



Étude des colmatages minéraux et algaux des fonds de la Loue (25): conséquences sur les compartiments biologiques



Luce Malverti

Master 2 Qualité des Eaux, des sols et Traitement
Option Système Aquatique des Bassins Versants

Devant un jury composé de

M. Pierre-Marie Badot : Professeur de l'Université de Franche Comté, Directeur du Master

M. Hervé Decourcière : Ingénieur d'étude à Téléos. Tuteur universitaire.

M. François Degiorgi : Maître de Conférences Université de Franche Comté. Tuteur universitaire. Responsable du Master option SABV

Mme Myriam Euvrard : Maître de Conférences Université de Franche Comté. Responsable du Master option PTD.

M. Christian Rossignon, Ingénieur hydrobiologiste à la Fédération de pêche du Doubs. Maître de stage.

Ce mémoire est un travail d'étudiant présenté pour obtenir l'unité de valeur "stage long" du Master QUEST : il n'a donc pas été soumis à correction définitive.

Remerciements

Cette étude n'aurait pu voir le jour sans la collaboration de nombreuses personnes et structures. Je tiens donc à remercier la fine équipe de la fédération de pêche du Doubs avec qui j'ai passé de bons moments, et particulièrement Christian Rossignon et Alexandre Cheval pour leur aide précieuse dans cette étude.

Merci à François Degiorgi pour avoir été l'initiateur de cette étude et pour m'avoir aiguillé dans ce travail.

Je remercie aussi l'Agence de l'eau et particulièrement Vincent Porteret pour l'obtention des financements sans lesquels de nombreuses analyses n'auraient pu être réalisées.

Merci à Hervé Decourcière pour sa vérification de mes listes faunistiques ainsi qu'au bureau d'étude Téléos pour son prêt du courantomètre.

Et enfin, je remercie Esther Courrèges pour m'avoir aidé, deux jours durant, à trier quelques-uns des 160 bocaux des MAG40, ainsi que Samuel et Noé Le quitte pour leur précieux soutien.

RESUME

La Loue, rivière réputée pour ses ressources halieutiques, subit depuis une vingtaine d'année une dégradation de sa qualité biologique qui se sont soldés par une mortalité piscicole impressionnante en 2010. De nombreux dysfonctionnements de la rivière sont à l'origine de ce constat, dont l'augmentation de l'apport de fines et du colmatage minéral et algal des fonds de la Loue.

Le suivi par des mesures ponctuelles du flux de fines entre mai et août 2011 a montré que ce flux a lieu essentiellement durant les épisodes orageux lorsque le débit de la Loue est en crue avec une augmentation pouvant atteindre un facteur 1000 par rapport aux périodes d'étiage estival. Ce flux de fines entraîne un apport important en phosphore total puisque les analyses de phosphore réalisées sur les matières en suspension (MES) révèlent des valeurs supérieures à 2000 mg/kg. Lors de ces épisodes orageux, les analyses sur les eaux révèlent en outre un apport important d'azote dissous, principalement sous forme de nitrate dont la concentration augmente d'un facteur 2. Ces apports en phosphore et en azote sont susceptibles d'entraîner des développements algaux.

Les conséquences sur le compartiment biologique du colmatage des fonds de la Loue par les algues et par les fines auquel s'ajoute le colmatage par les concrétions calcaires (tufs) ont été étudiées en comparant les peuplements piscicoles et macrobenthique d'une part entre des substrats colmatés et non colmatés, d'autre part entre des environnements différents présentant une variété d'habitat plus ou moins élevée. Cette étude a permis de montrer que la qualité biologique est plus élevée dans les secteurs affichant une grande diversité habitationnelle et se détériore dans les substrats colmatés.

ABSTRACT

The Loue river, renowned for its fish resources, has seen its biologic quality deteriorate over the last two decades, leading to an impressive fish mortality in 2010. Many river dysfunctions are responsible for this damage, notably the fine particles yield as well as the mineral and algal clogging.

The concentration of suspended fine particles was monitored from May to August 2011. The measurements showed that the fine particles flux - which carry an important amount of total phosphore (TP) (more than 2000 mg/kg) - occurred during storm events leading to a 1000-fold increase of fine particles fluxes compared to low water periods. Moreover, water analyses show a substantial yield of dissolved nitrogen, mainly in the form of nitrate which concentration rate is doubled during the storm events. This phosphorus and nitrogen yield may lead to algal bloom.

The biological consequences of the clogging due to fine particles, algae and calcareous crusts were investigated through the comparison of the fish and macroinvertebrate populations living in clogged and unclogged substrates and also between various aquatic habitats diversity environments. The results show that the biological quality is better in the high habitats diversity sectors and is abnormally damaged in the clogged substrates.

