



**HAL**  
open science

## Caractérisation des réseaux trophiques en cours d'eau, problématiques, bilan des activités de recherche 2013 et 2014 et projet pour l'année 2015

Nicolas Hette-Tronquart, Jérôme Belliard

### ► To cite this version:

Nicolas Hette-Tronquart, Jérôme Belliard. Caractérisation des réseaux trophiques en cours d'eau, problématiques, bilan des activités de recherche 2013 et 2014 et projet pour l'année 2015. [Rapport de recherche] irstea. 2015, pp.39. hal-02601724

**HAL Id: hal-02601724**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02601724>**

Submitted on 16 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



2014 – Thème 5 - Action 33

# Caractérisation des réseaux trophiques en cours d'eau

Problématiques, bilan des activités de recherche 2013 et 2014 et projet pour l'année 2015

Rapport intermédiaire

Nicolas HETTE-TRONQUART (Irstea),  
Jérôme BELLIARD (Irstea)

]

Février 2015

Document élaboré dans le cadre du : développement d'indicateurs fonctionnels



- **AUTEURS**

**Nicolas HETTE-TRONQUART**, ingénieur de recherche contractuel (Irstea), [nicolas.hette@irstea.fr](mailto:nicolas.hette@irstea.fr)

**Jérôme BELLIARD**, ingénieur de recherche (Irstea), [jerome.belliard@irstea.fr](mailto:jerome.belliard@irstea.fr)

- **CORRESPONDANTS**

**Onema : Yorick REYJOL**, Coordinateur de la mission « Bioindication et fonctionnement des écosystèmes aquatiques » (Onema), [yorick.reyjol@onema.fr](mailto:yorick.reyjol@onema.fr)

- **AUTRES CONTRIBUTEURS**

**Kévin PIORKOWSKI, Estelle Dallaserra**, stagiaires (Irstea)

**Mathieu GIRONDIN**, assistant ingénieur (Irstea), [mathieu.girondin@irstea.fr](mailto:mathieu.girondin@irstea.fr)

**Délégations interrégionales (1,2,3,4,5,6,7,8,9) et services départementaux** associés de l'Onema.

**Droits d'usage** : accès libre

**Niveau géographique** : mondial

**Couverture géographique** : France

**Niveau de lecture** : professionnels, experts

[Les rubriques propres au partenaire (visa par ex.) peuvent être insérer dans cette page ou ajouter sur une page supplémentaire]



- **RESUME**

Après un bref rappel des enjeux, le rapport détaille l'objectif et les problématiques abordés par le projet (effet des facteurs environnementaux, influence des pressions anthropiques et développement de métriques isotopiques). Il propose également le bilan des activités menées en 2013 et 2014, en mettant l'accent sur le plan d'expériences obtenu après les campagnes d'échantillonnage, et sur l'état d'avancement du projet. Enfin il expose les activités prévues pour l'année 2015 qui seront essentiellement dédiées aux analyses isotopiques et à l'exploitation/valorisation des résultats.

- **ISOTOPES STABLES, RESEAUX TROPHIQUES, COURS D'EAU, INDICATEUR FONCTIONNEL, FRANCE CONTINENTALE**



- **STUDY OF STREAM FOOD WEBS – ISSUES, RESEARCH ACTIVITY IN 2013 AND 2014, AND PERSPECTIVES FOR 2015**

- **ABSTRACT**

We briefly remind the issues and give more details on the aim and problematics of the project (effect of environmental factors, influence of anthropogenic pressures and development of isotopic metrics). We present the research activities conducted in 2013 and 2014, focusing on the design of experiments (state after the sampling), and on the progress of the project. Last, we discuss the activities planned for 2015 (mainly stable isotope analyses and results analysis).

- **STABLE ISOTOPES, FOOD WEBS, STREAMS, FUNCTIONAL INDICATOR, CONTINENTAL FRANCE**

## SOMMAIRE

<b>1. Introduction .....</b>	<b>6</b>
<b>2. Objectif et problématiques .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1. Problématique 1 : étude des facteurs environnementaux .....</b>	<b>7</b>
2.1.1. <i>Étude de l'effet du gradient amont - aval : .....</i>	8
2.1.2. <i>Étude de l'influence de la géologie : .....</i>	8
2.1.3. <i>Étude de l'impact du climat : .....</i>	9
<b>2.2. Problématique 2 : étude préliminaire de 2 pressions anthropiques.....</b>	<b>9</b>
2.2.1. <i>Perturbations d'ordre chimique : pollution organique.....</i>	9
2.2.2. <i>Perturbations d'ordre morphologique : diversité des habitats .....</i>	10
<b>2.3. Problématique 3 : développement de métriques du réseau trophique .....</b>	<b>10</b>
<b>3. Bilan des activités en 2013 et 2014.....</b>	<b>12</b>
<b>3.1. Plan d'expériences – choix des sites .....</b>	<b>12</b>
3.1.1. <i>Répartition géographique des sites étudiés.....</i>	12
3.1.2. <i>Étude de l'effet du gradient amont – aval.....</i>	14
3.1.3. <i>Étude de l'effet de la géologie.....</i>	15
3.1.4. <i>Étude de l'effet du climat.....</i>	16
3.1.5. <i>Étude des pressions anthropiques.....</i>	18
<b>3.2. Échantillonnage et préparation des échantillons .....</b>	<b>21</b>
3.2.1. <i>Sources de matière organique et macro-invertébrés.....</i>	21
3.2.2. <i>Poissons .....</i>	21
<b>3.3. Valorisation de résultats antérieurs .....</b>	<b>22</b>
<b>4. Projet pour 2015 .....</b>	<b>23</b>
<b>4.1. Étude de l'interaction entre valeur moyenne et variabilité de la température de l'eau sur le fonctionnement trophique des cours d'eau tempérés (France) et tropicaux (Bolivie) .....</b>	<b>23</b>
<b>4.2. Préparation et analyse des échantillons 2013 et 2014 .....</b>	<b>23</b>
<b>4.3. Valorisation des résultats.....</b>	<b>23</b>
<b>5. Conclusion.....</b>	<b>25</b>
<b>6. Glossaire.....</b>	<b>26</b>
<b>7. Sigles &amp; Abréviations .....</b>	<b>27</b>
<b>8. Bibliographie .....</b>	<b>28</b>
<b>9. Table des illustrations .....</b>	<b>30</b>
<b>10. Annexes .....</b>	<b>31</b>
<b>10.1. Annexe 1 : Listes des sites échantillonnés pour les sources de matière organique et les macro-invertébrés et pour les poissons selon l'année de prélèvement. ....</b>	<b>31</b>
<b>10.2. Annexe 2 : Protocole d'échantillonnage du compartiment piscicole.....</b>	<b>33</b>
<b>10.3. Annexe 3 : Échantillonnage des sources de matière organique et des macro-invertébrés pour 2013 .....</b>	<b>34</b>
<b>10.4. Annexe 4 : Échantillonnage des sources de matière organique et des macro-invertébrés pour 2014 .....</b>	<b>36</b>

- **CARACTERISATION DES RESEAUX TROPHIQUES DES COURS D'EAU – PROBLEMATIQUES, BILAN DES ACTIVITES DE RECHERCHES 2013 ET 2014 ET PROJET POUR L'ANNEE 2015**

## 1. Introduction

Les aspects fonctionnels constituent une dimension essentielle pour apprécier l'état écologique des systèmes aquatiques. Dans la définition de « l'état écologique » donné par la Directive Cadre sur l'Eau (DCE), il est ainsi précisé que l'état écologique est « l'expression de la qualité de la structure et du **fonctionnement** des écosystèmes aquatiques ». Cette dimension fonctionnelle de l'état écologique reste pour l'instant assez délicate à évaluer, car les bio-indicateurs développés et utilisés dans le cadre de la DCE reposent essentiellement sur une description de la structure des communautés et abordent de manière très indirecte les aspects fonctionnels (en particulier via l'utilisation des traits biologiques et écologiques des taxons mais qui restent déterminés d'une manière très globale et grossière). Il y a donc un véritable besoin en termes d'indicateurs capables de mesurer directement le fonctionnement des écosystèmes.

Du point de vue biologique, le fonctionnement d'un écosystème correspond aux interactions entre ses êtres vivants (la structure de l'écosystème se limite à sa composition floristique et faunistique). Pour évaluer le fonctionnement biologique d'un écosystème, il s'agira donc de caractériser les interactions entre les êtres vivants. Par définition, l'étude des réseaux trophiques s'intéresse aux interactions d'ordre alimentaire. Or, la plupart des interactions entre êtres vivants sont de nature trophique (Elton, 1927). Il en résulte que le fonctionnement trophique représente une dimension prépondérante du fonctionnement d'un écosystème et que la caractérisation des réseaux trophiques permet potentiellement de mesurer directement une part importante du fonctionnement biologique.

Selon les principes de la bio-indication, le développement d'indicateurs fonctionnels basés sur le réseau trophique nécessite d'abord de comprendre le fonctionnement trophique dans des conditions non perturbées, dites de référence. Cette compréhension fondamentale du réseau trophique en fonction des grands facteurs environnementaux permet ensuite de caractériser les modifications du fonctionnement suite à des altérations des conditions de référence. Les indicateurs sont ainsi censés intégrer l'influence des facteurs environnementaux sur le fonctionnement trophique pour ne rendre compte que des modifications de ce fonctionnement suite à des perturbations.

Appliqué au cas particulier des écosystèmes lotiques européens pour lesquels le fonctionnement trophique reste mal connu (Arim et al., 2007 ; Vander Zanden & Fetzer, 2007), ce raisonnement justifie l'intérêt d'étudier les réseaux trophiques des cours d'eau : cela peut permettre de fournir à terme des indicateurs fonctionnels de l'état écologique des cours d'eau. Ce rapport est le deuxième rapport intermédiaire du projet. À ce titre, il ne reprend pas les éléments de contexte déjà évoqués dans le premier rapport d'étape du projet (rédigé au début de l'année 2014). Il rappelle l'objectif et les problématiques du projet et dresse le bilan des activités menées en 2013 et 2014. Il propose une version actualisée des activités à poursuivre en 2015.

## 2. Objectif et problématiques

Le projet de l'action 33 menée au sein de l'équipe HÉF de l'unité de recherche Hydrosystèmes et Bioprocédés (UR HBAN) tente de caractériser les réseaux trophiques des cours d'eau à l'échelle de la France continentale. Une seule approche est employée : l'analyse des isotopes stables. Elle a été préférée à d'autres approches (par exemple l'étude des contenus stomacaux) pour sa simplicité méthodologique, et parce que les isotopes stables donnent une image intégrée des aliments assimilés (Fink et al., 2012). Le premier rapport d'étape donne de plus amples détails sur les raisons de ce choix.

L'intérêt d'étudier les réseaux trophiques est multiple. D'un point de vue fondamental, cela permet d'améliorer la compréhension du fonctionnement trophique des cours d'eau qui reste encore assez limitée. Par exemple, on peut imaginer préciser les influences respectives des trois principales causes ultimes affectant le réseau trophique (énergie disponible, stabilité dynamique et taille de l'écosystème (Sabo et al., 2009)), ou encore déterminer les parts relatives de la matière organique autochtone et allochtone exploitée par le réseau trophique. Par ailleurs le concept de réseau trophique combine les approches d'écologie des communautés (richesse spécifique, composition taxonomique) et d'écologie des écosystèmes (flux d'énergie et de matières, interactions entre les membres du réseau). Il est donc particulièrement pertinent pour étudier le lien entre biodiversité et fonctionnement des écosystèmes (Thompson et al., 2012). Enfin, dans le contexte de développement d'indicateurs fonctionnels, l'étude des réseaux trophiques est susceptible de fournir des outils pratiques, en proposant des métriques pour caractériser le fonctionnement trophique des cours d'eau.

Le projet de l'action 33 aborde plusieurs problématiques liées à ces différentes perspectives de recherche. Dans un premier temps il cherche à établir des liens entre le fonctionnement trophique des cours d'eau et les grands facteurs environnementaux auxquels ils sont soumis. Dans un second temps il examine de façon préliminaire l'effet de pressions anthropiques sur le fonctionnement trophique. Dans les deux cas, la caractérisation du fonctionnement trophique s'effectue par des métriques du réseau trophique qui sont développées dans le cadre du projet. Cette approche a pour but de cibler les métriques qui pourraient servir de base à l'élaboration d'un indicateur trophique, en choisissant celles qui répondent le plus aux perturbations, et qui ont le meilleur potentiel de bio-indication.

Enfin, la dualité des réseaux trophiques combine des dimensions structurelle (facteurs ayant trait aux membres du réseau) et fonctionnelle (facteurs liés aux interactions entre les membres du réseau). Le fonctionnement trophique des cours d'eau peut donc être influencé de deux manières : directement, en modifiant les interactions entre les mêmes membres d'un réseau, et indirectement, en modifiant les membres du réseau (ce qui peut à son tour entraîner une modification des interactions). Ces deux aspects seront abordés au sein des trois problématiques.

