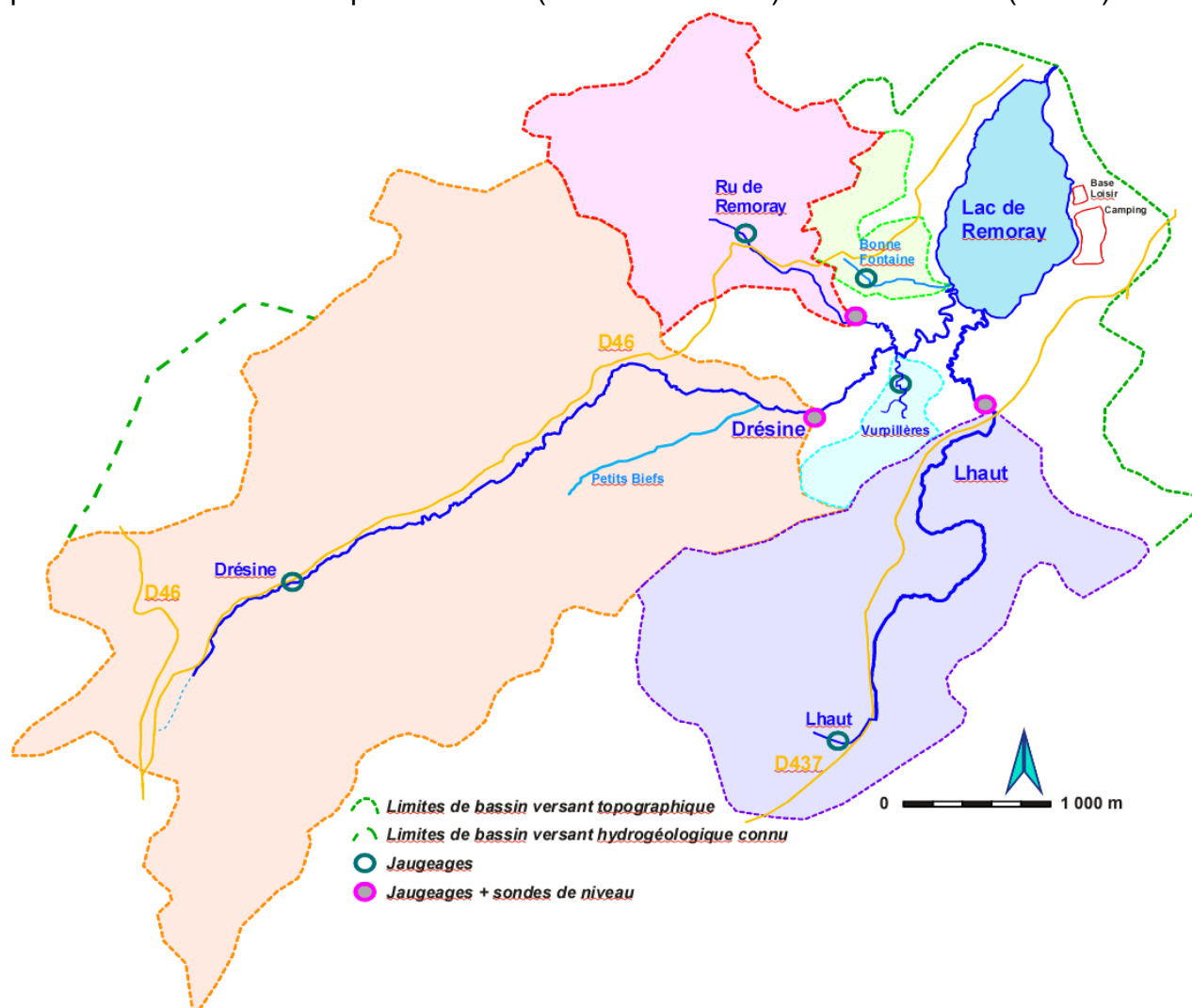


Figure 33. Délimitation des bassins topographiques des afférences du lac de Remoray.

Stations	Surface ha	Qm si BH = 840 mm L/s	Qm si BH= 1060 mm L/s	Qm 1994 L/s
Lhaut	485	129	163	<b>484</b>
Vurpillères	44	12	15	30 ?
Drésine	1328	354	446	<b>204</b>
Remoray	280	75	94	<b>65</b>
Bonnefontaine	58	15	19	8 ?

Tableau 11. Comparaison des débits moyens annuels des afférences du lac de Remoray estimés d'après jaugeages (à droite) et à partir des surfaces de bassin versant et du bilan hydrique (BH) des années chaudes et sèches (BH= 840 mm) et des années humides et fraîches (BH = 1060 mm).

Stations	Surface <i>ha</i>	Qm si Qsp du Doubs <i>L/s</i>	Qm si Qsp Drugeon <i>L/s</i>	Qm 1994 <i>L/s</i>
<b>Lhaut</b>	485	185	104	<b>484</b>
<b>Vurpillères</b>	44	17	9	30 ?
<b>Drésine</b>	1328	507	286	<b>204</b>
<b>Remoray</b>	280	107	60	<b>65</b>
<b>Bonne Fontaine</b>	58	22	12	8 ?

Tableau 12. Comparaison des débits moyens annuels des afférences du lac de Remoray calculés en 1994 (à droite) ou estimés à partir des débits spécifiques du Doubs à Mouthe ( $Q_{sp} = 38,2 \text{ L/km}^2$ ) et du Drugeon à Vaux et Chantegrue ( $Q_{sp} = 21,5 \text{ L/km}^2$ ) ; données DREAL et banque HYDRO

Les débits estimés d'après les données de pluviométrie et d'évapotranspiration issues du site web « Sylvae » ne sont pas cohérents avec les mesures réalisées. En particulier les débits mesurés sur le Lhaut sont systématiquement deux fois plus importants que ceux mesurés sur la Drésine, alors que le rapport entre leur surface de bassin versant est inverse. Des inversions de même nature sont observées pour les Vurpillères, dont les débits mesurés sont supérieurs à ceux qui sont estimés à partir des bilans hydriques, ainsi que pour les Ruisseaux de Remoray et Bonne Fontaine dont la configuration est inverse.

Ces « anomalies » hydrologiques sont aussi apparentes si l'on utilise les débits spécifiques du Doubs à Mouthe et du Drugeon à Vaux et Chantegrue pour estimer les débits des afférences du lac de Remoray. Sous ce point de vue, les débits mesurés du Lhaut et des Vurpillères sont nettement supérieurs à ceux qui sont estimés. En revanche, les débits de la Drésine, des Ruisseaux de Remoray et de Bonne Fontaine se rapprochent de ceux qui sont estimés en utilisant le débit spécifique du Drugeon, même s'il leur reste inférieur.

On en déduit que :

- le Lhaut et les Vurpillères bénéficient de résurgences ou d'exurgences karstiques ;
- la Drésine ainsi que, dans une moindre mesure, le Ru de Remoray et la Bonne Fontaine sont victimes de pertes.

Une première estimation des modules des différentes afférences a donc été effectuée à partir de la moyenne des différentes mesures réalisées (tab. 13).