TABLE DES MATIERES

I. INTRODUCTION	8
II. BASSIN VERSANT ET RESEAU HYDROGRAPHIQUE DE LA LOUE.....	10
II.1. Caractéristiques hydrographiques et hydrogéologiques	10
II.1.1. Réseau hydrographique.....	10
II.1.2. Contexte géologique	11
II.2. Conditions climatiques et régime hydrologique du cours d'eau.....	12
II.3 Les impacts anthropiques.....	13
III. MATERIELS ET METHODES	14
III.1. Choix des stations.....	14
III.1.1 Stations situées à Cessey	14
III.1.2. Stations situées à la Piquette.....	16
III.2. Cartographie habitationnelle selon le protocole IAM	16
III.3. Problématique des fines.....	17
III.3.1. Mesure du flux de MES.....	18
III.3.2. Analyse chimique des MES.....	19
III.3.3. Analyses des eaux.....	20
III.3.4. Analyses chimiques des sédiments fins du lit	20
III.4. Problématique des concrétions calcaires (tufs)	21
III.5. Conséquence sur le compartiment biologique.....	21
III.5.1 Peuplement macrobenthique	21
III.5.2. Peuplement piscicole	23
IV. RESULTATS	24
IV.1 Cartographie habitationnelle des stations.....	24
IV.2. Apports de fines au cours d'eau	26
IV.2.1. Flux de fines.....	26

IV.2.2 Conséquences sur la physico-chimie de la Loue.....	28
IV.3 Analyse de la microporosité des différents types de concrétions calcaires.....	33
IV.4 Conséquences sur le compartiment biologique.....	34
IV.4.1 Peuplement des macroinvertébrés benthiques.....	34
IV.4.2. Peuplement piscicole.....	41
V. INTERPRETATION ET DISCUSSION.....	46
V.1 L'apport de fines dans la Loue.....	46
V.2 Les concrétions calcaires.....	47
V.3. Les conséquences du colmatage des fonds sur la qualité biologique de la Loue.....	48
V.3.1. Comparaison inter-station.....	48
V.3.2 Comparaison intra station.....	53
VI. CONCLUSION.....	54
BIBLIOGRAPHIE.....	56

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 2.1: Situation géographique de la Loue et de son bassin versant (figure Téléos 2002).....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 2.2: Evolution des débit mensuels entre 2006 et 2011 sur la Loue au niveau de Chenecey-Buillon.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure 3.1:(a) Situation géographique des stations (b) Profil longitudinal de la Loue de sa source à Quingey.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 3.2: Photo d'un piège à matières en suspension installé à la verticale de l'écoulement dans la Loue.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 4.1: Evolution des concentrations des matières en suspension sur les stations de Cessey diversifiée et Piquette diversifiée entre le 30 mai et le 02 août 2011.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure 4 2: Evolution du flux de fines sur les stations de Cessey diversifiée et Piquette diversifiée entre le 30 mai et le 02 août 2011.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure 4.3: Evolution du phosphore dans les MES sur les 4 stations entre le 30 mai et le 02 août 2011.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure 4.4: Evolution du rapport DCO/DBO5 dans les eaux prélevées sur les stations Piquette diversifiée et Cessey diversifiée entre le 30 mai et le 02 août 2011.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure 4.5: Evolution des concentrations de nitrates dans les eaux prélevées sur les stations Piquette diversifiée et Cessey diversifiée entre le 30 mai et le 02 août 2011.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure 4.6: Carte factorielle F1F2 calculée sur l'ensemble des données des 4 stations : projection des taxons de macroinvertébrés et des trois descripteurs substrats/supports, vitesse et hauteur d'eau.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure 4.7: Carte factorielle F1F2 calculée sur chaque station : (a) Cessey diversifiée, (b) Cessey colmatée, (c) Piquette diversifiée et (d) Piquette colmatée.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure 4.8 : Comparaison des peuplements piscicoles entre la station Cessey diversifiée (Cd) et la station Cessey colmatée (Cc).....</i>	<i>42</i>
<i>Figure 4.9 : Comparaison des peuplements piscicoles entre la station Piquette diversifié (Pd) et la station Piquette colmatée (Pc).....</i>	<i>42</i>
<i>Figure 4.10: Carte factorielle F1F2 des résultats des 4 stations : projection des espèces de poisson, des stations et des 3 descripteurs de l'habitat.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure 4.11: Carte factorielle F1F2 projetant les espèces de poisson, les vitesses de courant, les hauteurs d'eau et trois types de substrats (blocs, blocs tufés, nassis, tufs avec et sans anfractuosités).....</i>	<i>45</i>
<i>Figure 5.1: Comparaison des densités totales, de chabot, de loches et de vairons sur les 4 stations.</i>	<i>51</i>
<i>Figure 5.2: L'abondance et la variété générique du macrobenthos échantillonnées sur 40 placettes pour les 4 stations.....</i>	<i>51</i>
<i>Figure 5.3: Comparaison des variétés génériques du macrobenthos entre les 4 stations.....</i>	<i>52</i>
<i>Figure 5.4: Score obtenus pour l'ensemble des taxons associés au mode de brouteur et racleurs en fonction du pourcentage de recouvrement algal (station Piquette diversifiée (Pd), Piquette colmatée (Pc), Cessey diversifiée (Cd) et Cessey colmatée (Cc)).....</i>	<i>53</i>