### 2.1. Problématique 1 : étude des facteurs environnementaux

L'étude du rôle des facteurs environnementaux constitue le cœur du projet de l'action 33. Avant de pouvoir examiner les réponses de métriques du réseau trophique aux pressions anthropiques, il faut d'abord connaître leurs comportements vis-à-vis des facteurs environnementaux. Or cette connaissance reste jusqu'à présent imparfaite (cf. Arim et al. 2007) : il est par exemple impossible de prévoir quel devrait être le réseau trophique d'une rivière à partir des facteurs environnementaux auxquels elle est soumise. Le traitement de la problématique 1 constitue donc un travail préliminaire indispensable sur lequel s'appuieront les étapes suivantes du développement d'un indicateur trophique.

Pour répondre à la problématique 1, le projet a ciblé les facteurs environnementaux suivants : le gradient amont – aval, la géologie, le climat (température, pluviométrie, altitude). Notre choix s'est porté sur ces trois facteurs car ils constituent trois éléments déterminants dans le fonctionnement des cours d'eau (Petts & Calow, 1996). Hette-Tronquart et al. (2015) ont par exemple montré que le gradient amont – aval influence le réseau trophique constitué par le compartiment piscicole. Thompson & Townsend (2005) de leur côté, ont montré que la diversité des habitats peut modifier le fonctionnement trophique des cours d'eau. Or, la géologie constitue l'un des déterminants de la forme et de la dynamique des rivières qui sont fondamentales pour la diversité des habitats présents dans le cours d'eau. Enfin Woodward et al. (2010) et Hette-Tronquart et al. (2013) ont



montré que la température de l'eau modifie la longueur de chaîne trophique, et il y a donc de fortes présomptions qui portent à croire que, plus globalement, le climat influence le fonctionnement trophique des cours d'eau.

Afin de clarifier le rôle des facteurs environnementaux sélectionnés, nous cherchons dans la mesure du possible, à découpler leurs effets de ceux des pressions anthropiques. Pour cela, nous avons choisi des sites d'études faisant partie du réseau national de référence DCE. Cela garantit que les sites choisis ne soient pas fortement affectés par des pressions anthropiques et permet de tester « uniquement » l'effet des facteurs environnementaux du gradient amont – aval, de la géologie et du climat. Le choix de ces sites s'est appuyé sur la description des facteurs environnementaux et sur les relevés faunistiques disponibles dans la base IPR+ (nouvel indice poisson rivière développé par l'Onema et Irstea). Compte tenu de la diversité des cours d'eau de la métropole française mais aussi des contraintes techniques liées à l'échantillonnage et aux analyses isotopiques, nous avons décidé d'étudier 41 sites répartis sur toute la France. Nous avons ainsi répartis les 41 sites (Annexe 1) suivant la surface du bassin versant, leur distribution géographique, l'altitude, la géologie, le régime pluvial, et la température, afin de couvrir des gradients de la façon la plus homogène et large possible.

### 2.1.1. Étude de l'effet du gradient amont - aval :

Le gradient amont – aval, encore appelé gradient longitudinal ou gradient fluvial (Chang et al. 2012, ou Winemiller et al. 2011) représente le changement progressif des caractéristiques physiques des cours d'eau de leur source à leur exutoire, qui est dû à l'écoulement de l'eau par gravité (Petts & Calow, 1996). Ces modifications entraînent une évolution des contraintes physiques s'appliquant aux organismes de l'amont à l'aval. En réponse à ces contraintes les communautés biologiques évoluent le long du gradient (par exemple : Verneaux et al. 2003, Belliard et al. 1997). L'identité des espèces, leur nombre, ainsi que la densité d'individus varient le long du gradient amont – aval. De même les comportements alimentaires des individus évoluent le long du gradient (en raison entre autres de la modification des ressources disponibles (Vannote et al. 1980), mais aussi de la diversité d'habitats (Townsend & Hildrew 1994)). Les dimensions structurelle et fonctionnelle du réseau trophique sont donc susceptibles de se modifier le long du gradient amont – aval. Dans un travail précédent (Hette-Tronquart et al. 2015) nous avons étudié cet effet du gradient à petite échelle spatiale au sein du bassin versant de l'Orge (affluent de la Seine). Disposant de 12 sites, nous avons pu montrer l'influence du gradient sur les deux dimensions structurelle et fonctionnelle du réseau trophique. Dans le cadre du projet de l'action 33, nous examinons comment se transpose cet effet à une échelle beaucoup plus large, considérant une quarantaine de sites couvrant un gradient comprenant deux ordres de grandeur supplémentaires.

La position des sites dans le gradient amont – aval est déterminée à l'aide du premier axe d'une analyse multivariée concernant quatre variables (surface de bassin drainée par le cours d'eau au point d'échantillonnage, largeur moyenne et profondeur moyenne du cours d'eau au point d'échantillonnage, distance à la source). Le premier axe est également utilisé pour tester l'effet du gradient sur les métriques du réseau trophique.

### 2.1.2. Étude de l'influence de la géologie :

Le second facteur environnemental que nous abordons dans le projet de l'action 33 concerne la géologie. La géologie est un des facteurs contrôlant les processus géomorphologiques et opère à large échelle (Allan 2004). Elle influence la largeur et profondeur du chenal et affecte la diversité des habitats offerts par le cours d'eau. Ce faisant elle est supposée influencer le réseau trophique des cours d'eau (cf. par exemple Thompson & Townsend 2005). Elle influence également la chimie de l'eau via la teneur en ions, aspect déterminant de la capacité de production biologique des eaux douces. À l'échelle du territoire de la France continentale, nous avons émis l'hypothèse que la géologie du bassin versant drainé par le cours d'eau au point d'échantillonnage était un facteur déterminant.

Pour tester cette hypothèse, nous avons d'abord repris la distinction grossière entre roches calcaires et siliceuses de la base IPR+. Le cas échéant nous précisons la géologie de nos sites et prendrons en compte une distinction plus précise. Pour le moment nos 41 sites sont répartis de manière homogène entre les deux types de géologie.

Comme pour l'effet du gradient, nous supposons que la géologie peut affecter indirectement

les deux dimensions (structurelle et fonctionnelle) des réseaux trophiques. Par l'intermédiaire de la morphologie et de la diversité des habitats ou de la chimie de l'eau, elle pourrait modifier les communautés biologiques et les ressources disponibles, ainsi que les interactions entre les membres du réseau.

### 2.1.3. Étude de l'impact du climat :

Dans le contexte du changement global, étudier l'impact du climat nous a semblé incontournable. Par climat nous entendons un facteur comprenant l'ensoleillement, la pluviométrie et la température. L'altitude des sites est aussi un paramètre influençant ces trois dimensions du facteur climatique et a également été prise en compte. Jusqu'à présent l'influence du climat sur le réseau trophique à large échelle spatiale n'a, à notre connaissance, pas été étudiée. Pourtant il est fort probable que le climat joue un rôle clef dans le fonctionnement trophique des cours d'eau. Le climat modifie les ressources disponibles pour le réseau trophique (modification de la production primaire aquatique et terrestre), modifie les communautés biologiques présentes dans les cours d'eau, et altèrent les interactions entre organismes.

Nous complétons l'analyse de l'effet du climat par un examen approfondi de l'effet de la température. Récemment, Woodward et al. (2010) ont montré que les valeurs moyennes de la température avaient un effet positif sur la longueur de chaîne trophique. À l'inverse, Hette-Tronquart et al. (2013) a montré que la variabilité de la température diminue la longueur de chaîne trophique. Il reste donc maintenant à étudier l'interaction entre la valeur moyenne de la température et sa variabilité. Pour ce faire nous suivons la température de nos sites à l'aide d'enregistreurs thermiques. Nous menons également une collaboration avec l'IRD (Thierry Oberdorff), l'université Mayor de San Simon (UMSS) à Cochabamba et Irstea (Thibault Datry). Cela a pour but de compléter le jeu de données « tempérées » (obtenues sur les 41 sites sélectionnés) par des cours d'eau tropicaux. Cela permettra d'étendre la gamme des températures moyennes de l'eau observées en milieu tempéré à des températures plus élevées, caractéristiques pour l'instant des milieux tropicaux.

## **2.2. Problématique 2 : étude préliminaire de 2 pressions anthropiques**

Après avoir caractérisé les réseaux trophiques dans des situations où les facteurs environnementaux étaient prédominants, nous avons commencé à les étudier dans des cas de fortes pressions anthropiques. L'objectif est de tester si les réseaux trophiques soumis à de fortes pressions sont différents des réseaux correspondant à des conditions de référence. Pour ce faire, nous avons sélectionné deux types de pressions anthropiques fortement liées avec le fonctionnement trophique des cours d'eau : perturbations d'ordre chimique liées à une pollution organique et perturbations d'ordre morphologique induisant une perte de diversité des habitats.

La principale difficulté a alors été de trouver des sites adéquats, c'est-à-dire qui n'étaient soumis qu'à la seule pression anthropique considérée, car la plupart des sites soumis aux perturbations d'origine humaine sont souvent affectés par de multiples pressions. Nous avons volontairement cherché des sites soumis à de fortes pressions dans le but d'observer des situations contrastées par rapport aux conditions de référence. Le travail reste donc à étendre à des sites soumis à des gradients de perturbations et c'est en ce sens que cette étude est préliminaire. Les contraintes matérielles du projet ont également limité le nombre de sites considérés pour cette étude (16 sites). Pour cette raison, nous collaborons avec l'équipe de Frédéric Santoul de l'université Paul Sabatier de Toulouse avec laquelle nous pourrions partager des données.

Pour le choix des sites, la caractérisation du degré de pressions auxquelles ils sont soumis est basée sur l'expertise réalisée pour la base IPR+. Par la suite une caractérisation plus précise de chaque site sera réalisée. Lors du choix des sites, nous nous sommes par ailleurs efforcés de distribuer nos sites suivant les gradients des trois facteurs environnementaux étudiés par la problématique 1. En complément, nous avons également choisi 4 sites soumis aux deux pressions conjointes pour commencer à étudier leur interaction sur le réseau trophique.

### 2.2.1. Perturbations d'ordre chimique : pollution organique

Concernant les perturbations d'ordre chimique, nous avons légèrement modifié notre

problématique initiale (focalisée sur les nitrates) pour considérer l'ensemble des pollutions organiques / eutrophisation. Ceci est dû à la difficulté de trouver un nombre suffisant de sites uniquement soumis à une forte pollution aux nitrates. Cet élargissement du type de perturbation ne modifie pas en profondeur notre hypothèse de travail, car il s'agit toujours de tester si les apports allochtones dus à la pollution modifient l'utilisation des ressources exploitées par le réseau trophique. En nous limitant aux nitrates, nous attendions essentiellement un effet concernant la production photosynthétique du cours d'eau, car la concentration en nitrates est souvent limitante pour la photosynthèse dans les cours d'eau. Avec une pollution organique, nous supposons aussi que la filière détritique pourra être directement affectée. Au total 8 sites ont été sélectionnés pour étudier cet effet.

### 2.2.2. Perturbations d'ordre morphologique : diversité des habitats

La deuxième perturbation que nous avons choisie est d'ordre morphologique et concerne la diversité des habitats. La raison de ce choix s'explique d'abord par notre volonté de trouver des synergies avec nos collègues toulousains. L'équipe de Frédéric Santoul étudie les effets de la restauration écologique des cours d'eau, en se focalisant pour partie sur la restauration de la diversité des habitats. En choisissant une pression similaire, nous pouvons mener une collaboration avec eux dans le but de mettre en commun les sites que nous étudions dans nos projets respectifs.

Par ailleurs les perturbations d'ordre morphologique constitue l'une des trois grandes familles de perturbations anthropiques avec les perturbations d'ordre hydrologique et chimique (Marzin et al., 2012). Les étudier nous semblait donc incontournable dans la perspective du développement d'un futur indicateur trophique. En nous concentrant sur l'effet de la diversité des habitats nous nous attendons à voir des effets d'ordre structurel et fonctionnel sur le réseau trophique. En effet la diversité d'habitats influence la composition des communautés biologiques et elle offre aussi des zones de refuges pour les proies qui modifient les interactions entre les organismes (Thompson & Townsend, 2005).

Du point de vue pratique nous avons suivi 4 sites et nous devrions pouvoir bénéficier d'une dizaine de sites étudiés par nos collègues toulousains pour examiner l'effet de cette perturbation.