Station / Débits (L./s)	Q 09/16- 09/17	Q 01/17-01/18	Q1993	Q1994	Qm estimé
<b>Amont Lhaut</b>	22	68	48	54	<b>48</b>
<b>Lhaut RNN</b>	225	588	<u>440</u>	484	<b>434</b>
<b>Vurpillères</b>	21	34	29	30	<b>28</b>
<b>Amont Drésine</b>	7	11	10	11	<b>10</b>
<b>Drésine RNN</b>	108	337	<u>204</u>	308	<b>239</b>
<b>Amont Ru Remoray</b>	13	58		39	<b>37</b>
<b>Ru Remoray</b>	26	90		65	<b>60</b>
<b>Bonne fontaine</b>	3	13		9	<b>8</b>

Tableau 13. Estimation des débits moyens d'après jaugeages de septembre 2016 à septembre 2017 (années hydrologiques sèches) et de janvier 2017 à janvier 2018 (années hydrologique humides) ; comparaison aux données DIREN (DREAL) 1993 et 1994 ; estimation provisoire du module (Qcm estimé) ; interpolations en italiques, données incomplètes soulignées

### IV-3. Flux organiques et nutritives annuels

#### Flux de fin août 2016 à fin août 2017 : année sèche

La connaissance des débits permet de passer des concentrations aux flux de matières dissoutes et particulaires parvenant aux lacs, via les afférences étudiées (tab. 14). Toutefois, cette approche sous-estime systématiquement les apports aux lacs.

En effet, d'une part, le bassin versant du lac est un peu plus grand que les bassins cumulés des afférences qui ont été prises en compte (cf. fig. 33). Le bilan des flux ne porte donc géométriquement que sur 82 % des apports si on se reporte au rapport des surfaces des bassins hydrologiques.

Apports kg/an Station	Carbone organique		Azote		Phosphore	
	An. sec.	An. hum.	An. sec.	An. hum.	An. sec.	An. hum.
LHAUT am.	1680	5192	1056	3265	57	175
<b>LHAUT RNN</b>	24697	59559	2466	7149	174	423
<b>VURPILLERES</b>	1115	1806	237	384	5	8
DRESINE am.	461	725	222	349	5	8
<b>DRESINE RNN</b>	12391	40113	4862	16261	172	562
RU REMORAY am.	1304	5817	211	943	26	115
<b>RU REMORAY RNN</b>	4083	13804	568	2093	106	344
<b>BONNEFONTAINE</b>	224	971	75	323	2	7
<b>Total au lac (5 aff.)</b>	42510	116253	8208	26210	458	1343
<b>Max. réf. théorique</b>	12614	32545	4415	10848	252	678
<b>Opt. réf. théorique</b>	6307	16273	2523	6780	126	407

Tableau 14. Flux de carbone organique, d'azote et de phosphore estimés parvenant au lac de Remoray par le biais de ses 5 afférences principales en année hydrologique sèche (du 1<sup>er</sup> septembre 2016 au 1<sup>er</sup> septembre 2018) et humide (du 1<sup>er</sup> janvier 2017 au du 1<sup>er</sup> janvier 2018) ; les valeurs guides optimales et maximales théoriques sont calculées à partir de concentrations optimales dans les cours d'eau.

D'autre part, le suivi en continu des variations de turbidité et le retour sur l'hydrologie des cours d'eau a montré que les crues les plus importantes n'ont pas été échantillonnées. Or ces épisodes sont ceux qui transfèrent les quantités de matières solubles et dissoutes les plus importantes.

### Corrections partielles et prises en compte des variations climatiques

Ce dernier biais a pu être partiellement corrigé en utilisant la composition moyenne des MES piégées pendant 6 crues ainsi que les flux estimés à partir des sondes de turbidité (tab. 15). Cette approche conduit à majorer les apports au lac de 10 à 50 % selon les années et les paramètres considérés. Elle montre qu'une bonne partie du phosphore est apporté sous forme particulaire, principalement par le biais de la Drésine.

Apports en kg/an	Carbone org.	Azote	Phosphore	MES
LHAUT RNN	10 060	842	114	201 584
DRESINE RNN	13 769	1 236	230	131 220
RU REMORAY RNN	2 295	231	53	109 800
<b>Total au lac (3 Aff.)</b>	<b>26 125</b>	<b>2 309</b>	<b>396</b>	<b>442 604</b>

Tableau 15. Flux de carbone organique, d'azote et de phosphore **particulaires** estimés parvenant au lac de Remoray par le biais de ses 3 afférences principales entre le 01/01/2017 et le 01/01/2018

Ces flux particuliers ont été calculés pour l'année hydrologique 2017. Par conséquent les 2 crues majeurs de janvier 2018, durant lesquelles les concentrations en MES ont dépassé 1000 mg/L n'ont pas été prises en compte. Ces flux comportait probablement une part non négligeable de sables peu organiques.

Parallèlement, la période d'étude qui s'est déroulée du 1<sup>er</sup> aout 2016 au 31 janvier 2018 a connu une succession de 2 périodes hydrologiques contrastées. Entre le 1<sup>er</sup> septembre 2016 et le 1<sup>er</sup> septembre 2017 le climat a en effet été sec et chaud, alors que l'hiver 2017-2018 a connu de très fortes précipitations. Aussi les calculs ont été faits pour 2 séquence de 12 mois se chevauchant et figurant 2 années hydrologique extrêmes (tab. 14).

Compte tenu de ces biais systématiques minorant et des fortes variabilités climatiques, une estimation des flux **moyens** de carbone organique, de phosphore et d'azote parvenant au lac peut être proposée (tab. 16).

Apports kg/an	Carbone org.	Azote	Phosphore
LHAUT RNN	52 188	5 650	412
VURPILLERES	1 460	311	7
DRESINE RNN	40 021	11 797	596
RU REMORAY RNN	11239	1 562	277
BONNEFONTAINE	598	199	4
<b>Total au lac (5 afférences)</b>	<b>105 506</b>	<b>19 518</b>	<b>1 297</b>
<i>Max. réf. théorique</i>	<i>22 580</i>	<i>7632</i>	<i>465</i>
<i>Opt. réf. théorique</i>	<i>11 290</i>	<i>4652</i>	<i>266</i>

Tableau 16. Flux de carbone organique, d'azote et de phosphore moyens corrigés parvenant au lac de Remoray par le biais de ses 5 afférences principales) ; les valeurs guides optimales et maximales théoriques sont calculées à partir de concentrations optimales dans les cours d'eau.

## Essai d'interprétation et d'appréciation des tendances évolutives

Quatre enseignements majeurs peuvent être tirés de cette analyses de flux parvenant au lac de Remoray, via ses afférences principales

1. Les flux de carbone organique, d'azote et de phosphore parvenant au lac sont nettement excessifs.

Cette tendance est confirmée par la comparaison des valeurs moyennes estimées pour le bassin versant de Remoray avec celles décrites dans la littérature pour des bassins versants subissant des pressions agricoles contrastées et dont la qualité des réseaux hydrologiques est plus ou moins affectée (tab.17).