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 3.1: Niveaux typologiques théoriques sur nos 4 stations sur la Loue. La dureté (D) est une valeur moyenne obtenue à partir de données de plusieurs sources (SAINT-OLYMPE, 2005 ; Dren franche comté, 2000 ; Syndicat mixte de la Loue, 1999).....</i>	16
<i>Tableau 4.1: Description de la qualité physique sur les 4 stations.....</i>	25
<i>Tableau 4.2: Résultats des analyses réalisées sur les MES prélevées dans les pièges le 30 mai, le 22 juin et le 02 août 2011.....</i>	29
<i>Tableau 2.3: Résultats des analyses sur les sédiments fins prélevés dans le lit sur les 4 stations de la Loue.....</i>	31
<i>Tableau 4.4: Analyse du peuplement macrobenthique sur les 4 stations.....</i>	36
<i>Tableau 4.5: Abondance relative et variété générique relative du macrobenthos associées à différentes modalités de l'habitat.</i>	38
<i>Tableau 4.6 : Répartition des densités et des variétés du peuplement piscicole en fonction des caractéristiques de l'habitat : substrats/support, vitesse et hauteur d'eau.....</i>	44

LISTE DES ANNEXES

<i>Annexe 1: Cartographies des habitats des 4 stations.....</i>	60
<i>Annexe 2 : Résultats des mesures des concentrations en MES.....</i>	68
<i>Annexe 3: Résultats des analyses sur les eaux.....</i>	70
<i>Annexe 4: Résultats des pêches par CAPPE.....</i>	71
<i>Annexe 5: Résultats des listes faunistiques sur les 4 stations.....</i>	76
<i>Annexe 6: Les valeurs seuils proposées par le guide de l'Ontario au Canada sont fixées par rapport aux effets sur les organismes benthiques (Persaud et al., 1993).....</i>	86
<i>Annexe 7 : Descriptif des calculs de l'Indice d'Attractivité Morphodynamique (IAM).....</i>	86
<i>Annexe 8: Résultats des analyses cristallographiques par DRX sur les différents types de tufs.....</i>	87

I. INTRODUCTION

La Loue est une rivière de Franche-Comté présentant de forts enjeux touristiques et halieutiques et qui était reconnue pour sa grande valeur écologique. Or, depuis plusieurs années, la Loue et ses affluents subissent une dégradation de leur qualité physico-chimique et biologique. Parmi les causes de ces dégradations, l'apport croissant de fines aux cours d'eau et le problème du colmatage des fonds ne sont pas des moindres.

Le développement récent des activités anthropiques a fait croître l'apport de particules fines vers les cours d'eau, en augmentant l'érosion des sols des bassins versants (Wood et Armittage, 1997 ; Mahler et Lynch, 1999 ; Russell et al., 2001 ; Nelson et Booth, 2002 ; Walling, 2005 ; Collins et Walling, 2007). Ces particules se composent de matières organiques et inorganiques dont le diamètre est inférieur à 2mm. Ces fines, principalement transportées en suspension, ont de nombreuses conséquences sur les cours d'eau. Entre autres, elles sont susceptibles d'être une source en nutriments et carbone organique (Lefebvre, 2003) mais aussi en substances toxiques comme les PCB, HAP et métaux lourds (Bilotta et Brazier 2008 ; Owens et al., 2005). De plus, ces apports de fines peuvent entraîner un colmatage du lit des cours d'eau et, par voie de conséquences, des effets dommageables sur la biocénose aquatique en colmatant les habitats et les frayères de la faune benthique (Bo et al., 2007 ; Rabeni et al. 2005 ; Bilotta et Brazier 2008, Kemp et al. 2011 ; Greig et al., 2005).

L'enrichissement en substances nutritives à l'échelle mondiale (Dodds, 2003) se traduit par une surproduction algale dans les cours d'eau. Or, par ses caractéristiques biogènes, milieu peu profond, avec une faible végétation rivulaire et avec un degré de minéralisation et de trophie élevée, la Loue est particulièrement vulnérable aux proliférations algales (Tomczak, 2004, Frossard, 2006, Vacelet, 2008). Ces proliférations entraînent des conditions de vie dommageables pour la biocénose aquatique.

La Loue, rivière calcaire, subit un troisième type de colmatage par la formation de concrétions calcaires (tufs) qui cimentent les fonds de la rivière. Trois sortes de tufs sont observés sur cette rivière dont les conséquences sur la biocénose aquatique diffèrent : les « nassis » forment des barres tufeuses créant des sous berges propices à la vie aquatique, alors que les deux autres types de tufs sont moins biogènes en colmatant et uniformisant les fonds de la Loue. Cependant, de ces deux derniers types de concrétions calcaires, on peut tout de même distinguer les tufs « expansés » avec la présence de cavités, par rapport aux tufs « denses » qui forment des surfaces lisses peu propices à la faune aquatique. Or, depuis ces dernières années, ce dernier type de tufs semble prendre de l'ampleur.

L'objectif de cette étude est donc de répondre à plusieurs questions :

- Quelle est la dynamique de l'apport de fines dans la Loue ?

- Quelles sont les conséquences de cet apport sur la qualité physico-chimique de la Loue ?
- Quelle est l'importance des effets des différents types de colmatage sur le peuplement piscicole et le peuplement des macroinvertébrés benthiques ?