## **2.3. Problématique 3 : développement de métriques du réseau trophique**

L'étude des problématiques 1 et 2 repose sur le développement concomitant de métriques du réseau trophique qui permettent de quantifier les modifications du réseau suite à l'influence de facteurs environnementaux (dans le cas de la problématique 1) ou à l'effet de pressions anthropiques (dans le cas de la problématique 2). Le précédent rapport a présenté l'état de l'art en termes de métriques isotopiques. Depuis, aucune nouvelle métrique n'a vu le jour, même si quelques améliorations ont été proposées (en particulier concernant les modèles de mélanges : Ogle et al., 2014 ; Phillips et al., 2014). Il faut aussi noter l'essor de l'analyse des réseaux en écologie (« ecosystem network analysis », Ulanowicz et al. 2014, or Borrett et al. 2014) qui pourrait également fournir des métriques des réseaux trophiques. Cependant, ce type d'analyse nécessite de disposer de réseaux constitués (c'est-à-dire dont on connaît les membres et les interactions quantifiées), ce que ne permet pas d'obtenir l'analyse des isotopes stables jusqu'à présent.

De notre côté, nous avons proposé une nouvelle approche considérant deux échelles d'organisation (communauté et espèce) basée sur deux métriques isotopiques. Cette double approche permettrait de déterminer la stratégie alimentaire dominante au sein d'une communauté parmi trois comportements contrastés (spécialistes, généralistes de type A ou généralistes de type B, (cf. Bearhop et al. 2004)). Cette approche est en cours de soumission (Hette-Tronquart et al., 2015). Par ailleurs, nous nous sommes rendu compte que les modèles de mélange étaient basés sur des approximations qui passent très souvent inaperçues à leurs utilisateurs en écologie trophique, et qui conduisent dans certains cas à des erreurs. Nous allons donc proposer en 2015 une note à la revue Food Webs pour attirer l'attention de tous sur ce sujet. Malgré cela l'utilisation des modèles de mélange pour développer des métriques reste envisageable, car les informations nécessaires pour lever cette approximation sont souvent disponibles avec les résultats des analyses isotopiques.

L'utilisation des isotopes stables en écologie trophique présente de nombreux avantages (cf. le

précédent rapport), mais nous sommes aussi conscients de leurs limites. Le caractère intégrateur des isotopes est à la fois une force et une faiblesse des métriques isotopiques. C'est une force, car les métriques isotopiques sont susceptibles de donner une image de l'état écologique intégrée dans l'espace et dans le temps. Elles permettent également de combiner des aspects structurels et fonctionnels du réseau trophique. Cependant, ce caractère intégrateur empêche également d'adopter une démarche mécanistique. Il est ainsi impossible de pouvoir reconstituer exactement le régime alimentaire des différents membres d'un réseau trophique avec les isotopes, car les sources potentielles de matière organique qui représentent autant d'inconnues, sont bien plus nombreuses que le nombre d'isotopes que l'on peut analyser. De plus les signaux isotopiques intègrent également des informations qui ne sont pas liées au fonctionnement trophique (par exemple le bruit de fond isotopique) et qui sont autant de sources d'erreur.

Dans ce contexte, l'enjeu de la problématique 3 est de trouver les métriques isotopiques qui répondent le mieux aux pressions anthropiques. Pour cela, nous examinons d'abord le comportement des métriques dans des situations de référence, en essayant d'établir des relations avec les facteurs environnementaux sélectionnés. Ensuite, nous testons si ces relations sont modifiées lorsque les cours d'eau sont soumis à des pressions. Les métriques pour lesquelles les relations avec les facteurs environnementaux sont les plus claires, et pour lesquelles ces relations sont le plus fortement modifiées sous l'effet des pressions anthropiques, seront sélectionnées.

### 3. Bilan des activités en 2013 et 2014

Le projet de l'action 33 a démarré en 2013. Sachant que la constitution du jeu de données isotopiques prendrait un temps conséquent, nous avons placé les phases d'acquisition de données le plus tôt possible dans le déroulement du projet pour garantir le temps nécessaire à leur exploitation. La majeure partie des sites (39) a ainsi été échantillonnée dès 2013, avec un complément (27) en 2014. Cela devait permettre d'obtenir les premiers signaux isotopiques des échantillons à la fin de l'année 2014, mais des pannes et une amélioration de notre outil d'analyse (le spectromètre de masse à ratio isotopique couplé à un analyseur élémentaire) ont retardé l'acquisition des premières données. Actuellement nous prévoyons d'obtenir les premiers résultats dans le courant du mois de février 2015.

Dans cette partie, nous présentons un bilan des principales activités effectuées au cours des deux premières années du projet. Nous distinguons trois types d'activités liées aux différentes phases du projet : plan d'expériences – choix des sites, échantillonnage, valorisation de résultats antérieurs.

#### 3.1. Plan d'expériences – choix des sites

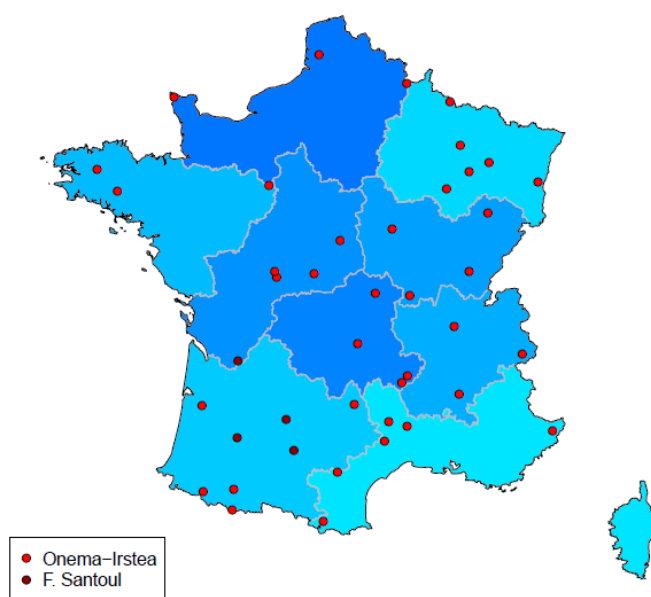
Pour répondre aux trois problématiques auxquelles nous nous intéressons dans ce projet, nous avons accordé une attention particulière à notre plan d'expériences qui s'est traduit par le choix des sites étudiés. La façon dont les sites ont été choisis a rapidement été présentée avec la description des trois problématiques. Nous présentons ici la version du plan d'expériences qui a été actualisée pour tenir compte des ajustements liés aux phases d'échantillonnage. Au total nous avons échantillonné 57 sites différents, dont certains à deux reprises (en 2013 et 2014). Pour 3 sites, l'échantillonnage du compartiment piscicole n'a pas pu être effectué. Il faut aussi noter que ce bilan ne concerne que les sites échantillonnés par l'Onema et l'Irstea. Les caractéristiques des sites échantillonnés par l'équipe de Frédéric Santoul ne nous sont pas encore connues, exceptée leur localisation géographique. A priori il s'agit de 8 sites qui s'ajouteraient aux 54 sites échantillonnés complètement par l'Onema et Irstea.

##### 3.1.1. Répartition géographique des sites étudiés

Comme on peut le constater sur les Figure 1 et 2, nous nous sommes efforcés de couvrir l'ensemble du territoire de la France continentale, aussi bien pour l'étude des facteurs environnementaux que pour l'étude des pressions anthropiques. Quelques zones restent cependant sous – représentées (Ouest de la Bretagne, bassin parisien et quart sud-est) pour l'étude des facteurs environnementaux. Cela pourrait faire l'objet d'un échantillonnage complémentaire, mais il faut aussi noter que ces zones sont plus fortement soumises aux pressions anthropiques et qu'il est très difficile d'y trouver des cours d'eau peu impactés par les activités humaines. Concernant l'étude des pressions anthropiques, la couverture du territoire reste sporadique et correspond au caractère préliminaire de l'étude de la problématique 2. Ce schéma est récurrent sur l'ensemble du plan d'expériences, et de manière générale la variabilité des facteurs environnementaux est mieux appréhendée par les sites de la problématique 1 que par ceux de la problématique 2.

L'objectif de couvrir l'ensemble du territoire français est d'obtenir un aperçu de la variabilité des cours d'eau de France continentale. Cela permet de couvrir une large gamme de la variabilité des facteurs environnementaux étudiés (gradient amont – aval, géologie et climat). 42 sites représentent déjà un effort substantiel en termes d'acquisition de données, mais nous sommes conscients que cela n'est pas suffisant pour caractériser l'entière variabilité des cours d'eau de France continentale.

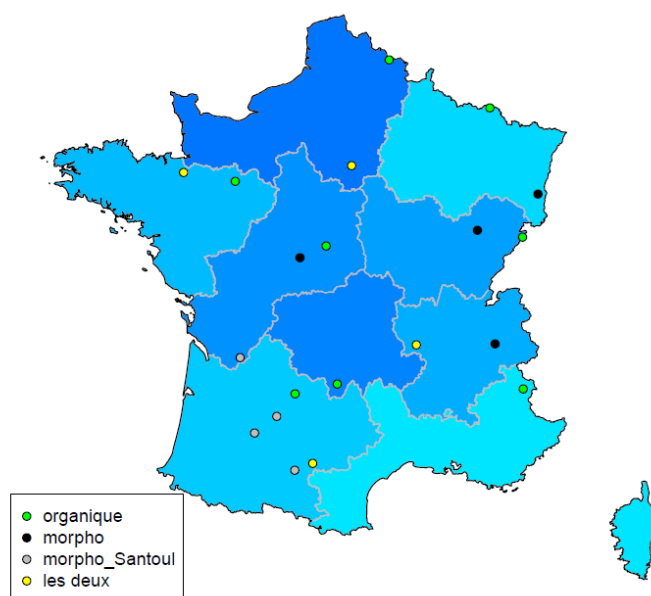
### 42 sites pour étudier l'influence des facteurs environnementaux



© Nicolas Hette-Tronquart

Figure 1 : Répartition géographique des sites concernant l'étude des facteurs environnementaux à l'échelle de la France continentale.

### 20 sites pour tester l'effet des pressions anthropiques



© Nicolas Hette-Tronquart

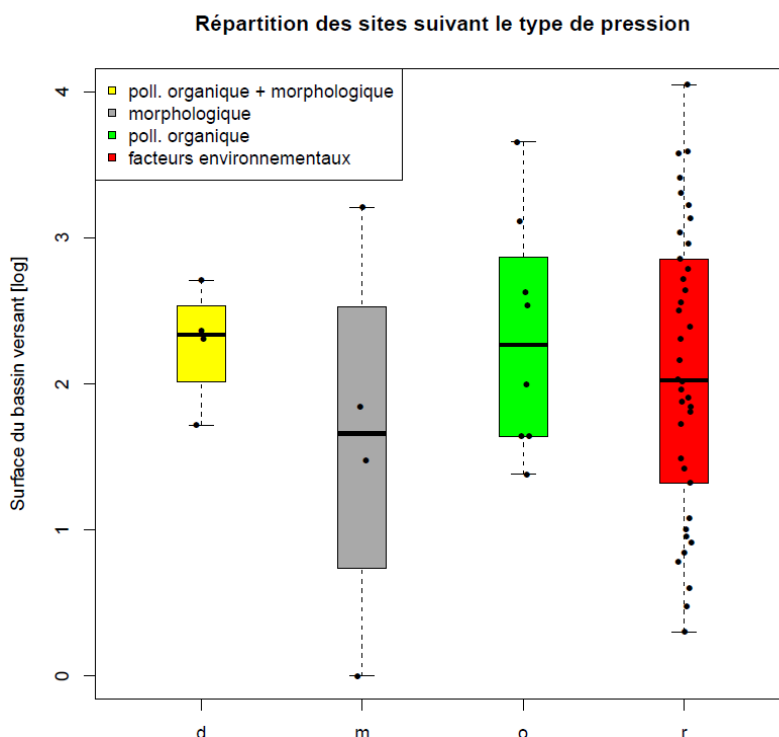
Figure 2 : Répartition géographique des sites concernant l'étude des pressions anthropiques à l'échelle de la France continentale.

### 3.1.2. Étude de l'effet du gradient amont – aval

Concernant la mise en place du plan d'expériences, nous avons d'abord traité le gradient longitudinal par l'intermédiaire de la surface du bassin versant drainée par le cours d'eau au point d'échantillonnage. Comme nous l'avons évoqué précédemment, nous compléterons cette caractérisation de la position dans le gradient longitudinal par une analyse multivariée de quatre paramètres dont cette surface.

Comme le montre la Figure 3, les sites concernant l'étude des facteurs environnementaux couvrent quatre ordres de grandeur de surface de bassin versant, ce qui correspond à la majeure partie de la variabilité observée en France continentale. À titre de comparaison, la plus grande surface de bassin versant est drainée par la Loire à son estuaire et représente 117000 km<sup>2</sup>.

Les sites utilisés pour examiner l'effet des pressions anthropiques ont également été choisis en fonction de la taille de leur bassin versant. La Figure 3 montre qu'ils couvrent une gamme de variabilité du gradient conséquente, similaire à celle couverte par les sites de la problématique 1 (pas de différence significative d'après un test d'analyse de la variance (Anova) : p-value = 0.68), même si elle est évidemment plus restreinte. Il faut noter que les sites échantillonnés par nos collègues toulousains (F. Santoul) ne sont plus inclus dans les représentations à partir de la Figure 3. En les intégrant aux sites soumis à des pressions morphologiques, nous espérons pouvoir mieux appréhender le gradient amont – aval que ce qui est présenté sur la Figure 3.