Flux en kg par km2 de BV total	N	P	Source
Finlande foret extensive	140	6	Rankinen et al 2016
USA BV bonne qualité de l'eau	432	19	Sheeder et Evan 2004
<b>BV Remoray 2017</b>	<b>784</b>	<b>41</b>	<b>Présente étude</b>
USA BV qualité de l'eau altérée	1477	49	Sheeder et Evan 2004
Finlande agriculture intensive	1500	110	Rankinen et al 2016

Tableau 17. Comparaison des flux de carbone organique, d'azote et de phosphore par unité de surface dans des bassins versants soumis à des pressions d'intensité anthropique croissante.

2. Même si les concentrations en azote et en phosphore des parties apicales sont déjà excessives, la quasi totalité des excès de matières organiques et de nutriment est apportée tout au long du linéaire des 3 afférences principales (tab. 14).
3. Le Ruisseau de Remoray dont le débit représente 7 % des apports en eau transfère 21 % des apports en phosphore (tab. 16).  
Parallèlement, la Drésine dont le débit représente 28 % des apports en eau transfère 46 % des apports en phosphore et 60 % des apports en azote.
4. La comparaison des flux moyens estimés dans le cadre de la présente étude avec ceux qui avaient été évalués en 2004-2005 (Teleos 2005, tab. 18) montre que les apports organiques et nutritifs semble avoir fortement augmenté alors qu'ils étaient déjà excessifs à l'époque

Apport en kg/an	Carbone org.	Azote	Phosphore
<b>Flux 2004-2005</b>	18 252	9 430	499
<b>Flux 2017</b>	77 323	16 700	890

Tableau 18. Comparaison des flux de carbone organique, d'azote et de phosphore parvenant au lac de Remoray par le biais de ses 3 afférences principales évalués en 2004 (Teleos 2005) et estimés en 2017 **sans** prendre en compte les flux particulières des pointes de crues.

La portée et la robustesse de cette comparaison doivent toutefois être relativisées. En effet, les mesures effectuées en 2004 se sont résumées à 8 campagnes contre 32 en 2017. En outre, si l'on considère l'année hydrologique comprise entre septembre 2016 et septembre 2017 les valeurs des flux de phosphore et de nutriments sont similaires à celles observées entre mai 2004 et avril 2005.

Toutefois, le cumul des précipitation enregistré durant cette dernière période à Mouthe (1664 mm) en fait une année hydrologique moyenne, plus comparable à la période comprise entre le 1er janvier 2017 au premier janvier 2018. En outre, même par rapport à une année sèche, la valeur du flux de carbone estimée pour la période actuelle est nettement plus importante que celle estimée pour la période 2004-2005.

***Cette dernière tendance pourrait s'expliquer par la dissociation des agrégats organo-calcaires indiquant une déstabilisation croissante des sols du BV.***

## V. Synthèse et recommandations

### V-1. Contamination des afférences et flux polluants

#### Bilan sur la contamination organique et nutritive des afférences

Le résultat des analyses réalisées dans les afférences du lac de Remoray, pour en mesurer les teneurs en carbone organique et en nutriment, à une trentaine d'occasions dont des crues de moyennes importances, a montré que :

1. **Les teneurs en matières organiques, en particulier dissoutes, et en azote en particulier sous forme de nitrates, sont systématiquement en excès** par rapport au niveau trophique normal de cours d'eau apicaux, sans que des pics de grande intensité n'aient pu être décelés.

Les contaminations des afférences du lac de Remoray en ces éléments sont donc modérées, mais continues et généralisées. Elles s'étendent à l'ensemble du chevelu hydrographique jusqu'aux secteurs de sources.

2. **Les teneurs en phosphore sont faibles en basses-eaux, mais plus soutenues en période de hautes-eaux.**

Elles peuvent alors atteindre des valeurs moyennes à fortes, en particulier dans le Ru de Remoray. Dans tous les cours d'eau, la proportion de phosphore particulaire dépasse 50 % durant les hautes eaux, en particulier en automne et en hiver.

#### Bilan sur les transferts de matière organique et de nutriments

Ces excès modérés, mais continus et généralisés de matières organiques et d'azote, combinés avec ces pics de phosphore durant les crues se traduisent par **des gammes de flux en nutriments correspondant à des bassins versants artificialisés.**

L'azote est transféré vers le lac majoritairement sous forme de nitrates immédiatement biodisponible. En revanche les flux de phosphore sont majoritairement particulaires.

Par rapport aux valeurs estimées en 2004-2005, à l'aide d'un protocole beaucoup moins poussé, les charges organiques et nutritives des cours d'eau semblent avoir nettement augmentées. Cette tendance pourrait être induite par une déstabilisation croissante des sols en lien avec l'augmentation des amendements azotés qui y sont épandus (Mudry et al. 2015).

Les valeurs estimées pour les flux de matières organiques et nutritives ne sont pas compatibles avec le maintien d'une bonne qualité pour un système lacustre récepteur (Aiba et Hotake 1977, Sheeder et Evan 2004).

#### Bilan sur la contamination des afférences par des micropolluants

L'analyse des teneurs en ETM, en HAP et en une quarantaine de pesticides, réalisée à une seule occasion dans les sédiments et les MES des 3 afférences principale du lac de Remoray, a montré qu'elles étaient polycontaminées par ces substances peu solubles.

Les sédiments des 3 ruisseaux sont en particulier contaminés par des HAP. Les teneurs les plus fortes en ces éléments sont mesurés dans la Drésine et le Ruisseau de Remoray. Les concentrations en HAP volatiles mesurées dans les MES de ce dernier cours d'eau indique en outre qu'il est soumis à une source de contamination encore active.

Cette hypothèse est corroborée par les teneurs moyennes en mercure et en zinc plus soutenues de ses MES. Parallèlement, les MES de la Drésine témoignent d'une contamination moyenne à forte en arsenic. En revanche, les contaminations métalliques des sédiments des 3 cours d'eau sont moyennes à faibles, en particulier pour le Lhaut.

Ce dernier cours d'eau semble également peu affecté par les 38 pesticides recherchés dont aucun n'a pu être décelé dans ses sédiments, avec des seuils de détection pourtant inférieurs à 1 ppb (1 µg/kg de MS). En revanche les MES des 3 cours d'eau ainsi que les sédiments de la Drésine et du Ru de Remoray contiennent des teneurs, certes modérées, de 3 à 5 pesticides réputés persistants et dont l'usage est prohibé depuis plusieurs dizaines d'années.

Cette dernière tendance confirme l'hypothèse d'une déstabilisation récente des sols du bassin versant, déjà formulée à propos de l'augmentation des flux de carbone exportés vers les milieux aquatiques.

Parallèlement, les sédiments prélevés dans la Drésine contenait de faibles concentrations de fongicides, utilisés pour la protection du bois. Cette contamination modérée pourrait résulter de l'influence amoindrie mais persistante de l'ancienne pollution exercée pendant des dizaines d'années par la scierie de Boujeons, dont l'activité a cessé en 2010.

Cependant, cette recherche de micropolluants a été très partielle. D'une part, une seule campagne de prélèvement a été effectuée alors que la dynamique des contamination est d'une grande variabilité. D'autre part, seule une partie des substances susceptibles d'être utilisées sur le bassin versant a été recherchée. En particulier les résidus de médicaments vétérinaires, et les herbicides n'ont pas été recherchés, ni les hydrocarbures aliphatiques. Enfin, aucune analyse n'a été effectuée dans l'eau.