Pour ce faire, cette étude se décompose en trois étapes. La première consiste à quantifier les variations du flux de fines en suivant des épisodes de crue et des épisodes d'étiage durant l'été 2011. Des analyses chimiques seront alors réalisées sur ces matières en suspension afin d'évaluer les éventuelles contaminations nutritives et toxiques qui pourraient leur être associées. La seconde étape a pour objectif de réaliser une description précise de la mosaïque habitationnelle afin de quantifier la proportion occupée par chaque type de colmatage. Il s'agira alors dans une dernière étape d'étudier les conséquences sur le peuplement benthique et piscicole du colmatage algal et minéral des fonds de la Loue. Une comparaison de ces peuplements, d'une part, entre des stations d'hétérogénéité habitationnelle différente et d'autre part à l'échelle des habitats de la station permettront de quantifier les effets de ces colmatages.

II. BASSIN VERSANT ET RESEAU HYDROGRAPHIQUE DE LA LOUE

II.1. Caractéristiques hydrographiques et hydrogéologiques

II.1.1. Réseau hydrographique

La vallée de la Loue est située à l'Ouest du Département du Doubs en Franche Comté. Le bassin versant topographique de la Loue est estimé à environ 1900 km², mais en raison du contexte géologique de calcaires karstiques de la vallée, le bassin versant hydrographique de la Loue est bien plus important (figure 2.1). En effet, la source de la Loue est constituée d'une résurgence principalement alimenté par des pertes du Doubs et du Dugeon situé dans le secteur de Pontarlier.

La Loue prend sa source dans la commune d'Ouhans à 543m d'altitude et conflue avec le Doubs dans la commune de Parcey (193 m d'altitude) après avoir parcouru 126 km. De Ouhans à Vuillafans, la Loue s'écoule dans des gorge sur environ 25 km et collecte une quinzaine d'exurgences et de résurgences. A partir de Vuillafans où le module (ou débit moyen interannuel) de la Loue atteint 21 m³/s, la vallée s'élargit bien qu'elle reste toujours assez encaissée (la plaine alluvial ne dépasse pas 500 m à l'aval d'Ornans). Le réseau hydrographique se hiérarchise et les manifestations karstiques perdent de l'ampleur.

Sur l'ensemble de son linéaire, la Loue est alimenté par environ 50 affluents dont les plus important sont la Brême alimenté par le plateau d'Ornans, le Lison issu d'une résurgence, la Furieuse et la Curieuse alimenté partiellement par les pertes de la Furieuse. Le dénivelé moyen de la Loue est estimé à environ 2.8‰. Cependant, on peut distinguer trois secteurs : le secteur de la source à Lods, appelé Haute Loue, est caractérisé par une vallée étroite profondément encaissée présentant les caractéristiques d'un torrent (pente moyenne de 20‰, largeur de 15 m et granulométrie grossière (bloc et roche mère)). Dans le secteur entre Lods et Quingey (Moyenne Loue), le lit de la Loue s'élargit progressivement passant de 20 à 40 m et la pente devient moins forte avec une moyenne de 2‰. Bien que la Loue commence a déposé ces premiers alluvions dans ce secteur, elle garde tout de même un caractère érosif. Le dernier secteur entre Quingey et la confluence avec le Doubs (Basse Loue) est caractérisé par une vaste plaine alluviale où les vitesses ralentissent (pente moyenne environ 1‰ et largeur comprise entre 50 et 60 m). Les phénomènes de sédimentation sont alors favorisés et la Loue méandre dans ses propres alluvions.

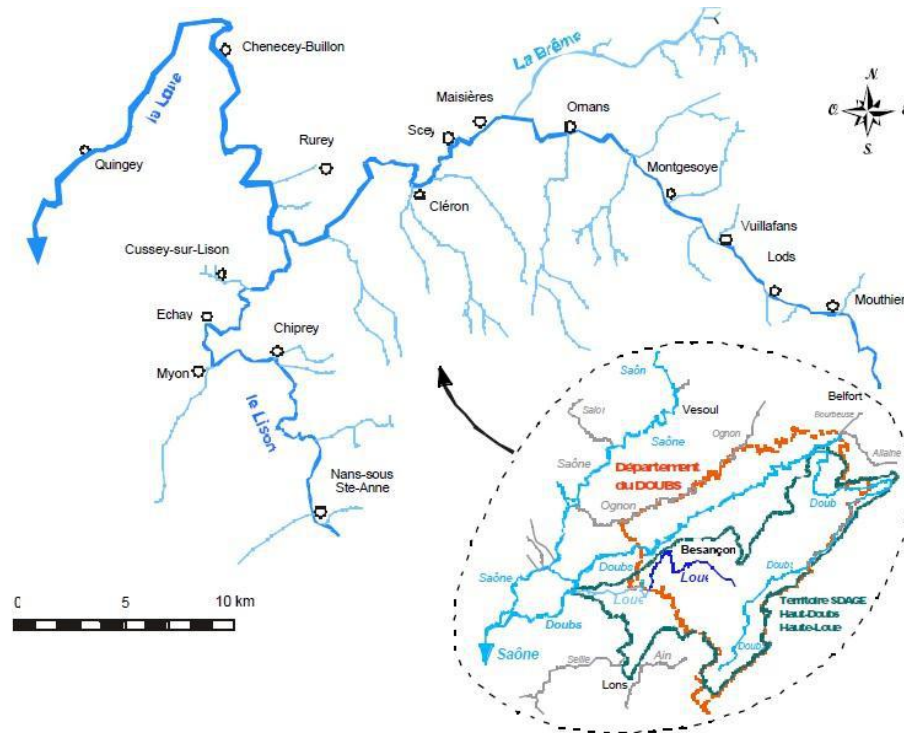


Figure 2.1: Situation géographique de la Loue et de son bassin versant (figure Téléos 2002).