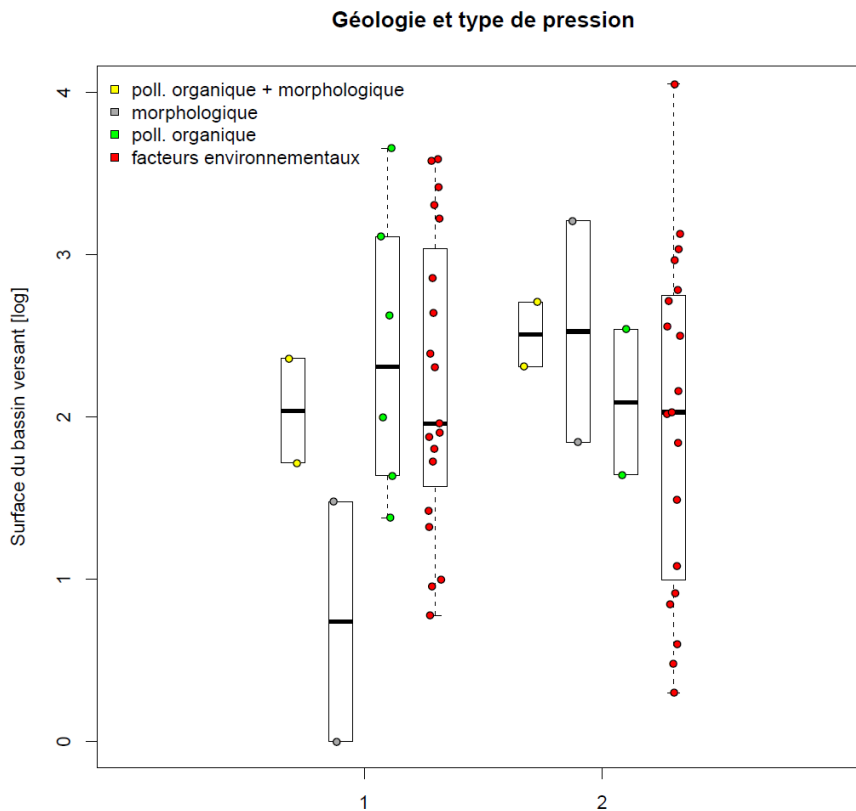


© Nicolas Hette-Tronquart

Figure 3 : Distribution des surfaces de bassin versant drainées par les cours d'eau au point d'échantillonnage en fonction du type de pressions auxquelles le cours d'eau est soumis.

### 3.1.3. Étude de l'effet de la géologie

L'examen du plan d'expériences après son actualisation suite aux phases d'échantillonnage montre que les sites sont équitablement répartis entre les deux types de roches (calcaires et siliceuses, cf. Figure 4). De plus les sites couvrent l'ensemble du gradient amont – aval pour chaque type de géologie. Il n'y a ainsi pas de différence significative due à la géologie entre les distributions des sites de la problématique 1 (en rouge sur la Figure 4, Anova, p-value = 0.460). Il n'y a pas non plus de différence de distributions entre les différents types de pression (interaction pollution organique et morphologique, morphologique, pollution organique et facteurs environnementaux) au sein des sites d'un même type de géologie (test de Kruskal-Wallis p-value = 0.317 pour les roches calcaires et p-value = 0.777 pour les roches siliceuses). On remarque cependant que les sites soumis à des pressions de type « morphologique » ne sont pas équitablement distribués entre les deux types de roches : les sites du type « roches calcaires » ont des bassins versant plus petit que les sites du type « roches siliceuses ». Nous espérons que cette répartition s'améliorera en intégrant les 4 sites de nos collègues toulousains. En ce qui concerne les sites soumis aux pressions de type « pollution organique », les distributions des tailles de bassins versant sont similaires, mais il y a un déséquilibre entre le nombre de sites dont la géologie est de type « roches calcaires » (6 sites) et le nombre de sites dont la géologie est de type « roches siliceuses » (2 sites).



© Nicolas Hette-Tronquart

Figure 4 : Distribution des surfaces de bassin versant drainées par les cours d'eau au point d'échantillonnage en fonction de la géologie (1 = calcaire, 2 = siliceux) et du type de pressions auxquelles le cours d'eau est soumis.



### 3.1.4. Étude de l'effet du climat

Pour bâtir notre plan d'expériences concernant l'étude de l'effet du climat, nous nous sommes basés sur trois variables décrites dans la base IPR+ (le régime pluvial, la température annuelle moyenne et l'altitude). Après la distribution géographique, la surface de bassin versant et la géologie, ces trois variables « climatiques » ont été prises en compte pour effectuer la sélection des sites échantillonnés. L'objectif principal pour les sites de la problématique 1 était de les répartir de manière équitable entre les différents régimes pluviaux et d'obtenir une bonne représentativité des variations de la température et de l'altitude des cours d'eau français. Pour les sites de la problématique 2, l'objectif était d'avoir une couverture de ces trois variables incluses dans la couverture obtenue par les sites de la problématique 1.

Comme le montre la Figure 5, il n'y a pas de différence significative due au régime pluvial entre les distributions selon la surface de bassin versant des sites de la problématique 1 (anova, p-value = 0.667). Excepté 2 sites, les surfaces de bassin versant des sites de la problématiques 2 sont incluses dans les distributions couvertes par les sites de la problématique 1.

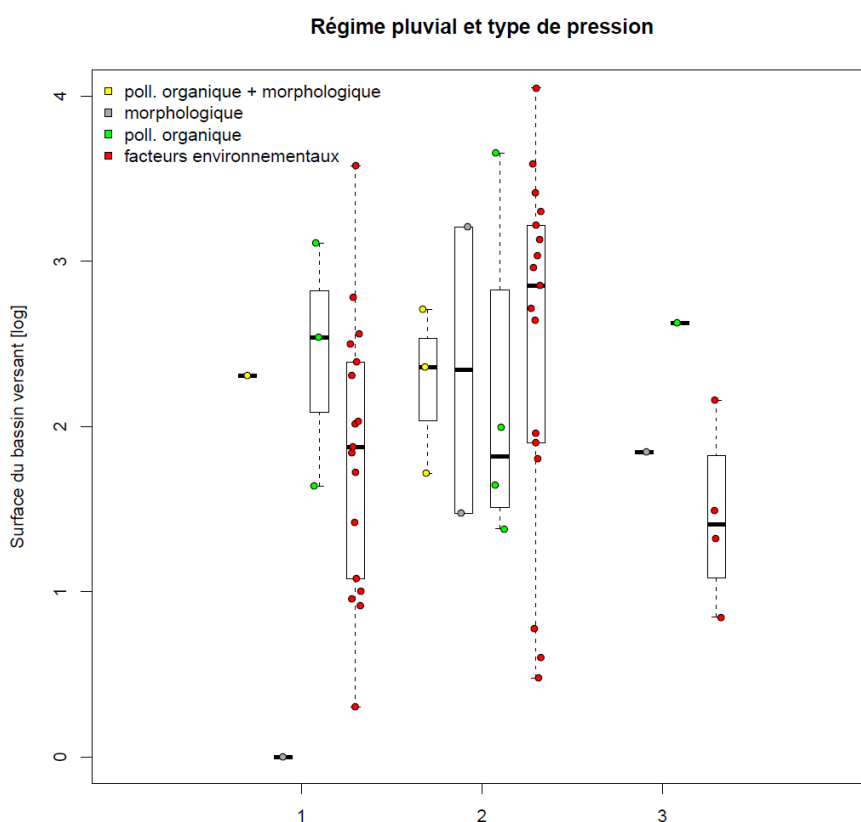
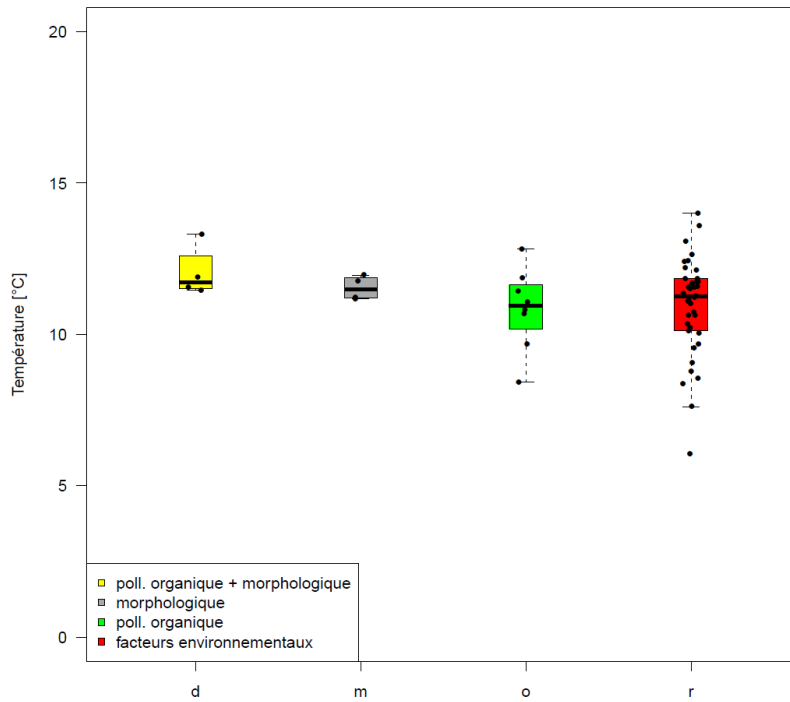


Figure 5 : Distribution des surfaces de bassin versant drainées par les cours d'eau au point d'échantillonnage en fonction du régime pluvial (1 = pluvial fort, 2 = pluvial modéré, 3 = pluvial-nival-glaciaire) et du type de pressions auxquelles le cours d'eau est soumis.

Concernant la température et l'altitude, il n'y a pas de différence significative entre les différents types de pression (cf. Figure 6 et 7 ; pour la température, anova, p-value = 0.465 et pour l'altitude, test de Kruskal-Wallis, p-value = 0.447). Pour les sites de référence de la problématique 1, la température annuelle moyenne varie entre 6,1 et 14 °C, et couvre une bonne partie de la variabilité de la température des cours d'eau arctiques-tempérés (entre 2 et 20 °C selon Jacobsen et al. 1997). Les altitudes des sites au point d'échantillonnage varient entre 15 et 1679 m, avec une médiane de 230 m ce qui semble représentatif des altitudes observées en France continentale (de -4 m à 4810 m).

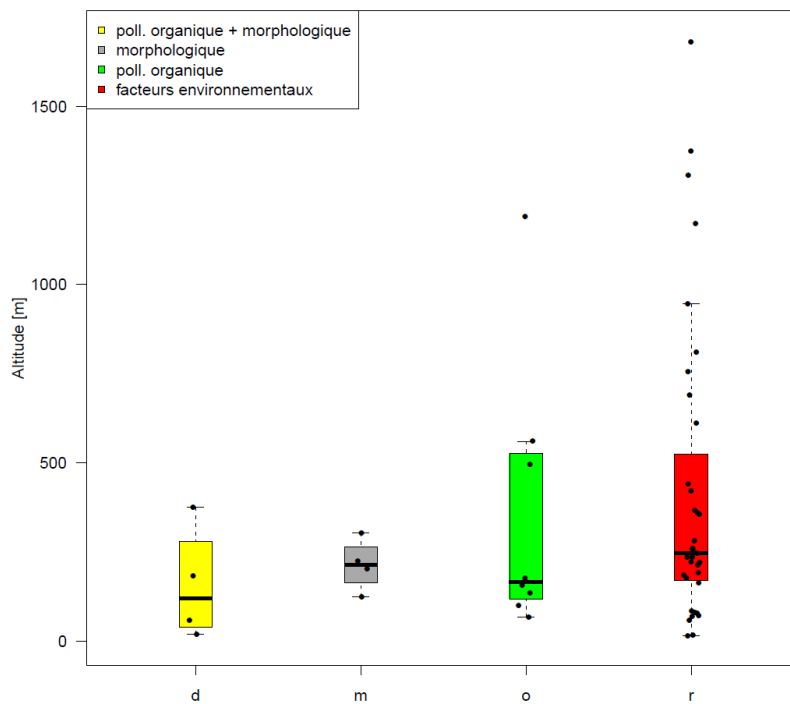
### Température et type de pression



© Nicolas Hette-Tronquart

Figure 6 : Distribution des températures annuelles moyennes des cours d'eau au point d'échantillonnage en fonction du type de pressions auxquelles le cours d'eau est soumis.

### Altitude et type de pression



© Nicolas Hette-Tronquart

Figure 7 : Distribution des altitudes des cours d'eau au point d'échantillonnage en fonction du type de pressions auxquelles le cours d'eau est soumis.