## V-2. Recherche des sources de contaminations et de leur transferts

### Sources de contamination

Les sources des poly-contaminations transférées au lac sont multiples (tab. 19).

1. Les excès de matières organiques et d'azote proviennent des épandages agricoles sur les prairies du bassin versant, probablement amplifiés par une tendance récente à la déstabilisation des sols
2. Une partie du phosphore excédentaire pourrait avoir la même source, en particulier en ce qui concerne la portion particulière. Cependant, les pics mesurés dans le Ruisseau de Remoray sont plus difficiles à expliquer et pourraient provenir d'une autre source, qui reste à découvrir.
3. Les contaminations en métaux (arsenic, mercure, zinc ...) pourraient provenir des décharges disséminées sur le bassin versant, dont celle qui est traversée par le ruisseau de Remoray, à l'amont immédiat de son entrée dans la réserve naturelle.

4. Les contaminations en HAP pourraient provenir principalement de la composition des anciens tapis routiers. En effet, jusqu'en 2005, les enrobés des routes de moyennes et de hautes montagne comportaient souvent du goudron de houille, réputé pour sa bonne tenue face aux écarts thermiques et d'un excellent rapport qualité / prix. Cependant ce matériau contient une grande quantité de HAP. Or le profil « moléculaire » des sédiments du Haut Doubs correspond au sien (Chiffre et al. 2015)

Altérations chimiques	Sources probables	Causes premières de perturbations	Transferts /amplification
Excès d'azote dont surtout nitrates et de carbone organique dissous	Epandage agricole dont lisier	Excès d'amendement Azote minéral Lessivage hors période végétative (octobre à avril inclus) Déstabilisation des sols..	Vulnérabilité des sol Absence de frange tampons. Portion rectifié des ruisseaux Pertes/résurgences ?
Excès de phosphore (lac)	idem Autre source : diagnostic à faire sur le BV du Ru Remoray	idem Réflexion sur la nourriture hivernale du bétail ?	Idem, en particulier pour le Ruisseau de Remoray et la Drésine
Contamination ETM	Décharges ? Anciennes pratiques agricoles (arsenic)	Percolation dans les décharges Déstabilisation des sols ? Gestion des fossés ? Salage des routes ?	Absence de frange tampons. Portion rectifié des ruisseaux Pertes/résurgences ?
Contamination HAP	Ancien tapis routier Décharges ? Gravats utilisés en remblai ou pour chemins agricoles ou forestiers ?	Percolation dans les décharges Gestion des fossés ? Salage des routes ?	Insuffisance des franges tampons
Contamination en pesticides	Anciennes pollutions remobilisées ? Traitement vétérinaires ( bovins et équidés) ? Utilisations domestiques ?	Déstabilisation des sols ? Pratiques de gestion préventives systématiques des parasitoses ? Fragilisation du bétail par intensification et densification ? Percolation dans les décharges ?	Vulnérabilité des sol Absence de frange tampons. Portion rectifié des ruisseaux Pertes/résurgences ? Périodes d'épandages

Tableau 19. Inventaire synoptique des sources et des causes d'altérations de la qualité chimiques des milieux aquatiques ainsi que des mécanismes de transferts des sols aux milieux aquatiques.

### Mécanisme de transferts

Les différentes contaminations observées sont rapidement et intensément transférées vers le lac de Remoray, à cause de plusieurs facteurs naturels parfois aggravés par les pratiques anthropiques. Ces facteurs et pressions contrôlant les vitesses de transfert doivent être pris en compte pour améliorer la gestion du Bassin Versant.

Les facteurs naturels favorisant les transferts des sols aux cours d'eau sont les suivants :

1. La forte pente du BV et des ruisseaux en amont de la cuvette lacustre.
2. La faible profondeur d'une grande partie des sols calcaires
3. L'existence probable de pertes et de résurgences

Les pressions anthropiques accélérant et intensifiant les transferts des sols aux cours d'eau et des cours d'eau vers le lac sont les suivantes

1. La rectification ou le curage de certaine portion de cours d'eau à l'amont de la réserve naturelle, en particulier dans leurs parties apicales.
2. La réduction à néant des franges de ripisylves et la réduction extrême des marais bordant les cours d'eau
3. Le tassement et la déstructuration des sols (casse cailloux, multiplication des épandages et donc de la circulation des engins sur les parcelles agricoles, retournement des prairies ...)

### Réduction et appauvrissement des zones tampons

Parmi les pressions anthropiques aggravant les vitesses de transferts et grévant drastiquement les capacités d'autoépuration, l'insuffisance ou l'absence de franges humides ou et de bandes de ripisylve suffisamment larges bordant les cours d'eau tient une place de choix. Comme évoqué au chapitre II pour expliquer les concentrations excessives d'azote et de carbone observées dès les sources de la Drésine et du Lhaut, les prairies sont exploitées jusqu'à moins d'un mètre des cours d'eau (fig. 33 et annexe 2).