II.1.2. Contexte géologique

La Loue s'écoule principalement dans les formations du Jura externe constitué de zones tabulaires (plateaux) séparées par des zones plissées. La source de la Loue surgit dans les calcaires du Kimmeridgien. La Loue s'engage après dans les gorges de Nouailles où elle incise les formations sous-jacentes du jurassique supérieur (calcaires du Kimmeridgien puis du Séquanien). Depuis l'usine hydro-électrique de Mouthier Haute-Pierre jusqu'à la sortie du village, la Loue franchit une zone dans des terrains qui s'étagent entre le Lias et le Jurassique (marnes liasiques et calcaires du Jura moyen). La Loue s'engage ensuite dans le plateau d'Ornans où les eaux coulent le plus souvent sur des niveaux du Jurassique moyen (Callovien et Bathonien d'Ornans à Cléron, Bajocien de Cléron à Chenecey-Buillon). A partir de Chouzelot, la vallée s'ouvre sur une grande plaine alluviale (quelques centaines de mètres à 1000m). Un peu en amont d'Arc et Senans, la vallée s'élargit et la Loue s'écoule entre les coteaux pliocènes dans une vaste plaine d'environ 4 kilomètres de large. La Loue a creusé son lit dans les dépôts pliocène de la forêt de Chaux, cailloutis sur lesquels reposent des formations fluviales, récentes et anciennes.

II.2. Conditions climatiques et régime hydrologique du cours d'eau

Le bassin de la Loue est caractérisé par un climat continental constitué d'une forte amplitude thermique annuelle avec des été chauds et des hivers rudes. Il se distingue aussi par une tendance océanique du fait de la forte pluviométrie et une répartition annuelle régulière des précipitations. La pluviométrie est comprise entre 1100 mm/an et 1550mm/an pour la Haute vallée.

L'hydrologie de la Loue est caractérisée par un régime mixte, pluvio-nival. L'influence nivale se traduit par un maximum au printemps (mars-avril) et un étiage hivernal (janvier-février). L'influence pluviale est marquée par un maximum en fin d'automne (novembre-décembre) et un minimum en juillet (typique des climats océaniques) et par une augmentation du débit en août-septembre (propre aux climats continentaux) (figure 2.2). Cependant, l'évolution du régime hydrologique de la Loue semble évoluer vers un régime à dominance pluviale avec un minimum en août et un maximum en décembre (Decourcière et Martin, 1998).

D'autre part, comme le montrent ces mêmes auteurs, les variabilités entre les débits de crue et les débits d'étiage ont considérablement augmenté. Les débits de crues sont plus forts dû à l'accroissement des surfaces urbanisées qui augmentent le ruissellement et donc le transfert direct des précipitations au cours d'eau. Au contraire, ces surfaces urbanisées diminuent les débits d'étiage en diminuant l'alimentation des nappes phréatiques qui redistribue l'eau à la rivière pendant les périodes sèches.

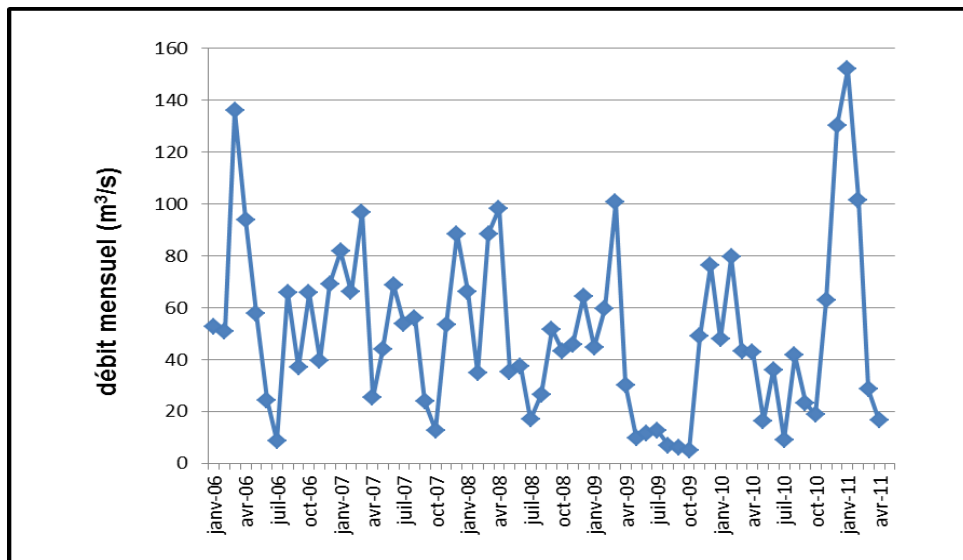


Figure 2.2: évolution des débits mensuels entre 2006 et 2011 sur la Loue au niveau de Chenecey-Buillon.

II.3 Les impacts anthropiques

Le bassin de la haute et moyenne Loue est caractérisé par une importante activité agricole et rurale dominé par l'élevage de vaches laitière expliquant la présence de nombreuses laiteries-fromageries sur le plateau.