Il faut noter que les différentes variables ne sont pas indépendantes, même si nous avons essayé de limiter la corrélation entre elles. Le tableau 1 dresse le bilan des corrélations significatives (test de corrélation de Pearson, les taux de corrélation ne sont donnés que pour des p-value < 0,1). Logiquement, le lien le plus fort existe entre la température et l'altitude et les autres corrélations restent marginales. Ainsi, la combinaison des variables température et altitude pourra être envisagée dans le traitement des résultats pour éviter des phénomènes de redondance et obtenir un plan d'expériences orthogonal.

Tableau 1 : Corrélation entre les différents facteurs environnementaux.

	Géologie	Régime pluvial	Température	Altitude
Surface du bassin versant [log]	-	-	-	-0,28 (p-value = 0,047)
Géologie		-	-	0,23 (p-value = 0,097)
Régime pluvial			-0,30 (p-value = 0,029)	-
Température				-0,76 (p-value < 0,001)

*Nota bene* : Seuls les taux des corrélations significatives (test de Pearson) sont indiqués dans le tableau.

### 3.1.5. Étude des pressions anthropiques

Pour établir le plan d'expériences du projet nous avons également pris en compte les pressions anthropiques s'exerçant sur les cours d'eau. Nous avons effectué notre analyse à partir de l'expertise des pressions réalisée dans le cadre du développement de l'IPR+. Pour les sites de la problématique 1, il s'agissait de s'assurer que le niveau de pression soit le plus faible possible, tandis que pour les sites de la problématique 2, il s'agissait de choisir des situations contrastées concernant uniquement 2 types de pressions anthropiques (pression de pollution organique et/ou pression morphologique). Voici une extraction de l'expertise IPR+ des données de pression qui nous intéressent pour les 57 sites échantillonnés (tableau 2, 3, 4, 5). Il faut noter que ces données pourront être complétées par des mesures directes de ces pressions (protocole Carhyce, données physico-chimiques) afin de tenter d'obtenir des variables quantitatives et non plus qualitatives.

Dans l'ensemble on constate que les sites choisis pour répondre à la problématique 1 sont peu soumis aux pressions anthropiques (tableau 2). Néanmoins, les sites qui ne sont soumis à aucune pression de type organique et morphologique ne représentent que la moitié de ce jeu de données (21 sites sur 42). Concernant les sites de la problématique 2, on distingue bien les sites soumis essentiellement à une pression de type pollution organique (tableau 3), des sites où les pressions d'ordre morphologique sont prépondérantes (tableau 4), ou encore des sites où les deux pressions s'exercent (tableau 5). Cependant, là encore, on peut constater que les situations ne sont pas toujours aussi contrastées que nous l'aurions souhaité.

Cela suggère que nous devons peut – être modifier notre stratégie d'analyse. Actuellement nous prévoyons de traiter nos hypothèses de façon isolée : « quel est l'effet des facteurs environnementaux ? » d'une part, et « quel est l'effet des différents types de pression ? » d'autre part. Or, nous venons de souligner que la distinction entre nos sites selon les pressions anthropiques n'est pas si nette. Il pourra se révéler plus judicieux d'étudier l'effet des pressions anthropiques simultanément avec l'effet des facteurs environnementaux, en regroupant l'ensemble des sites et en considérant que ceux-ci décrivent un gradient « continu » de pressions, plutôt qu'en les considérant dans des groupes différents. Cette question reste pour l'instant ouverte.

Tableau 2 : Évaluation des pressions s'exerçant sur les sites de la problématique 1.

Code Irstea	Pression d'ordre morphologique					Pression de type pollution		
	Berge	Ripisyl	Rectif	Recal	Autre	Orga	Nutr	Eutroph
11	Nul	Faible	Nul	Nul				Nul
12	Nul	Nul	Nul	Nul		Nul		Nul
13	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul
21	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Moyen	Moyen	Nul
23	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Faible	Moyen	Nul
25	Faible	Moyen	Nul	Nul	Faible	Faible	Moyen	Faible
31	nul	nul	nul	nul	nul	nul	NA	nul
32	nul	nul	nul	nul	nul	NA	NA	NA
33	nul	faible	nul	nul	nul	NA	NA	NA
34	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul			
35	nul	nul	nul	intermédiaire	faible	NA	NA	NA
36	moyen	moyen	nul	nul	nul	NA	NA	NA
41	Fort	Fort	Nul	Nul	Nul	Faible	Faible	Nul
42	Nul	Moyen	Nul	Nul	Nul		Moyen	Nul
43	Nul	Moyen	Nul	Nul	Nul	Faible	Faible	Nul
44	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Faible	Faible	Nul
51	Faible	Faible	Nul	Nul	Nul	Nul	Faible	Non
52	Nul	Nul	Nul	Nul		Nul	Nul	Nul
53	Nul	Faible	Nul	Nul		Faible	Faible	Nul
54	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul
61	Nul	Faible	Nul	Nul	Nul	Nul	Faible	NA
62	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul
63	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Faible	Faible
63	Nul	Faible	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul
64	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul
65	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Faible	Nul
71	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul
72	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul
73	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul
74	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Faible	Faible	Faible
75	Nul	Faible	Nul	Nul	Nul	Faible	Faible	Faible
81	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul
82	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Faible	Moyen	Nul
83	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Faible	Nul
84	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul
85	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul
87	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul
91	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
92	Nul	Faible	Nul	Nul	Nul	Faible	Faible	Faible
93	Nul	Faible	Nul	Nul	Nul	Moyen	Moyen	Moyen
94	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul
95	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

*Nota bene* : Signification des indicateurs de pression : Berge = degré d'artificialisation des berges, Ripisyl = entretien de la végétation et artificialisation des rives, Rectif = modification global du tracé du cours d'eau, Recal = chenalisation/recalibrage du cours d'eau, Autre = autres altérations ayant pour effet la réduction de la diversité des habitats, Orga = pollution organique, Nutr = enrichissement en azote et phosphore, Eutroph = manifestation visible des deux paramètres précédents (développement de végétation)).

Tableau 3 : Évaluation des pressions s'exerçant sur les sites soumis uniquement à une pression de type pollution organique.

Code Irstea	Pression d'ordre morphologique					Pression de type pollution		
	Berge	Ripsisyl	Rectif	Recal	Autre	Orga	Nutr	Eutroph
14	Nul	Nul	Nul	Nul		Forte		Faible
22	Nul	Faible	Nul	Nul	Faible	Faible	Forte	Faible
37	nul	nul	nul	nul	nul	moyen	moyen	non
45	Moyen	Faible	Nul	Nul	Nul	Moyen	Fort	Faible
45	Nul	Faible	Nul	Recalibré	Nul		Forte	Faible
66	Nul	Moyen	Nul	Nul	Nul	Moyen	Moyen	Faible
77	Nul	Faible	Nul	intermédiaire	Nul	Moyen	Nul	Faible
86	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Forte	Forte	Nul
97	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Fort	Moyen	Moyen

*Nota bene* : Signification des indicateurs de pression : cf tableau 2. Pour certains sites, nous disposons de plusieurs expertises qui correspondent à plusieurs entrées dans le tableau.

Tableau 4 : Évaluation des pressions s'exerçant sur les sites soumis uniquement à une pression d'ordre morphologique.

Code Irstea	Pression d'ordre morphologique					Pression de type pollution		
	Berge	Ripsisyl	Rectif	Recal	Autre	Orga	Nutr	Eutroph
38	fort	fort	rectifié	recalibré	faible	NA	NA	NA
46	Faible	Nul	Rectifié	Recalibré	Faible	Faible	Moyen	Nul
46	Nul	Nul	Rectifié	Recalibré	Faible		Moyen	Nul
56	Moyen	Faible	Rectifié	Recalibré		Faible	Moyen	Nul
56	Moyen	Moyen	Rectifié	Recalibré	Nul	Faible	Faible	Nul
96	Forte	Forte	Rectifié	recalibré	Faible	Nul	Faible	Moyen

*Nota bene* : Signification des indicateurs de pression : cf tableau 2. Pour certains sites, nous disposons de plusieurs expertises qui correspondent à plusieurs entrées dans le tableau.

Tableau 5 : Évaluation des pressions s'exerçant sur les sites soumis aux deux types de pression.

Code Irstea	Pression d'ordre morphologique					Pression de type pollution		
	Berge	Ripsisyl	Rectif	Recal	Autre	Orga	Nutr	Eutroph
15	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
24	Moyen	Moyen	Rectifié	Recalibré	Forte	Moyen	Forte	Moyen
55	Forte	Moyen	Rectifié	Nul		Forte	Moyen	Nul
55	Forte	Moyen	Rectifié	Nul	Nul	Fort	Fort	Faible
76	Nul	Moyen	Intermédiaire	Recalibré	Forte	Faible	Faible	Faible
76	Nul	Faible	Intermédiaire	Recalibré	Fort	Faible	Moyen	Faible

*Nota bene* : Signification des indicateurs de pression : cf tableau 2. Pour certains sites, nous disposons de plusieurs expertises qui correspondent à plusieurs entrées dans le tableau.

## 3.2. Échantillonnage et préparation des échantillons

L'échantillonnage des sites retenus dans le plan d'expériences s'est effectué en 2013 et 2014. Il a été réalisé par l'équipe HÉF de l'UR HBAN (Irstea) pour ce qui concerne les sources de matières organiques et les macroinvertébrés, et par les agents de l'Onema pour ce qui concerne le compartiment piscicole. Initialement, nous avons choisi d'échantillonner les sites de la problématique 1 (facteurs environnementaux) durant la première année du projet (2013), car ils représentaient le plus gros effort d'échantillonnage. En raison de contraintes matérielles et de problèmes de communication (difficultés d'échantillonnage liées aux conditions de débits, absence de prélèvement du compartiment poisson), nous avons dû poursuivre cet échantillonnage en 2014, en même temps que l'échantillonnage des sites soumis aux pressions anthropiques (problématique 2). Le bilan provisoire de ces deux phases d'échantillonnage est présenté en annexe 1. Les protocoles d'échantillonnage ont été décrits dans le précédent rapport et seule la version actualisée du protocole d'échantillonnage du compartiment piscicole est présentée en annexe 2 (modifications suite aux échanges avec les collègues de l'Onema en charge de l'échantillonnage).

### 3.2.1. Sources de matière organique et macro-invertébrés

L'échantillonnage des sources de matière organique et des macro-invertébrés a été accompli par Irstea durant les mois de mai, juin, juillet et/ou août 2013 et/ou 2014. Il a nécessité 16 déplacements de 3 à 4 jours à 2, 3 ou 4 personnes, représentant un total de 21813 km. Au total près de deux mille échantillons ont été collectés et seront analysés. Les bilans des années 2013 et 2014 sont disponibles en annexes 3 et 4.

La stratégie d'échantillonnage a été décrite dans le premier rapport du projet. Elle est basée sur le choix de taxons cibles et concerne des macrophytes, bryophytes, algues, biofilm, matière en suspension et litière pour les sources de matière organique, un taxon brouteur, racleur, filtreur actif, filtreur passif, déchiqueteur, microdétritivore et prédateur pour les macro-invertébrés.

### 3.2.2. Poissons

La majeure partie de l'échantillonnage du compartiment piscicole a été réalisé par l'Onema, conformément aux accords prévus dans la fiche action de la convention Irstea – Onema 2013-2015. En 2013, 31 sites ont été prospectés, 23 espèces ont été prélevées (Ablette, Anguille, Barbeau fluviatile, Blageon, Bouvière, Brochet, Chabot, Chevaine, Epinoche, Gardon, Goujon, Hotu, Loche Franche, Ombre, Ecrevisse, Perche, Perche soleil, Sandre, Silure, Spirin, Truite Fario, Vairon et Vandoise) pour un total de 1034 échantillons.

En 2014, 27 sites devaient être échantillonnés et nous sommes actuellement en train d'organiser le rapatriement des échantillons des délégations de l'Onema à Irstea. Le nombre d'échantillons devrait être légèrement inférieur à celui de 2013.

La plupart des prélèvements de poissons ont concerné des nageoires et ont permis d'éviter le sacrifice des individus. Pour 361 individus, qui avaient été tués par l'opération de pêche électrique ou qui étaient trop petits pour pouvoir prélever des nageoires, des muscles dorsaux ont été prélevés.

Depuis la fin de l'année 2013, la préparation des échantillons pour l'analyse isotopique a commencé. Il s'agit de lyophiliser, broyer chaque échantillon, afin de pouvoir peser quelques centaines de microgrammes dans des capsules en étain. Une fois fermées, ces capsules seront analysées par un spectromètre de masse à ratio isotopique couplé à un analyseur élémentaire. Actuellement, environ 2000 échantillons (soit la totalité des échantillons de poissons et la quasi-totalité des échantillons de sources de matière organique et de macroinvertébrés de l'année 2013) sont prêts à être analysés. Leur analyse débutera dès que notre instrumentation sera de nouveau opérationnelle (début mars ?). Ensuite les analyses se dérouleront au rythme de 220 échantillons par semaine et nous pouvons donc espérer obtenir les résultats isotopiques de l'ensemble de la première campagne d'échantillonnage pour le début du mois de juin. La préparation des échantillons de la campagne 2014 se poursuivra en parallèle et, si aucun autre souci matériel ou technique ne se présente, leurs analyses isotopiques devraient être disponibles à la fin de l'année 2015.