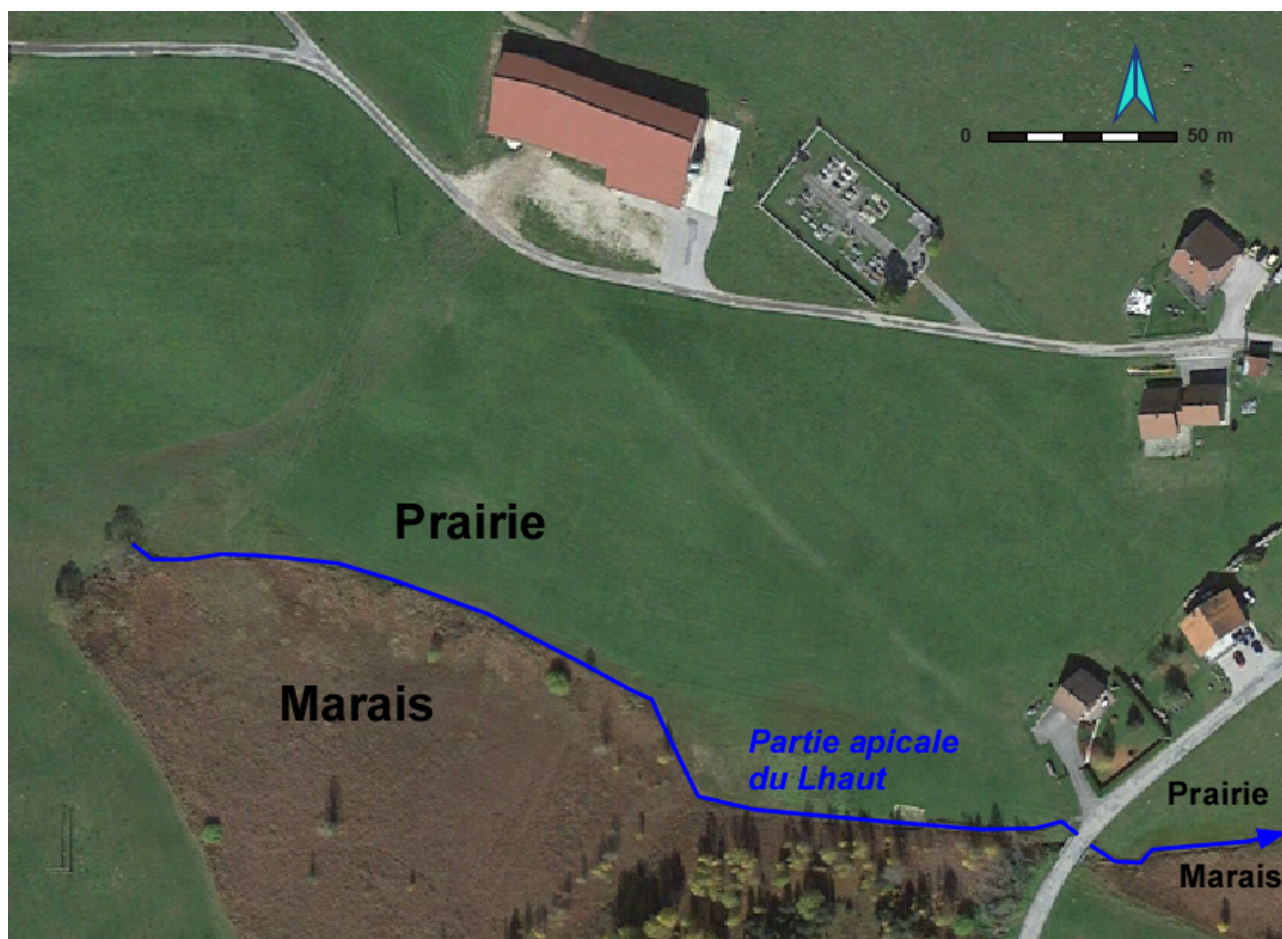


Figure 33. Photo aérienne montrant la partie la plus apicale du Lhaut bordée de marais en rive droite et d'une prairie traitée en rive gauche.

### V-3. Recommandations pour la réduction des flux et l'instauration d'un suivi

#### Investigations complémentaires à entreprendre

La présente étude a permis de dresser le bilan des flux polluants parvenant au lac via ses principales affluences et à déceler les principales causes de contamination. Cependant, de façon à mieux cerner ces sources de pollutions et donc à fonder plus précisément les recommandations, quelques investigations supplémentaires sont nécessaires (tab. 20).

1. Une étude hydrogéologique permettant de mieux connaître les circulations karstiques et en particulier la localisation des pertes grossissant le Lhaut et les Vurpillières serait utile, en particulier pour bien comprendre la raison de l'augmentation des teneurs en nitrates de ces deux cours d'eau depuis 2005.
2. Un inventaire et une expertise précise des rejets domestiques et agricoles collectés par le Ruisseau de Remoray est ainsi nécessaire pour localiser, puis traiter la ou les source des pics de pollutions nutritives et en partie phosphorées.
3. L'amélioration de la connaissance des sources de contamination par les micropolluants serait aussi utile. Elle requerrait une répétition des analyses de MES sur la partie aval des 3 principales afférences. Les recherches devraient être étendues aux herbicides (également dans l'eau) ainsi qu'aux substances utilisées en médecine vétérinaire.
4. Une expertise de la nature, de la fréquence de remplacement de l'utilisation et du recyclage des enrobés utilisés pour construire les tapis routier permettrait de vérifier et de préciser la provenance des contaminations en HAP

Altérations des milieux aquatiques	Etude complémentaire	Gestion	Restauration
Excès de nitrates, de carbone organique et de phosphore	Amélioration des connaissances sur les circulations karstiques. Suivi des concentrations et des flux en C, N et P. Expertise des rejets collectés par le Ru de Remoray. Etude de l'alimentation hivernale du bétail.	Suppression des engrais minéraux. Réduction des épandages. Augmentation des capacités de stockage. Réduction de la période d'épandage.  Proscription du désenrochement, du retournement des prairies, du désherbage chimique...	Instauration de bandes tampon suffisantes de part et d'autres des cours d'eau. Reconstitution des marais entourant les secteurs de sources Renaturation des portions de lit rectifiées.
Contamination en ETM	Compléments d'analyses des MES	Réduction éventuelle des traitements vétérinaires et de la désinsectisation.	Stabilisation du ruisseau de Remoray pour réduire les transferts de MES Reconstitution d'un champs d'épandage des crues de ce ruisseau aménagé pour une phytoremédiation
Contamination en pesticides	Compléments d'analyses des MES Recherche des résidus de médicament vétérinaire, et des herbicides dans l'eau	Amélioration éventuelle de la collecte des eaux usées dans Remoray.	
Contamination en HAP	Compléments d'analyses des MES Expertise de la densité et de la fréquence d'entretien du réseau routier Inventaire des lieux de stockage ou de réutilisation des déchets routiers	Enlèvement des éventuels dépôts de déchet de goudron ou de bitume  Amélioration des capacités de stockages et d'auto épuration des fossés	Confinement ou démantèlement des dépôts et des éventuels chemins construits avec des gravats et déchets d'enrobés routiers

Tableau 20. Vue synoptique des investigations supplémentaires et des actions de gestion ou de restauration propres à réduire ou à supprimer les altérations chimiques affectant la qualité des milieux aquatiques dans le bassin versant du lac de Remoray.

Enfin, l'analyse des pratiques agricoles actuellement menées par les professionnels concernés, confrontées à l'analyse pédologique de la vulnérabilité des sols déjà effectuée permettra de fonder des solutions pour réduire les pressions liées à l'élevage laitier qui affectent le plus directement la qualité des milieux aquatiques. Cette approche pourrait utilement être complétée par la prise en compte de la nourriture hivernale des bovins et équins du bassin versant, ainsi que par son influence sur les rejets en azote et phosphore.

### Propositions d'amélioration de la gestion du bassin versant

En attendant la synthèse de ces analyses agronomiques et pédologique des risques avec le présent diagnostic écologique spatialisé, des recommandations générales peuvent déjà être préconisées pour améliorer la gestion des sols du bassin versant. Plusieurs indices montrent en effet que ce compartiment de l'écosystème est altéré à la fois par l'augmentation de la fréquence et de la quantité des matières azotées épandues ainsi que par leur nature (passage du fumier au lisier).

Ces tendances négatives nécessitent une amélioration profonde des pratiques agricoles. Dans cet esprit, des réflexions doivent être engagées pour atteindre dès que possible les objectifs suivants.

1. Supprimer les engrais minéraux qui augmentent dans les cours d'eau la charge excessive de nutriments immédiatement biodisponibles.
2. Réduire la quantité et la fréquence des épandages organiques qui participent aux tassements des sols (à cause de la répétition des passages des engins) et à leur déstabilisation (par excès d'azote).
3. Revenir au fumier en abandonnant le lisier.
4. Limiter strictement les épandages à la période végétative utile (soit entre le 15 avril et le 15 septembre).
5. Proscription de toute action déstabilisant les sols : désherbage, retournement des prairies...
6. Proscription des désherbages chimiques
7. Le cas échéant, après expertise, amélioration des pratiques vétérinaires : réduction de la fréquence et de l'intensité des traitements des bovins et équins, réduction de la désinsectisation éventuelle du bétail et des locaux ...
8. Le cas échéant, après expertise, récupération et traitement des eaux de lavage et de désinfections du matériel et bâtiments d'élevage.