D'autre part, la politique générale d'intensification de l'agriculture est à l'origine de perturbations d'ordre physique et chimique sur la qualité de la Loue. Dans la moyenne vallée de la Loue, les superficies des cultures, en particulier du maïs, du tournesol et du colza se sont fortement accrues en 20 ans. Ces tendances ont entraîné des modifications du profil transversal de la rivière (suppression de la ripisylve et donc érosion des berges conduisant à l'élargissement du lit en aval de Chenecey). De plus, cette intensification des pratiques culturales a pu conduire à une augmentation des apports en fines à la rivière. En effet, depuis ces dernières années, la Loue change de couleur lors des fortes crues ce qui s'explique sans doute par des importants apports en particules fines. Ces apports s'accompagnent d'une richesse excessive en nutriment, pollution toxique et bactériologique. L'excès en nutriments est présent dès la source (DIREN, 1997) et est en partie responsable des développements de végétaux excessifs. Ces phénomènes s'accompagnent d'une qualité biologique inférieure au potentiel du cours d'eau (Agence RMC, 1995). Une source non négligeable en pollution toxique pourrait provenir de la seconde activité importante du bassin qui est l'exploitation de bois. En effet, les produits utilisés dans le traitement du bois se retrouvent certes en faible quantité dans les cours d'eau mais sans doute suffisantes pour entraîner des dommages sur la faune aquatique (Adam, 2008).

Les barrages sont particulièrement fréquents sur la Haute et Moyenne vallée de la Loue avec 37 barrages recensés alors qu'ils ne sont que 4 sur la Basse vallée, ainsi 32% du linéaire de la partie amont de la vallée de la Loue est sous l'influence de la retenue de ces barrages (Malavoi, 2006). Ces barrages sont utilisés à des fins de production hydro-électrique (EDF et exploitants privés). A cela s'ajoute la présence de 23 seuils dont l'objectif est la stabilisation des fonds du lit. Ces barrages et ces seuils entraînent l'accumulation en amont de ces ouvrages de fines particules qui peuvent colmater les fonds sur des distances non négligeables et créer une source potentielle de fines lors de très forte crue ou lors de la destruction d'un de ces ouvrages.

III. MATERIELS ET METHODES

III.1. Choix des stations

Les stations ont été choisies dans l'objectif de comparer deux stations présentant un écart important dans la diversité de leurs habitats, avec une station caractérisée par une diversité importante d'habitats et une seconde caractérisée par des substrats colmatés par des concrétions calcaire, des algues et/ou des fines. Nous avons voulu faire cette comparaison dans deux secteurs éloignés sur la Loue, afin de mettre éventuellement en évidence des caractéristiques liées à la physico chimie, à l'hydrologie ou encore au régime thermique.

Pour ces raisons, nous avons travaillé sur 4 stations dont 2 stations situées au niveau de la Piquette à environ 35 km de la source et 2 stations au niveau de Cessey situées à environ 60 km de la source (figure 2.3).

Au niveau de Cessey, la station, nommée Cessey colmatée, correspond à la station dont les substrats/support sont les plus colmatés. La station, Cessey diversifiée, est caractérisée par des habitats plus diversifiés.

Au niveau de la Piquette, de la même façon, la station Piquette colmatée correspond à la station colmatée alors que la station Piquette diversifiée est celle présentant des habitats diversifiés.

III.1.1 Stations situées à Cessey

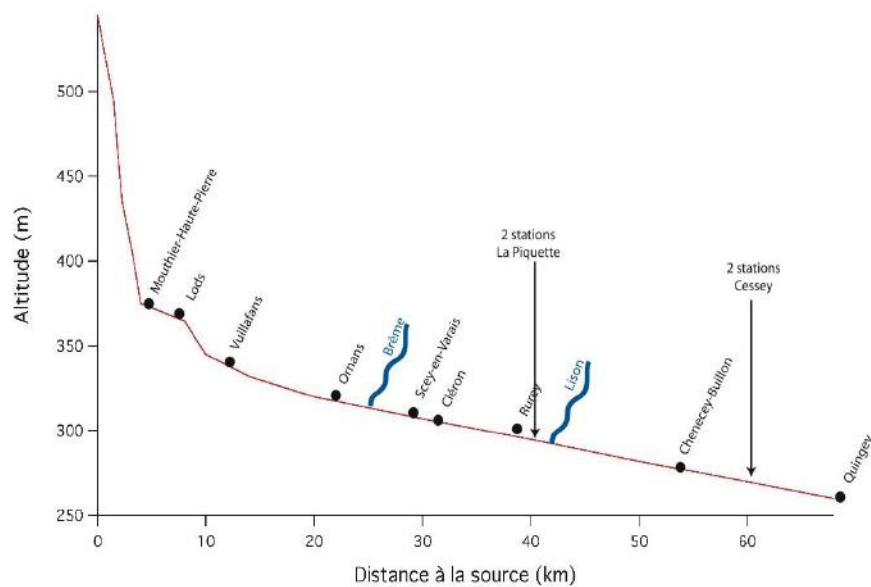
Les stations positionnés à Cessey sont situées à environ 60 km de la source de la Loue. La pente et la largeur moyenne sur ces stations sont respectivement d'environ 1.3‰ et d'environ 60m. Le secteur de la Loue considéré est d'ordre 3 d'après la méthode de Stahler (1952). Selon la zonation de l'Illies et Botosaneanu (1963), ce secteur du cours d'eau appartient à l'hyporithron. Le niveau typologique théorique estimé sur ces deux stations d'après le calcul proposé par Verneaux (1977) est B6 (tableau 2.1). Les températures indiquées dans ce tableau et permettant de calculer le niveau typologique théorique ont été obtenu en installant des sondes thermique sur les 4 stations de début juin à fin aout. Ces valeurs correspondent à la moyenne des températures maximales des 30 jours consécutifs les plus chauds.