### 3.3. Valorisation de résultats antérieurs

Parallèlement à l'échantillonnage des sites et à la préparation des échantillons, nous avons poursuivi notre veille concernant les métriques isotopiques développées par la communauté scientifique. C'est dans ce cadre que nous avons détecté des abus de langage et des imprécisions dans l'utilisation des modèles de mélange. La rédaction d'une publication est prévue au début de l'année 2015 à ce sujet.

Nous avons aussi abordé la problématique 3 du développement des métriques isotopiques en utilisant le jeu de données isotopiques de l'équipe HÉF. Même si ces données ne concernent que les réseaux trophiques de 22 cours d'eau représentatifs du bassin versant de l'Orge (affluent de la Seine), elles permettent déjà de tester quelques hypothèses de façon préliminaire. Utilisant 12 cours d'eau de ce jeu de données, nous avons commencé à étudier l'influence du gradient amont – aval sur le réseau trophique. Nous avons ainsi montré que son effet était déjà sensible malgré la faible partie du gradient que nous avons considéré (ordre de grandeur en log de 1 à 2). Cela laisse supposer un effet majeur du gradient avec les sites du projet de l'action 33, qui couvrent un gradient beaucoup plus large (de 1 à 4 en log). Dans notre étude, nous avons aussi pu tester deux métriques isotopiques, et développer une nouvelle approche utilisant ces métriques (cf. partie 2.3.). Cette approche pourra également être employée pour traiter les problématiques 1 et 2. Par ailleurs cela nous a permis de préciser que les modifications du réseau trophique peuvent être de deux natures : structurelle (modification des membres du réseau) et fonctionnelle (modification des interactions entre les membres du réseau). Notamment nous nous sommes intéressés au lien entre modification structurelle (augmentation de la richesse spécifique) et modification fonctionnelle (augmentation de la diversité trophique exhibée par le réseau). Ces résultats ont fait l'objet de la présentation d'un poster au colloque annuel de la British Ecological Society organisé conjointement avec la Société Française d'Écologie à Lille en décembre 2014. Une publication concernant ces mêmes résultats est actuellement soumise à la revue « Aquatic Sciences ».

## 4. Projet pour 2015

L'année 2015 sera l'occasion d'entamer la dernière phase du projet : après la phase de collecte des données, nous pourrons en faire l'analyse pour répondre à nos trois problématiques. En raison du retard pris par l'analyse isotopique des échantillons, il est à craindre que toutes les données acquises durant ces trois années de projet ne puissent pas être exploitées (en particulier les données collectées en 2014). Il nous semble toutefois raisonnable de pouvoir obtenir suffisamment tôt les analyses isotopiques de tous les poissons échantillonnés, pour traiter nos trois problématiques en considérant au minimum le compartiment piscicole.

A priori nous ne prévoyons pas de nouvelle campagne d'échantillonnage en France en 2015, à moins que des problèmes techniques nous y obligent (perte d'échantillons, compartiment piscicole non échantillonné en 2014). En revanche, une campagne d'environ 2 semaines se déroulera en Bolivie. Initialement prévue en 2014, cette campagne d'échantillonnage a dû être repoussée en 2015 pour des raisons d'ordre administratif (demande d'autorisations auprès des peuples indigènes). Cette étude est un complément à l'examen de l'influence du climat sur le réseau trophique faisant partie de la problématique 1.

### 4.1. Étude de l'interaction entre valeur moyenne et variabilité de la température de l'eau sur le fonctionnement trophique des cours d'eau tempérés (France) et tropicaux (Bolivie)

Dans le contexte de changement global, la compréhension de la manière dont le fonctionnement des écosystèmes est susceptible d'évoluer constitue un enjeu crucial. A l'heure actuelle, les liens entre le fonctionnement trophique des cours d'eau et la température restent très mal connus. Hette-Tronquart et al. (2013) a montré que la variabilité de la température de l'eau semble affecter négativement la longueur de chaîne trophique. À l'inverse, un effet positif des valeurs moyennes de la température de l'eau sur la longueur de chaîne a été trouvé (Woodward et al. 2010). Jusqu'à présent, aucune étude ne s'est intéressée à l'interaction d'une augmentation des valeurs moyennes avec une augmentation de la variabilité de la température de l'eau sur le fonctionnement trophique des cours d'eau. Or, l'augmentation des valeurs moyennes de la température de l'eau en raison du changement climatique s'accompagnera aussi d'une augmentation de la variabilité de la température (IPCC 2007). L'échantillonnage prévu sera effectué en août 2015 et suivra la même stratégie que celle développée pour le projet de l'action 33. Les analyses isotopiques seront analysées selon un protocole similaire (à Irstea ?) de façon à pouvoir faciliter la comparaison entre les sites tropicaux et tempérés.

### 4.2. Préparation et analyse des échantillons 2013 et 2014

Parallèlement, la préparation et l'analyse des échantillons 2013 et 2014 se poursuivront en 2015. L'objectif est d'arriver à analyser tous nos échantillons d'ici à la fin de l'année. Pour la quasi-totalité des échantillons 2013, la préparation est déjà terminée et seule l'analyse est à effectuer. Pour les échantillons 2014, les sources de matière organique et les macroinvertébrés sont prêts à être lyophilisés, puis broyés. Les échantillons de poissons devront en plus être nettoyés avant la lyophilisation. Ceci correspond à 40 jours de travail. Il restera à peser les échantillons 2014, mais ceci devrait prendre moins de temps que pour les échantillons 2013. En effet, grâce à une amélioration de l'interface faisant le lien entre l'analyseur élémentaire et le spectromètre de masse, la pesée pourra être moins précise ( $\pm 100 \mu\text{g}$  au lieu de  $\pm 10 \mu\text{g}$ ) et devrait s'effectuer plus rapidement. Nous estimons ce travail à 50 jours. Au total, il semble raisonnable que les échantillons prélevés en 2014 seront prêts à analyser en juillet 2015. Ceci devrait laisser suffisamment de temps pour pouvoir effectuer leur analyse isotopique (estimée à 10 semaines) avant la fin de l'année 2015, si le spectromètre de masse à ratio isotopique ne connaît plus d'autres pannes.

### 4.3. Valorisation des résultats

Comme nous l'avons déjà évoqué, l'équipe HÉF d'Irstea dispose d'un jeu de données isotopiques concernant le bassin versant de l'Orge. Suite à la valorisation de l'effet du gradient amont – aval à



l'échelle de ce bassin versant, nous prévoyons également de poursuivre le test de différentes métriques avec ce jeu de données. En particulier nous examinerons l'interaction de la ripisylve et des saisons sur les sources de matière organique exploitées par le réseau trophique en utilisant des modèles de mélange. À ce titre, nous encadrons un stage de niveau master 2 de janvier à juillet. Nous espérons pouvoir rédiger un article à ce sujet durant l'année 2015. Nous avons aussi l'intention d'examiner l'effet de l'occupation des sols à différentes échelles spatiales sur le réseau trophique en utilisant ce même jeu de données. L'analyse de cette question a déjà été abordée dans le cadre de la thèse de N. Hette-Tronquart et devrait pouvoir aboutir assez rapidement à la publication d'un article.

Nous pourrions également poursuivre l'étude des relations isotopiques muscles-nageoires que nous avons commencé en 2012 (Hette-Tronquart et al. 2012), en utilisant les signaux isotopiques des muscles collectés durant le projet de l'action 33. En particulier nous souhaitons utiliser ces nouvelles données pour valider les modèles que nous avons établis précédemment avec des données obtenues essentiellement sur le bassin versant de la Seine. Cela permettra de tester si nos modèles peuvent être étendus à l'ensemble de la France continentale. Si les résultats isotopiques de tous les poissons sont disponibles suffisamment tôt, cela pourrait faire l'objet d'un article méthodologique court avant la fin de l'année 2015.

Nous envisageons également de donner une présentation orale des premiers résultats dont nous disposerons au 9<sup>ème</sup> colloque SEFS (Symposium for European Freshwater Sciences) qui se tiendra à Genève du 5 au 10 Juillet 2015.

Enfin, suite à notre revue bibliographique sur les métriques isotopiques nous souhaitons écrire rapidement une note méthodologique concernant l'utilisation des modèles de mélange, pour une soumission à la revue *Food Webs* au mois de mars 2015.

## 5. Conclusion

Après 2 années de travail nous avons réalisé l'ensemble de l'échantillonnage nécessaire à l'acquisition des données pour le projet de l'action 33. Les échantillons de l'année 2013 sont presque tous prêts à être analysés. Ceux de 2014 doivent encore être préparés. Si le spectromètre de masse à ratio isotopique ne subit plus de panne, nous serons donc en mesure de terminer la phase d'acquisition de données pour la fin d'année 2015.

En 2015, nous commencerons la phase d'analyse de ce jeu de données isotopiques conséquent et nous examinerons nos trois problématiques (étude des facteurs environnementaux, effet des pressions anthropiques et développement/sélection de métriques isotopiques). Cette phase devrait commencer au début de l'été 2015, lorsque nous disposerons des premiers résultats isotopiques. En attendant, nous exploiterons le jeu de données isotopiques de l'équipe HÉF, concernant le territoire plus restreint du bassin versant de l'Orge. Ceci nous permettra de tester de façon préliminaire des hypothèses liées aux trois problématiques du projet de l'action 33 (par exemple : étude du gradient amont – aval).

En 2015, nous continuerons d'interagir avec les DIR de l'Onema pour recueillir leur expertise et les différentes données dont nous aurons besoin pour caractériser les sites échantillonnés. En particulier le suivi thermique des sites de la problématiques 1 se poursuivra au moins jusqu'à la fin de l'année 2015.

D'après notre planning initial, les soucis d'utilisation du spectromètre de masse ont entraîné un retard de 3 à 4 mois. À la fin du projet il nous manquera sans doute un peu de temps pour pouvoir fournir une analyse détaillée de l'ensemble du jeu de données acquis durant le projet de l'action 33, mais nous nous efforcerons d'être en mesure de fournir a minima une première analyse de nos trois problématiques.

## 6. Glossaire

**Biocénose** : Ensemble des êtres vivants rencontrés dans un biotope donné

**Bio-indicateurs** : Également appelés indicateurs biologiques, ils se basent sur les communautés biologiques pour mesurer l'état écologique d'un écosystème ou encore mesurer l'impact de l'homme sur l'écosystème

**Biotope** : Ensemble d'éléments caractérisant un milieu physico-chimique déterminé et uniforme qui héberge une flore et une faune spécifiques

**Chaîne trophique/chaîne alimentaire** : relative à un organisme. ensemble des êtres vivants et des relations alimentaires (chaque espèce mangeant la précédente) menant à un organisme donné depuis les sources de matière organique. s'emploie aussi pour un écosystème et correspond à la chaîne alimentaire du prédateur dont le niveau trophique est le plus élevé dans le réseau

**Écosystème lotique** : ensemble formé par une biocénose et un biotope propre aux eaux courantes, vulgairement appelées cours d'eau

**État écologique** : expression de la qualité de la structure et du fonctionnement d'un écosystème

**Facteurs environnementaux** : tout élément « naturel » (climat, géologie, ...) susceptible d'agir sur les êtres vivants d'un écosystème

**Gradient amont – aval** : variation des contraintes physiques (volume d'eau, vitesse de courant, taille des sédiments, largeur du chenal) de l'amont à l'aval d'un cours d'eau, entraînant des modifications de la structure et vraisemblablement du fonctionnement des communautés biologiques

**Isotopes** : les isotopes désignent les différentes formes d'un élément de la classification périodique qui possèdent le même nombre de protons mais un nombre de neutrons différents. Ils ont donc la même structure électronique mais une masse différente. Ils peuvent être stables ou se désintégrer au cours du temps.