Parallèlement, après diagnostic, une amélioration de la collecte des rejets agricoles ou et domestiques qui s'écoulent dans le ruisseau de Remoray devra être entreprise. Enfin, une optimisation de la gestion des fossés qui bordent le réseau routier du bassin versant pourra être envisagée pour améliorer leurs capacités de rétention de la pollution grise.

### Propositions de restauration des zones tampons et des capacités d'autoépuration

S'il est indispensable de réduire les sources de contaminations, il sera difficile sinon impossible de les supprimer. Par conséquent, des travaux visant à diminuer la vitesse des transferts et à restaurer la capacité d'autoépuration des milieux récepteur devront aussi être mis en œuvre.

1. Reconstitution de franges tampons (ripisylve ou mégaphorbiaie) d'au moins une dizaine de mètre de part et d'autre de la totalité des linéaires de cours d'eau.
2. Reconstitution de l'intégralité des marais dans les secteurs de sources.
3. Reméandrement et rehaussement des portions rectifiées.
4. Réhabilitation de la morphologie du Ru de Remoray entre l'aval de la décharge et l'entrée de la RNN dans le dessin de reconstituer un champ d'expansion des crues et d'y implanter une zone de phyto remédiation pour réduire les transferts d'ETM et d'HAP.

### Dispositif de suivi recentré

Pour apprécier les effets des actions visant à l'amélioration de la qualité des milieux aquatiques, le dispositif d'étude des contaminations chimiques devra être reconduit au moins une année avant la mise en œuvre des actions restauratoires, de façon à compléter l'état initial en prenant en compte les variations inter-annuelles. Par la suite, il devra être répété deux ou trois ans après la mise en œuvre des actions et travaux restauratoires, idéalement durant deux ou trois années successives.

Dans cette optique, plusieurs types de recentrage des investigations de ce dispositif peuvent être proposés en vue d'améliorer leur rentabilité en termes de rapports cout / qualité et quantité des informations. Leur choix dépendra des objectifs prioritaires qui seront définis pour ce suivi.

#### **1. Si l'objectif prioritaire est de préciser l'évaluation des flux de nutriments et de mieux prendre en compte leur variabilité.**

- Restreindre l'analyse à la partie aval des 3 afférences principales.
- Restreindre le nombre de paramètre au carbone organique total, au phosphore total et à l'azote total.
- Augmenter la fréquence des analyses à une par semaine.
- Augmenter le nombre de suivi de crues à 6 et le nombre de prélèvements par crue à 6.
- Conserver le nombre de prélèvements des MES à 6 pour analyses de C, N, P et micropolluants (ETM, HAP, pesticides étendus).
- Prévoir 6 opérations de maintenance et de dépouillement des sondes de turbidité et de conductivité par an.

#### **2. Si l'objectif est de déterminer la qualité du réseau hydrographique et de la spatialiser**

- Conserver les 8 stations de mesures
- Conserver les 13 paramètres à analyser.
- Réduire la fréquence des analyses à 8 par an en croisant crue et étiage d'une part et saisons d'autres part (protocole de 2004-2005).
- Augmenter le nombre de suivi de crues à 6 avec 6 prélèvements par crue sur chacune des trois stations aval.
- Conserver le nombre de prélèvements des MES à 6 pour analyses de C, N, P et micropolluants (ETM, HAP, pesticides étendus).
- Prévoir 6 opérations de maintenance et de dépouillement des sondes de turbidité et de conductivité par an.

### **3. Si l'objectif est de concilier les deux objectifs précédents**

- Conserver les 8 stations de mesures
- Restreindre le nombre de paramètres au carbone organique total, à la DBO5, au phosphore total, aux orthophosphates, aux 4 formes de l'azote.
- Conserver la maille de prélèvements actuels (18 par ans).
- Augmenter le nombre de suivi de crues à 6 avec 6 prélèvement par crue sur chacune des trois stations aval.
- Conserver le nombre de prélèvements des MES à 6 pour analyses de C, N, P et micropolluants (ETM, HAP, pesticides étendus).
- Prévoir 6 opérations de maintenance et de dépouillement des sondes de turbidité et de conductivité par an.

### **V-4. Conclusion et perspectives**

La présente étude a consisté à prélever et à analyser l'eau et les matières en suspension des tributaires du lac de Remoray et de leurs principaux affluents, tout en approchant l'hydrologie. Ces investigations ont permis d'apprécier l'état de contamination chimique de ce réseau hydrographique puis d'évaluer les flux de matières organiques et nutritives, qui sont transférés au plan d'eau.

Elles ont montré que les cours d'eau analysés sont affectés par une contamination organique et azotée modérée mais continue et généralisée. Les concentrations en phosphore observées sont généralement faibles, mais des teneurs plus soutenues en ce nutriment sont mesurées lors des crues, en particulier dans le Ruisseau de Remoray, et d'avantage sous forme particulaire.

Parallèlement, une contamination modérée des matières en suspension en pesticides dont l'utilisation est interdite sur le marché depuis plusieurs décennies confirme l'hypothèse d'une déstabilisation récente des sols, par excès d'amendement azotés. Les matières en suspensions et les sédiments analysés sont aussi fortement contaminés par des HAP, sans doute en provenance d'anciens enrobés routiers, et par quelques éléments métalliques qui témoignent certainement de l'influence pernicieuses des décharges.

Au bilan, les flux de matières organiques et nutritives exportés vers le lac témoignent de pressions anthropiques excessives. Ils atteignent des valeurs susceptibles de provoquer un déséquilibre métabolique dans le plan d'eau. Ces tendances sont amplifiées par la rapidité des transferts liée à la pente, à l'altitude et à la nature karstique du bassin versant, mais aussi à la simplification physique de la partie amont des cours d'eau ainsi qu'à la réduction des zones tampons qui les bordent.

Sur la base de ce diagnostic, plusieurs propositions ont pu être formulées pour réduire non seulement les pressions anthropiques, mais aussi leurs impacts sur les milieux aquatiques. Si elles sont mises en œuvre, leurs effets sur la qualité du lac devraient être rapides et spectaculaires. Un suivi des contaminations chimiques du réseau hydrographique pourra alors permettre de vérifier l'efficacité de ces mesures pour les valider et les valoriser ou pour les améliorer et les compléter.