Le lit de la Loue au niveau de la station colmatée est en grande majorité recouvert par un dépôt de calcites qui colmate les substrats sur plus de la moitié gauche du chenal de la station. La petite moitié droite du chenal est composé de galets graviers. Le tuf est par endroits recouverts par des hydrophytes composé d'algues, de bryophytes et de spermaphytes. La station diversifiée présente des habitats plus diversifiés avec des zones colmatées par les tufs ou par les algues bien moindres que la station colmatée. Une description plus précise sera donnée par la cartographie des stations selon le protocole IAM.

Comme il n'existe pas de station hydrologique sur ces stations, nous nous référons dans la suite au débit indiqué par la station hydrologique de la DREAL située à Chenecey-Buillon. En effet, ces stations n'étant situées qu'à quelques kilomètres de la station hydrologique de Chenecey-Buillon et en raison de l'absence d'affluents importants entre nos deux stations et la station de Chenecey-buillon, nous considérons donc dans la suite que le débit à Cessey doit être assez comparable à celui de Chenecey-Buillon.



(a)



(b)

Figure 3.1: (a) Situation géographique des stations (b) Profil longitudinal de la Loue de sa source à Quingey.

III.1.2. Stations situées à la Piquette

Les deux stations situées à la Piquette sont à environ 35 km de la source. La pente et la largeur moyenne sur ces stations sont respectivement d'environ 1.3‰ et de 40m. Comme pour les stations situées à Cessey, ce secteur de la Loue est d'ordre 3 d'après la méthode de Stahler (1952). Selon la zonation de l'Illies et Botosaneanu (1963), ce secteur du cours d'eau appartient à l'hyporithron. Les niveaux typologiques théoriques sur ces deux stations sont B5+ (tableau 2.1).

Comme précédemment, en raison de l'absence de station hydrologique sources stations, afin de caractériser l'hydrologie sur ces deux stations, nous nous sommes référés au débit de Chenecey-Buillon auquel nous avons soustrait le débit du Lison à MYON.

	Pente (%)	Do (km)	T (°C)	D (mg/L)	Largeur lit (m)	Section mouillée (m ²)	Niveau typologique 2005	
Station								
Cessey diversifiée	1	60	20,4	100	59	40	6,02	B6
Cessey colmatée	1	58	20,2	100	56	45	6,06	B6
Piquette diversifiée	1,1	41	18,5	100	49	29	5,40	B5+
Piquette colmatée	1,1	40	18,5	100	41	31	5,58	B5+

Tableau 3.1: Niveaux typologiques théoriques sur nos 4 stations sur la Loue. La dureté (D) est une valeur moyenne obtenue à partir de données de plusieurs sources (SAINT-OLYMPE, 2005 ; Diren franche comté, 2000 ; Syndicat mixte de la Loue, 1999).

III.2. Cartographie habitationnelle selon le protocole IAM

La méthode de la cartographie habitationnelle est basée sur la qualité des mosaïques d'habitats (vitesse, hauteur d'eau et support/substrats) pour le peuplement piscicole. Cette méthode a été mise au point par la DR5 du CSP (1993-1997) puis finalisée par Teleos (1999-2003). Cette approche permet de comparer l'hétérogénéité et l'attractivité biogène des cours d'eau à l'échelle de la station. La démarche consiste à cartographier chacune des composantes de la qualité physique de la station (vitesse de courant, hauteur d'eau et substrats/supports) et de considérer les combinaisons entre ces composantes. Les limites de classes d'hétérogénéités pour chacune de ces composantes ont été estimées statistiquement. Par cette méthode, l'hétérogénéité et l'attractivité pour le peuplement piscicole est estimées globalement pour la station, et non pas reconstitué par l'ensemble des micro-habitats (placettes par placettes).

La méthode de cartographie selon le protocole IAM consiste à tracer plusieurs transects le long de la station et de relever le long de ce transect les différentes vitesses de courant, hauteurs d'eau et substrats/supports. A partir de ce relevé sur l'ensemble de la station, la cartographie des différentes zones de hauteur d'eau peut être réalisée ainsi que celle des vitesses de courants. Chaque zone correspond à une classe de hauteur d'eau ou de vitesse de courant qui à partir de la répartition spatiale instantanée des poissons enregistrée sur une centaine de stations (60 cours d'eau, MORILLAS 1994).