**Matière organique** : ensemble des matières issues des êtres vivants et de leur décomposition

**Niveau trophique** : nombre d'intermédiaires entre un organisme et les sources de matière organique du réseau trophique

**Pressions anthropiques** : généralement toutes actions d'origine humaine qui entraînent des modifications de l'état écologique d'un écosystème par rapport à son état de référence

**Ratio isotopique** : rapport entre les abondances d'un isotope lourd et léger d'un élément chimique

**Régime alimentaire** : ensemble des êtres vivants consommés par un animal

**Réseau trophique** : ensemble des relations alimentaires entre les êtres vivants ou en décomposition d'un écosystème.

## 7. Sigles & Abréviations

**Carhyce** : CARactérisations HYdromorphologiques des Cours d'Eau

**DCE** : Directive Cadre sur l'Eau

**DIR** : Délégation InterRégionale de l'Onema

**HÉF** : équipe de recherche HydroÉcologie Fluviale d'Irstea

**IPCC** : International Panel on Climate Change

**IPR+** : Nouvel indice poisson rivière

**IRD** : Institut de Recherche pour le Développement

**Irstea** : Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture

**Onema** : Office national de l'eau et des milieux aquatiques

**UMSS** : Université Mayor de San Simon de Cochamba (Bolivie)

**UR HBAN** : Unité de recherche Hydrosystèmes et Bioprocédés du centre d'Antony d'Irstea

## 8. Bibliographie

- Allan, J. (2004). Landscapes and riverscapes : The influence of land use on stream ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* **35**, 257–284.
- Arim, M., Marquet, P. & Jaksic, F. (2007). On the relationship between productivity and food chain length at different ecological levels. *American Naturalist* **169**, 62–72.
- Bearhop, S., Adams, C., Waldron, S., Fuller, R. & Macleod, H. (2004). Determining trophic niche width : A novel approach using stable isotope analysis. *Journal of Animal Ecology* **73**, 1007–1012.
- Belliard, J., Boët, P. & Tales, E. (1997). Regional and longitudinal patterns of fish community structure in the seine river basin, france. *Environmental Biology of Fishes* **50**, 133–147.
- Borrett, S. & Lau, M. (2014). enar : An r package for ecosystem network analysis. *Methods in Ecology and Evolution* **5**, 1206–1213.
- Chang, H.Y., Wu, S.H., Shao, K.T., Kao, W.Y., Maa, C.J., Jan, R.Q., Liu, L.L., Tzeng, C.S., Hwang, J.S., Hsieh, H.L., Kao, S.J., Chen, Y.K. & Lin, H.J. (2012). Longitudinal variation in food sources and their use by aquatic fauna along a subtropical river in taiwan. *Freshwater Biology* **57**, 1839–1853.
- Elton, C. (1927). *Animal ecology*. Macmillan Co, New York.
- Fink, P., Reichwaldt, E., Harrod, C. & Rossberg, A. (2012). Determining trophic niche width : An experimental test of the stable isotope approach. *Oikos* **121**, 1985–1994.
- Hette-Tronquart, N., Mazeas, L., Reuilly-Manenti, L., Zahm, A. & Belliard, J. (2012). Fish fins as non-lethal surrogates for muscle tissues in freshwater food web studies using stable isotopes. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* **26**, 1603–1608.
- Hette-Tronquart, N., Roussel, J.M., Dumont, B., Archaimbault, V., Pont, D., Oberdorff, T. & Belliard, J. (2013). Variability of water temperature may influence food-chain length in temperate streams. *Hydrobiologia* **718**, 159–172.
- Hette-Tronquart, N., Tales, E., Oberdorff, T. & Belliard, J. (2015). Stable isotopes reveal food web modifications along the upstream-downstream gradient of a temperate stream. *Aquatic Sciences* p. under submission.
- Marzin, A., Archaimbault, V., Belliard, J., Chauvin, C., Delmas, F. & Pont, D. (2012). Ecological assessment of running waters : Do macrophytes, macroinvertebrates, diatoms and fish show similar responses to human pressures? *Ecological Indicators* **23**, 56–65.
- Ogle, K., Tucker, C. & Cable, J. (2014). Beyond simple linear mixing models : Process-based isotope partitioning of ecological processes. *Ecological Applications* **24**, 181–195.
- Parlement européen et conseil du 23 octobre 2000 (2000). *DCE. Directive 2000/60/CE établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau*.
- Parry, M., Canziani, O., Palutkof, J., der Linden, P.V. & Hanson, C. (eds.) (2007). *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, chap. IPCC Climate Change, 2007. The Physical Sciences Basis. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

- Petts, G. & Calow, P. (eds.) (1996). *River Biota : Diversity and Dynamics*. Blackwell Science, Oxford.
- Phillips, D., Inger, R., Bearhop, S., Jackson, A., Moore, J., Parnell, A., Semmens, B. & Ward, E. (2014). Best practices for use of stable isotope mixing models in food-web studies. *Canadian Journal of Zoology* **92**, 823–835.
- Sabo, J., Finlay, J. & Post, D. (2009). Food chains in freshwaters. *Annals of the New York Academy of Sciences* **1162**, 187–220.
- Thompson, R., Brose, U., Dunne, J., Hall, R., Hladysz, S., Kitching, R., Martinez, N., Rantala, H., Romanuk, T., Stouffer, D. & Tylianakis, J. (2012). Food webs : Reconciling the structure and function of biodiversity. *Trends in Ecology and Evolution* **27**, 689–697.
- Thompson, R. & Townsend, C. (2005). Energy availability, spatial heterogeneity and ecosystem size predict food-web structure in streams. *Oikos* **108**, 137–148.
- Townsend, C. & Hildrew, A. (1994). Species traits in relation to a habitat templet for river systems. *Freshwater Biology* **31**, 265–275.
- Ulanowicz, R., Holt, R. & Barfield, M. (2014). Limits on ecosystem trophic complexity : Insights from ecological network analysis. *Ecology Letters* **17**, 127–136.
- Vander Zanden, M. & Fetzer, W. (2007). Global patterns of aquatic food chain length. *Oikos* **116**, 1378–1388.
- Vannote, R., Minshall, G., Cummins, K., Sedell, J. & Cushing, C. (1980). The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **37**, 130–137.
- Verneaux, J., Schmitt, A., Verneaux, V. & Prouteau, C. (2003). Benthic insects and fish of the Doubs river system : Typological traits and the development of a species continuum in a theoretically extrapolated watercourse. *Hydrobiologia* **490**, 63–74.
- Winemiller, K., Hoetinghaus, D., Pease, A., Esselman, P., Honeycutt, R., Gbanaador, D., Carrera, E. & Payne, J. (2011). Stable isotope analysis reveals food web structure and watershed impacts along the fluvial gradient of a mesoamerican coastal river. *River Research and Applications* **27**, 791–803.
- Woodward, G., Dybkjaer, J., Ólafsson, J., Gíslason, G., Hannesdóttir, E. & Friberg, N. (2010). Sentinel systems on the razor's edge : Effects of warming on arctic geothermal stream ecosystems. *Global Change Biology* **16**, 1979–1991.

## 9. Table des illustrations

Figure 1 : Répartition géographique des sites concernant l'étude des facteurs environnementaux à l'échelle de la France continentale. ....	13
Figure 2 : Répartition géographique des sites concernant l'étude des pressions anthropiques à l'échelle de la France continentale. ....	13
Figure 3 : Distribution des surfaces de bassin versant drainées par les cours d'eau au point d'échantillonnage en fonction du type de pressions auxquelles le cours d'eau est soumis. ....	14
Figure 4 : Distribution des surfaces de bassin versant drainées par les cours d'eau au point d'échantillonnage en fonction de la géologie (1 = calcaire, 2 = siliceux) et du type de pressions auxquelles le cours d'eau est soumis. ....	15
Figure 5 : Distribution des surfaces de bassin versant drainées par les cours d'eau au point d'échantillonnage en fonction du régime pluvial (1 = pluvial fort, 2 = pluvial modéré, 3 = pluvial-nival-glaciaire) et du type de pressions auxquelles le cours d'eau est soumis. ....	16
Figure 6 : Distribution des températures annuelles moyennes des cours d'eau au point d'échantillonnage en fonction du type de pressions auxquelles le cours d'eau est soumis. ....	17
Figure 7 : Distribution des altitudes des cours d'eau au point d'échantillonnage en fonction du type de pressions auxquelles le cours d'eau est soumis. ....	17
Tableau 1 : Corrélation entre les différents facteurs environnementaux. ....	18
Tableau 2 : Évaluation des pressions s'exerçant sur les sites de la problématique 1. ....	19
Tableau 3 : Évaluation des pressions s'exerçant sur les sites soumis uniquement à une pression de type pollution organique. ....	20
Tableau 4 : Évaluation des pressions s'exerçant sur les sites soumis uniquement à une pression d'ordre morphologique. ....	20
Tableau 5 : Évaluation des pressions s'exerçant sur les sites soumis aux deux types de pression. ...	20
Tableau 6 : Bilan de l'échantillonnage des sources de matière organique et des macro-invertébrés réalisé par Irstea sur 39 sites. Les nombres indiquent le nombre d'échantillons par taxon. Les « ok », ou les croix signalent généralement que 3 échantillons pourront être réalisés avec le prélèvement effectué. La colonne commentaire précise les taxons qui complètent l'échantillonnage des taxons cibles ou les éventuelles difficultés rencontrées lors des prélèvements. ....	34
Tableau 7 : Bilan de l'échantillonnage des sources de matière organique et des macro-invertébrés réalisé par Irstea sur 27 sites. Les nombres indiquent le nombre d'échantillons par taxon. Les « ok », ou les croix signalent généralement que 3 échantillons pourront être réalisés avec le prélèvement effectué. La colonne commentaire précise les taxons qui complètent l'échantillonnage des taxons cibles ou les éventuelles difficultés rencontrées lors des prélèvements. ....	36



## 10. Annexes

### 10.1. Annexe 1 : Listes des sites échantillonnés pour les sources de matière organique et les macro-invertébrés et pour les poissons selon l'année de prélèvement.

Code Irstea	Code Onema	nom du cours d'eau	DIR	sources de MO et macro-invertébrés		poissons	
				2013	2014	2013	2014
11	01620066	la Créquoise	1	×	×	×	×
12	03020127	les Grands Riaux	1	×	×		×
13	03500173	la Grande Vallée	1	×		×	
14	01590054	l'Hogneau	1		×		×
15	03771010	l'Almont	1		×		×
21	04290018	l'Aulne	2	×		×	
22	04530066	la Vaudelle	2	×	×		×
23	04560076	la Sarre	2	×		×	
24	04350002	le Couesnon	2		×		×
25	04720011	l'Huisne	2		×		×
31	02080241	la Marche	3	×		×	
32	02540102	la Moselle	3	×		×	
33	02550032	la Meuse	3	×		×	
34	02680145	le Riedbrunnen	3	×		×	
35	02880042	le Vair	3	×		×	
36	03520034	la Marne	3	×		×	
37	02570257	l'Altbach	3		×		×
38	02680212	l'Ill	3		×		×
41	04181025	la petite Sauldre	4	×		×	
42	04360049	l'Indre	4	×		×	
43	04361005	l'Anglin	4	×		×	
44	04371002	la Gartempe	4	×	×	×	
45	04180042	le Cher	4		×		×
46	04360046	le Nahon	4		×		×
51	06010049	l'Ain	5	×	×		×
52	06260291	la Roanne	5	×	×		×
53	06690201	le Ru de Rochefort	5	×			
54	06730362	le Doron de Termignon	5	×	×		×
55	04420054	le Furan	5		×		×
56	06730213	le Gélon	5		×		×



Code Irstea	Code Onema	nom du cours d'eau	DIR	sources de MO et macro-invertébrés		poissons	
				2013	2014	2013	2014
61	04030144	l'Allier	6		×		×
62	04150002	l'Allanche ou Courbières	6	×			
63	04430060	la Loire	6	×		×	
64	04430147	la Gagne	6	×		×	
65	04636667	la Couze Chambon	6	×		×	
66	05150012	la Cère	6		×		×
71	05122001	la Boralde	7	×		×	
72	05332001	la Leyre	7	×		×	
73	05642003	le Gave d'Issau	7	×		×	
74	05651001	le Gave de Pau	7	×		×	
75	05652006	l'Echez	7	×		×	
76	05311007	la Vendinelle	7		×		×
77	05461004	le Bléou	7		×		×
81	05480076	le Valat de Baumale	8	×		×	
82	06110080	le Rieutort	8	×	×	×	
83	06300040	le Galeizon	8	×		×	
84	06300042	la Vis	8	×		×	
85	06660071	l'Aude	8	×		×	
86	06050060	le Guil	8		×		×
87	06060103	la Bévéra	8		×		×
91	03890203	la Cure	9	×		×	
92	04719012	l'Arconce	9	×		×	
93	06390330	la Seille	9	×	×	×	×
94	06700331	les Fourches	9	×		×	
95	06700357	la Lanterne	9	×			
96	06700330	la Morte	9		×		×
97	06250348	le Doubs	9		×		×
			Total	39	27	31	25

*Nota bene* : Les croix rouge indiquent que l'échantillonnage, la conservation ou la préparation des échantillons n'a pas été optimal.

## **10.2. Annexe 2 : Protocole d'échantillonnage du compartiment piscicole**

Cliquer sur l'objet pour ouvrir le protocole.

Caractérisation des réseaux trophiques en cours d'eau

Protocole d'échantillonnage

Nicolas Hette Tronquart et Jérôme Belliard

### 10.3. Annexe 3 : Échantillonnage des sources de matière organique et des macro-invertébrés pour 2013

Tableau 6 : Bilan de l'échantillonnage des sources de matière organique et des macro-invertébrés réalisé par Irstea sur 39 sites. Les nombres indiquent le nombre d'échantillons par taxon. Les « ok », ou les croix signalent généralement que 3 échantillons pourront être réalisés avec le prélèvement effectué. La colonne commentaire précise les taxons qui complètent l'échantillonnage des taxons cibles ou les éventuelles difficultés rencontrées lors des prélèvements.