## Bibliographie

- Bako J. W. R., Smart M., 1986. Sediment-related mechanisms of growth limitation in submersed macrophytes. *J. Ecol.*, 67(5): 1328-1340.
- Barko, J. W., Gunnison D., Carpenter S. R., 1991. Sediment interactions with submersed macrophyte growth and community dynamics. *Aquat. Bot.*, 41: 41-65.
- Bash J, Berman C, Bolton S., 2001. Effects of turbidity and suspended solids on salmonids. Washington State Transportation Center (TRAC) Report No. WA-RD 526.1, November 2001, Olympia, WA, 92 pp
- Berg L., Northcote T. G., 1985. Changes in Territorial, Gill-flaring, and Feeding Behavior in Juvenile Coho Salmon (*Oncorhynchus kisutch*) following Short-term Pulses of Suspended Sediment. *Journal canadien des sciences halieutiques et aquatiques*, 42(8): 1410-1417.
- Bowden R. J., 1977. Guidelines for the pollutional classification of Great Lakes harbor sediment. Chicago, USEPA Great Lakes National Program Office.
- Camargo J. A., Alonso, A., 2006. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: a global assessment. *Environment International*, 32, 831-849.
- Camargo, J.A., Alonso, A., Salamanca, A., 2005. Nitrate toxicity to aquatic animals: a review with new data for freshwater invertebrates. *Chemosphere* 58, 1255–1267.
- Carignan R, Kalff, J., 1980. Phosphorus sources for aquatic weeds: water or sediment? *Science*, 207: 987-989.
- Chambers P. A., Mcgoldrick D.J., Brua R. B., Vis C., Culp J. M., Benoy G. A., 2012. Development of environmental thresholds for nitrogen and phosphorus in streams. *J. Environ. Qual.*, 41(1): 7-20.
- Crommentuijn T., Sijm D. De Bruijn J., Van Den Hoop M., Van Leeuwen, K., Van De Plassche, E., 2000. Maximum permissible and negligible concentrations for metals and metalloids in the Netherlands, taking into account background concentrations *J. Environ. Manag.*, 60(2):121-143.
- Crommentuijn T., Sijm D. De Bruijn J., Van Den Hoop M., Van Leeuwen, K., Van De Plassche, E., 2000. Maximum permissible and negligible concentrations for some organic substances and pesticides, *J. Environ. Manag.*, 58, 297–312.
- Cronan C.S., Aiken G.R., 1985. Chemistry and transport of soluble humic substances in forested watersheds of the Adirondack Park, New York, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49, 1697-1705.
- Dignac M-F., Kögel-Knabner, Michel K., Matzner E., Knicker H., 2002. Chemistry of soil organic matter as related to C:N in Norway spruce forest (*Picea abies* (L.) Karst.) floors and mineral soils, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 165, 281-289.
- Dodds W. K., Jones J. R, Welch E. B., 1998. Suggested classification of stream trophic state: distributions of temperate stream types by chlorophyll, total nitrogen, and phosphorus. *Water Res.* 32: 1455-1462.
- Dodds W. K., Oakes R. M., 2004. A technique for establishing reference nutrient concentrations across watersheds impacted by humans. *Limnol. Oceanogr. Methods* 2: 333-341.
- Dodds W. K., Smith V. H., Lohman K., 2002. Nitrogen and phosphorus relationships to benthic algal biomass in temperate streams. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 59: 865-874.
- Dunnivant F.M., Jardine P.M., Taylor D.L., McCarthy J.F., 1992. Transport of naturally occurring dissolved organic carbon in laboratory columns containing aquifer material, *Soil Science Society of America Journal*, 56, 437-444.
- Ertel J.R., Hedges J.I., 1984. The lignin component of humic substances: Distribution among soil and sedimentary humic, fulvic and base insoluble fractions, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, 2065-2074.
- Ertel J.R., Hedges J.I., 1985. Sources of sedimentary humic substances: Vascular plant debris, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49, 2097-2107.
- Evans-White M. A., Haggard B. E., Sott J. T. 2013. A Review of Stream Nutrient Criteria Development in the United States. *J. Environ. Qual.*, 42: 1002-1014.
- Gofii M. A., Teixeira M. J., Perkey D. W., 2003. Sources and distribution of organic matter in a river-dominated estuary (Winyah Bay, SC, USA), *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57, 1023-1048.
- Guggenberger G., Zech W., Schulten H.-R., 2007. Formation and mobilization pathways of dissolved organic matter: evidence from chemical structural studies of organic matter fractions in acid forest floor solutions, *Organic Geochemistry*, 21, 51-66.

- Hernes P.J., Robinson A.C., 2007. Aufdenkampe A.K., Fractionation of lignin during leaching and sorption and implications for organic matter "freshness", *Geophysical Research Letters*, 34, doi:10.1029/2007GL031017.
- Holtan, H., Kamp-Nielsen L., Stuanes A. O., 1988. Phosphorus in soil, water and sediment: an overview. *Hydrobiologia* 170: 19-34.
- Homer R. R., Welch E. B., Seeley M. R., Jacoby J. M., 1990. Responses Of Periphyton To Changes In current velocity, suspended sediment and phosphorus concentration, *Freshwater Biology*, 24, 215-232.
- Homer R. R., Welch, E. B. 1981. Stream periphyton development in relation to current velocity and nutrients, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 38, 449-457.
- Houel S., 2003. Dynamique de la matière organique terrigène dans les réservoirs boréaux, Ph.D., Thèse de l'Université du Québec à Montréal,-.
- Houel S., Louchouart P., Lucotte M., Canuel R. et Ghaleb B., Translocation of soil organic matter following reservoir impoundment in boreal systems: Implications for in situ productivity, *Limnology and Oceanography*, 51, 1497-1513, 2006.
- J.W. Reijs, W.H. Meijer, E.J. Bakker, E.A. Lantinga, 2003. Explorative research into quality of slurry manure from dairy farms with different feeding strategies, *NJAS*, 51 (1-2) : 67-89.
- Lamb A.L., Wilson G.P., Leng M.J., 2006. A review of coastal palaeoclimate and relative sea-level reconstructions using  $\delta^{13}\text{C}$  and C/N ratios in organic material, *Earth Sc. Reviews*, 75, 29-57.
- Lobbes J.M., Fitznar H.P., Kattner G., 2000. Biogeochemical characteristics of dissolved and particulate organic matter in Russian rivers entering the Arctic Ocean, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64, 2973-2983.
- Long, E.R., and L.G. Morgan, 1990. The Potential for Biological Effects of Sediment-Sorbed Contaminants Tested in the National States and Trends Program. National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA) Technical Memorandum No. 5, OMA52, NOAA National Ocean Service, Seattle, Washington.
- Madej MA, Wilzbach M, Cummins K, Ellis C, Hadden S., 2007. The significance of suspended organic sediments to turbidity, sediment flux, and fish-feeding behavior. USDA Forest Service General Technical Report PSW-GTR-194, Albany, California, pp 383-385.
- McDonald D.D., Dipinto L.M., Field J., Ingersoll C.G., Long E.R., Swartz R.C., 2000a. Development and evaluation of consensus-based sediment effect concentrations for polychlorinated biphenyls. *Environ. Toxicol. Chemistry* 19(5):1403-1413.
- McDonald D.D., Ingersoll C.G., Berger A. 2000b. Development and Evaluation of Consensus-Based Sediment Quality Guidelines for Freshwater Ecosystems. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 39, 20-31.
- McDowell W.H., Likens G.E., 1988. Origin, composition, and flux of dissolved organic carbon in the Hubbard Brook Valley, *Ecol. Monogr.*, 58, 177-195.
- Meyers P.A., 1994. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter, *Chem. Geol.*, 114, 289-302.
- MOE (Ministry of the Environment, Ontario), 1993. Guidelines for the protection and management of aquatic sediments in Ontario. Ministry of the Environment, Toronto, Ontario, 89 p.
- MOE (Ministry of the Environment, Ontario), 2008. Guidelines for identifying, assessing and managing contaminated sediment in Ontario: an integrated approach, PIBS 6568<sup>e</sup> Queen's Printer for Ontario, 112 p.
- Nisbet M., Verneaux J., 1970. Composantes chimiques des eaux courantes. Discussion et proposition de classes en tant que base d'interprétation des analyses chimiques. *Annls. Limnol.*, 6(2) : 161-190.
- NRC (National Research Council), 1978. *Nitrates: An Environmental Assessment*. Scientific and Technical Assessments of Environmental Pollutants. National Academy of Sciences. Washington D.C. 723 p.
- Opsahl S. et Benner R., 1995. Early diagenesis of vascular plant tissues: Lignin and cutin decomposition and biogeochemical implications, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59, 4889-4905.
- Palmer S. M., 2001. Sources of organic and inorganic carbon in a headwater stream: evidence from carbon isotope studies, *Biogeochemistry*, 52, 321-338.
- Pavlovsky R. T., Derek J. M., 2010. *River Sediment Quality of the Upper White River Basin*. Missouri State University, OEWRI EDR-10-001, 30 p.
- Persaud, D., Jaagumagi, R., and A. Hayton, 1992. Guidelines for the Protection and Management of Aquatic Sediment Quality in Ontario. Ontario Ministry of the Environment, Queen's Printer for Ontario.
- Rankinen K., Keinänen H., Cano Bernal J.E., 2016. Influence of climate and land use changes on nutrient fluxes from Finnish rivers to the Baltic Sea. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 216 : 100-15.