GPS	TAXON CODE	baetis	gasteropodes	moules	hydropychides	gammarus	odonates	chironomes	oligochètes	MES	litière	biofilm	macrophytes	bryophytes	Plectoptères		Gdes éphémères	formol	COMMENTAIRES
															12	12			
482	11	3	ok	ok	3	3		2	3	×	×	×	×	×	×			3 ryacophilidae	
483	12	2	ok	ok?	3		ok	3	1	×	×	×				gd, pt	3	2 mégalo, 3 leptoph, 1 libel., 1 ryaco	
	13	3	ok	ok	3	3	ok	3	2	×	×	×							
	21	3	ok		2		ok		1	×	×	×	×	×					
	22	3	ok		3	3	ok	2	1	×	×	×						Pléco noté 13	
	23	3	ok	2	3	2	ok	2	3	×	×	×	×					1 moule dans eppendorf	
484	31	3	ok	ok	3	3	ok	3	3	×	×	×						2 ryaco, 31081=racine (reste=sédimt)	
	32	1	2	gd+pt		3	ok	1	1	×	×	×	×					1 simu, ephem (3, 2*2*), 1 baetis ?	
485	33	3	ok	ok	3	3	ok	1	2	×	×	×	×	×				1 ryaco, 2 éphémèrella, 2 Dikerogam.	
	34		4	ok		3		1	1	×	×	×	×					3 mégalo, 3 tricho à f., 1 demois. adult	
496	35	3	2	2	3	3	ok			×	×	×	×	×				1 ryaco, 1 éphémèrella, 1 damsel adult	
497	36	3	2	2	3	3	ok	1	2	×	×	×	×	×		2		2 nepes	
450	41	3	ok	1	3	3	ok	1	2	×	×	×	×					1 filtre non grillé, 1 foutu !	
	42	3	ok	3	3	3	ok		2	×	×	×	×	×				3 éphémèrella, algues	
	43	3	ok	3		3	ok		2	×	×	×	×	×				3 éphémèrella	
	44	1	ok	3?	3	3	ok	1		×	×	×	×					2 éphémèrella ?	
	51	3	ok	1	2	3	ok	2	3	×	×	×	×	×				2 tubes 08 oubliés la nuit, 1 MES	
476	52	1			1	2				×	×	×				1 pt		2 sim., 2 libel en tube, 1 Hepta, 1 MES	
448	53	3	ok		3	3	ok			×	×	×				×		1 filtre foutu pour MES	
	54	3						1		×	×	×						1 MES, 1 baetis sûr + 2 ?, 1 simuli	
451	62	3	ok	ok	3	2	ok	1	2	×	×	×						1er MES éprouvette pas lavée	
480	63	3	ok	ok	3	2	ok	2	1	×	×	×						2 éphémèrella	

Tableau 6 (suite)

GPS	TAXON	SITES												COMMENTAIRES				
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12					
		baetis	gastéropodes	moules	hydropsychides	gammares	odonates	chironomes	oligochètes	MES	Itière	biofilm	macrophytes	bryophytes	Plécoptères	Gdes éphémères	formol	
478	64	3			3			2	1	×	×	×	×	×	1	3		1 mégalo, 1 libel. en tube
481	65	3	ok		3			2		×	×	×	×	×	3	×	×	2 simuli
457	71	3	ok	ok	3		ok	3	1	×	×	×	×	×	3	3		1 libel. + petites zygo.
	72	3	ok		3		ok	2	2	×	×	×			pt			libellule
	73	3	ok						1	×	×	×			×		×	1 MES, voir liste ci-dessous
	74	1						3?		×	×	×			×		×	1 MES, voir liste ci-dessous
489	75	3	ok		3	3	ok	1		×	×	×				3		1 sim., 3 ryaco (gd + pt,(a)=+1 gd)
452	81	3	ok		3	3		2		×	×	×	×	×	3	3		
	82	3	ok		3	1	ok	1	1	×	×	×	×	×	3	3	×	algues
453	83	3	ok		3		ok	2		×	×	×						2 MES
454	84	3	ok	ok	3	3		1	1	×	×	×	×	×	3	3		
455	85	3	ok	ok	3			1	1	×	×	×				3	×	1 mégalo.
446	91	2	ok		3	3	ok	2	1	×	×	×	×	×				2 éphémèrella ?
449	92	3	ok	3		3	ok		1	×	×	×					×	1 flt. non grillé/2 foutus, liste ci-après
447	93	3	ok			3				×	×	×				3		3 simul.
	94	3	ok		1	3	ok	1		×	×	×				1	×	1 baetis, 1 trico
	95	1		ok		3	ok		1	×	×	×	×	×			×	1 trico, 1 éphémèrella
	95*	2	ok		3							1	×					
en +	73				3	ryaco, 3 sim., 3 heptag (noté éphém), pleco (1 fin, 2 foncé, Gd), 1 lepto, 1 baetis												
en +	74				1	sim., 3 tricho à f, 3 baetis, pleco (3 fins, 3 pt, Gd), 2 ryaco, 3 heptag (noté ecnio)												
en +	92				3	trichoptères à f. (non noté 92 au départ), 2 simulidé, 2 écrevisses, 2 éphémèrella												

## 10.4. Annexe 4 : Échantillonnage des sources de matière organique et des macro-invertébrés pour 2014

Tableau 7 : Bilan de l'échantillonnage des sources de matière organique et des macro-invertébrés réalisé par Irstea sur 27 sites. Les nombres indiquent le nombre d'échantillons par taxon. Les « ok », ou les croix signalent généralement que 3 échantillons pourront être réalisés avec le prélèvement effectué. La colonne commentaire précise les taxons qui complètent l'échantillonnage des taxons cibles ou les éventuelles difficultés rencontrées lors des prélèvements.

GPS	TAXON	CODE	baetis	gasteropodes	moules	hydropsychidés	gammarus	odonates	chironomes	oligochètes	MES	littère	biofilm	macrophytes	bryophytes	Plécoptères	Gdes éphémères	Formol	COMMENTAIRES
733	11	3	2	1		3	3	1 adlt	3	3	09	10	11	1	1	1	17	3	B en 06 = demoi. adlt
735	12	1	1		1			3	2	1	3	1	3			1	3	1	voir liste ci-dessous
734	14	2	3	1	2	3	3	3	3	2	3	1	3				3	2	voir liste ci-dessous
41	15	3	1	3	3	3	3	3+1B	3	3	3	1	3	AL			2		
740	22	2	1	1	3	3	3	2+1B	1	1	3	1	3			3	3		voir liste ci-dessous
741	24	2	2	1	2	3	3	3+1B	1	2	3	1	3	*	1	1	3		voir liste ci-dessous
739	25	3	3	1	2	3	3	2+1B	3	2	3	1	3	RE	1		3	2	1 ephmlldé, 3 ephm à dét., 1 ryaco
736	37	2	1		2	3	3	1+1B	2	1	3	1	3	AL ?					2 mégalo, 1 ryaco, chiro (1R=01 + 1B)
737	38	2	3	1+1B	3	3	3	2+1B	2	1	3	1	3		2			1	voir liste ci-dessous
	44	3	3	2 B	3	3	3	3		2	3	1	3	RE			1		1 Ryacophilidé, 1 simulidé
	45	3	3	2 B	3	3	3	3	2	3	3	1	3	RE					1 Ryacophilidé
	46	3	3	1	3	3	3	3	1	3	3	1	3				1		
	51	1		1		3	3	1	2	2	3	1	3		1		1		chiro (1R=01 + 1B), 06 = libel, 3 ephemldés
46	52	1			3	1	3	3 lib			2	1	3			2		1	voir liste ci-dessous
en +																			
en +	11		1 ryaco, 1 sim, trico à fourreaux (3 +1B), chiro (1B=01 + 2R), pleco=14																
en +	12		4 écrev, 1 hetpa, 1 sim, 2 mégalo, pleco=14, 3 lepto, 1 diptère																
en +	14		2 ryaco, 2 trico fourreau, 1 ephmlldés, chiro (1R=01 + 2B)																
en +	22		3 ryaco, 3 hepta, 2 oligoneuridés, 2 ephmlldés, pleco = 12																
en +	24		2 ryaco, 1 hepta, 1 ephmlldé, 1 mégalo, 3 hémipt, pleco = perlodidé, * = RE+CA, 06 : dont 1 lib. = 04																
en +	38		1 hepta, 1 coleo, chiro (1R=01 + 1B), gam = Dikero																
en +	52		1 nepe, 1 ryaco, 1 hepta, 1 sim, 3 éphémères à dét., pleco = 12																

SITES

Tableau 7 (suite)

GPS	TAXON	baëtis	gastéropodes	moules	hydropychides	gammares	odonates	chironomes	oligochètes	MES	litière	biofilm	macrophytes	brypophytes	Plectères	Gdes éphémères	formol	COMMENTAIRES
	Code	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11				17		B en 06 = demoi. adlt
729	54	3						1		3	1	3			3		1	voir liste ci-dessous
43	55	3	3	1	3		1+4B	3	3	3	1	3	AL					3 asellidés
728	56	3	3		3	3		3	2	3	1	3		×				3 ryaco, chiro (1R=01 + 2B)
47	61	3	3	1+2B	3	1	4+1B	3	2	3	1	3	MY			2	1	voir liste ci-dessous
40	66	3	3	1	3	1	4+1B	3	3	3	1	3		×	1	1		voir liste ci-dessous
38	76	2	1	2	3	3	3+1B	1	2	3	1	3				1		1 ryaco, 1 hepta
37	77	3	2			3	3B	3	3	3	1	3		×		3		1 mégalo, 1 ryaco, 1 ecrev.
39	82	3	2		3	2	1 (lib)	1	1	3	1	3	AL		5	3		1 sim., 1 ryaco, pleco (3 12/2 nd), 2 écr
730	86	3				3		3		2	1	3			3		1	voir liste ci-dessous
45	87	3			2			1	2	3	1	3	AL		2	3	2	2 sim, 3 hepta, 3 ryaco, 1 mégalo
731	93	3	3		1	3		3	3	3	1	3	AL		2	3	3	voir liste ci-dessous
732	96	3	3			3		3	2	3	1	3	*				1	voir liste ci-dessous
	97	3	4	2	3	3		2	3	3	1	3	RE	1		3		voir liste ci-dessous
en +	54	3 ryaco, 1 asel, 1 sim, 3 trico, 1 diptère, 3 ephmlés, hepta (3pt, 1gd = 04), 2 blephariceridés																
en +	61	1 sim, 1 asel, 1 ryaco, 1 trico, 3 tipulidés, 3 ephmlés, 1 coleo, 3 OCL, 1 nepe, 06 : dont 1 lib = 05																
en +	66	3 éphmlés, 3 ryaco, écrev. (3 Gdes/1 moy,4pt), 06 : dont 1 lib = 04, pleco = 12 pt																
en +	86	3 hepta, 3 ryaco, 3 tipul, 3 sim, 3 trico à fourreau, chiro (2R+1B=03), pleco = 13																
en +	93	3 ryaco, 3 ephmlés, 3 hepta, 1 sim, 3 trico à fourreau, chiro (1R=03+2B), pleco (13 et 14)																
en +	96	1 sim, 2 ryaco, 2 planaires (notés PLA), 1 dytique (noté dytique), 1 trico, 3 éphmlés, chiro (2R+1B=01), * = RE+AL+CA+BR																
en +	97	gastéro : 04 = Bythinidé ?, moules : 02 = pt, chiro : 01 = pt (R), 02 = gd (R+B), 3 ryaco, 3 ephmlés, 1 mégalo, 3 sericost																

SITES

## Remerciements

Les auteurs du rapport remercient toutes les personnes ayant contribué à la réalisation de ce travail. En particulier ils remercient Kévin Piorkowski, Estelle Dallaserra et Mathieu Girondin pour leur participation à l'échantillonnage des sources de matière organique et des macro-invertébrés, ainsi que pour leur travail de préparation des échantillons, en vue de leur analyse avec le spectromètre de masse à ratio isotopique. Ils remercient également tous les correspondants de l'Onema qui ont permis de transmettre l'information et d'organiser les prélèvements du compartiment piscicole, ainsi que tous les agents qui ont réalisé cet échantillonnage. Enfin ils remercient toutes les personnes qu'ils ont pu rencontrer lors de leur passage dans les DIR afin de récupérer les échantillons de poissons, pour leur accueil et les échanges qu'ils ont eu avec elles.



**Irstea**

1, rue Pierre Gilles de Gennes

CS 10030

92761 Antony

**01 40 96 61 21**

**[www.irstea.fr](http://www.irstea.fr)**

**Onema**

Hall C – Le Nadar

5, square Félix Nadar

94300 Vincennes

**01 45 14 36 00**

**[www.onema.fr](http://www.onema.fr)**