- Repeta D.J., Quan T.M., Aluhiware L.I., 2002. Chemical characterization of high molecular weight dissolved organic matter in fresh and marine waters, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66, 6, 955-962.
- Reynoldson T.B., Day K.E., 1998. *Biological guidelines for the assessment of sediment quality in the Laurentian Great Lakes*. NWRI Report No. 98-232. 119 pp.
- Schiff S.L., Aravena R., Trumbore S.E., Dillon P.J., 1990. Dissolved organic carbon cycling in forested watersheds: A carbon isotope approach, *Water Resources Research*, 12, 2949-2957.
- SEQ-EAU, 2003. Système d'évaluation de la qualité des cours d'eau. Grille d'évaluation SEQ-EAU (version 2). <http://sierm.eaurmc.fr/eaux-superficielles/fichiers-telechargeables/grilles-seq-eau-v2.pdf>
- Sheeder, S. A., Evans B. M., 2004. Estimating nutrient and sediment threshold criteria for biological impairment in Pennsylvania watersheds., *JAWA*, 40 (4) : 881-888.
- Sosiak A., 2002. Long-term response of periphyton and macrophytes to reduced municipal nutrient loading to the Bow River (Alberta, Canada). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 59: 987-1001
- Sprague, J.B. 1971. Measurement of pollutant toxicity to fish-III : sub-lethal effects and "safe" concentrations. *Water Research*, 5(6): 245-266.
- UNESCO, WHO & ENED 1996, *Water quality assessment: a guide to the use of biota, sediments, and water in environmental monitoring*, 2nd edn, ed. DV Chapman, Spon Press, United States.
- USEPA 1979. Impacts of sediment and nutrients on biota in surface waters of United States. EPA 600-3 79 105, 397 p.
- USEPA, 2000. Nutrient criteria technical guidance manual: Rivers and streams. USEPA-822-B-00-002. USEPA, Washington, DC.
- USEPA, 2002. A guidance manual to support the assessment of contaminated sediments in freshwater ecosystems: Volume III - Interpretation of the results of sediment quality investigations. EPA-905-B02-001-C. Great Lakes National Program Office, Chicago, IL.
- USGS (U.S. Geological Survey), 1999. *The quality of our nation's waters: Nutrients and pesticides*. Rapport n° 1225. U.S. Geological Survey. Reston (Virginie). 82 p.
- Volk C.R., Volk C.B., Kaplan L.A., 1997. Chemical composition of biodegradable dissolved organic matter in streamwater, *Limnology and Oceanography*, 42, 39-44.
- Wilson J.O., Valiela I., Swain T., 1985. Sources and concentrations of vascular plant material in sediments of Buzzards Bay, Massachusetts, USA, *Marine Biology*, 90, 129-13.
- Ziegler F., Kögel I., Zech W., 1986. Alteration of gymnosperm and angiosperm lignin during decomposition in forest humus layers, *Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung und Bodenkunde*, 149, 323-331.

## **Annexes**

**Annexe 1. Résultats bruts des analyses réalisées par Carso (sous forme numérique)**

**Annexe 2. Photos aériennes des zones de sources**

**Annexe 3. Résultats des analyses chimiques 2004-2005(sous forme numérique)**

**Annexe 4. Débits mesurés par la Dreal en 1993-1994 (sous forme numérique)**

## Annexe 2. Photos aériennes issues de Google Earth des parties apicales du chevelu hydrographique alimentant le lac de Remoray



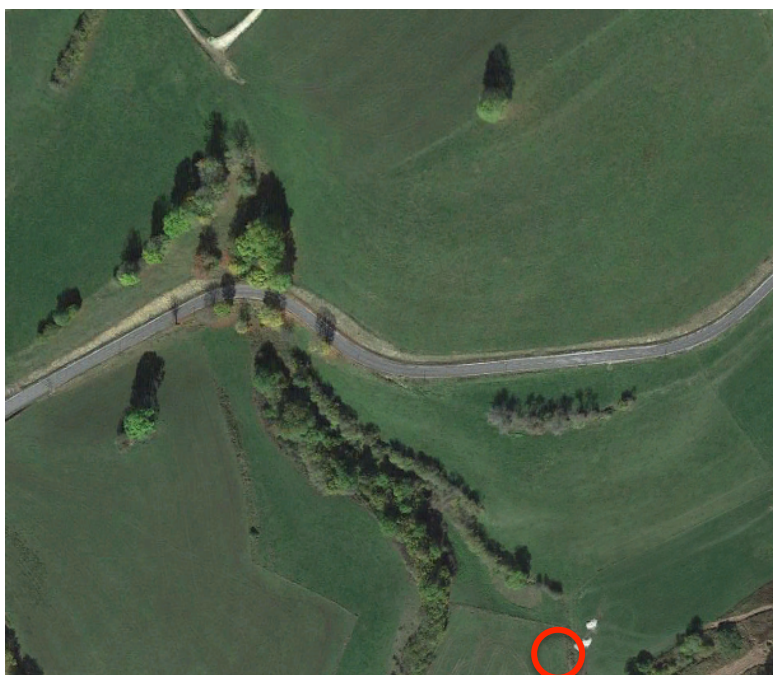
**Annexe 2a. Source du Lhaut à Brey : prairie intensive en rive droite (cercle rouge = prélèvements)**



**Annexe 2a. Source de la Drésine en amont due Boujon, au milieu de prairies intensives ; le point de prélèvement (lui aussi en secteur prairial) a été placé à 1,2 km à l'aval car le linéaire intermédiaire n'est pas pérenne**



**Annexe 2c. Source du Ru Remoray, au milieu du village et entourée de prairies (cercle rouge = prélèvements)**



**Annexe 2d. Source de la Bonne Fontaine, entourée de prairies (cercle rouge = prélèvements)**