En ce qui concerne les substrats minéraux basés sur la granulométrie et les supports (végétation, caches, etc.), la cartographie consiste à découper la station en placettes de substrats/supports homogènes. De la même manière, l'attractivité de ces substrats/supports a été déterminée statistiquement. En présence de plusieurs substrats/supports sur la même placette, ce sera le substrat ou le support le plus attractif pour l'ichtyofaune qui sera cartographié. En raison de l'objectif de l'étude, nous avons affiné la description des substrats par rapport à la méthode de l'IAM en distinguant les nassis des tufs avec anfractuosités et des tufs sans anfractuosités et en y associant respectivement les attractivités de 60, 30 et 10.

La superposition de ces trois niveaux d'informations permet de superposer les différentes zones et ainsi de cartographier les différents pôles d'attraction pour le poisson. Ces zones permettent d'expliquer la répartition dynamique du poisson à l'échelle des habitats de la station.

Enfin, la mesure de l'hétérogénéité de la station est estimée à partir du comptage des différentes catégories de descripteurs et de leurs surfaces relatives. Le degré d'hospitalité de la station est déterminé à partir de la pondération de la représentativité de chaque pôle par son coefficient d'attractivité.

Afin de comparer les stations les unes aux autres, les mesures sont réalisées en été durant l'étiage moyen. Sur le terrain, les vitesses et les hauteurs d'eau sont mesurées et repérées sur des transects à l'aide d'une jauge graduée, d'un courantmètre et de cordes graduées.

III.3. Problématique des fines

L'apport de fines dans la Loue a plusieurs conséquences sur le cours d'eau. Son étude met en perspective deux problématiques.

D'une part cet apport est susceptible d'être une source en nutriment et contaminants au cours d'eau. Ces sédiments fins proviennent en grande partie de l'érosion des sols des bassins versant. Dans un contexte agricole et urbain, telle que la vallée de la Loue, les sols de ce bassin versant sont soumis à un apport en nutriments et en contaminants (PCB, HAP, métaux lourds, etc.). Or, ces sédiments fins, en raison de leur surface spécifique importante, sont susceptibles d'adsorber ces éléments. Lors de fortes crues, les sols sont lessivés et les sédiments fins sont alors entraînés vers la Loue.

L'apport de sédiments fins dans la Loue peut donc avoir des conséquences sur la qualité physico chimique de la Loue.

D'autre part, les sédiments composant le lit de ce cours d'eau sont dominés par les graviers. Un apport en sédiments plus fins que ceux composant le lit du cours d'eau peut donc s'infiltrer entre les sédiments du lit et entraîner un colmatage, notamment des zones de frayères.

La problématique concernant l'apport de fines dans la Loue nécessite d'étudier la dynamique des flux de fines et d'analyser les éléments chimiques apportés par ces fines dans la Loue. Cette campagne de mesure s'est déroulée du 30/05/2011 au 29/08/2011.

III.3.1. Mesure du flux de MES

La charge de fines est principalement transportée en suspension dans l'écoulement. La mesure du flux de fines à travers une section mouillée (S) du cours d'eau au temps t est déterminée à partir de la mesure de la concentration de matière en suspension (C_f) au temps t et du débit instantané au temps t du cours d'eau (Q) à travers la section (S):

$$q_s = C_f \cdot Q \quad (1)$$

où q_s est le flux de fines en g/s.

Mesure de la concentration de MES

La méthode consiste à prélever 50L d'eau contenant les matières en suspension (MES) dans l'écoulement.

Cette eau est filtrée sur le terrain grâce à un filtreur à pression (figure 2.3). Ce dispositif est composé d'un réservoir dans lequel on verse l'eau et les MES, de l'azote sous pression est alors inséré dans ce réservoir ce qui permet de faire circuler sous pression cet échantillon d'eau dans un tube puis à travers un filtre dont les pores sont de 0.22 mm de diamètre. Avant utilisation, le filtre est préalablement séché durant 24 h dans une étuve à 40°C et pesé. Lorsque les 50L de l'échantillon sont filtrés, nous récupérons le filtre sur lequel les particules fines de diamètre supérieur à 0.22 mm ont été retenues. Ces filtres sont mis à nouveau à l'étuve durant 24h, les filtres et les MES retenus sont alors pesés. La différence entre la masse des filtres secs avant le filtrage et la masse des filtres après filtrage permet d'en déduire la masse de matières solides en suspension contenu dans les 50L de l'échantillon.

Ces mesures de la concentration en MES seront doublés par des mesures réalisées par le laboratoire de Chimie des Eaux de Besançon (LCE) sur des prélèvements d'eau de 2L.

Afin de déterminer la concentration en MES dans les eaux de la Loue sur les 4 stations, nous avons prélevé des échantillons toutes les 3 à 4 semaines entre mai et août 2011, ce

qui correspond à 3 campagnes de mesures. A cela s'ajoute des mesures de la concentration en MES durant deux phases orageuses, de manière à suivre un épisode de montée et de descente des eaux.

III.3.2. Analyse chimique des MES

Afin de déterminer les éléments adsorbés par les fines transportées dans l'écoulement, nous avons disposé des pièges à sédiments sur les 4 stations. En effet, de telles analyses nécessitent de disposer d'une quantité suffisante de MES (au minimum 1 g). Ces quantités n'étant pas obtenues lors du filtrage par pression des MES dans les prélèvements d'eau, nous avons donc installé 3 pièges à matières en suspension par station dans différents faciès du chenal (zone de moyen courant, faible courant et courant nulle). Ces pièges sont installés en permanence pendant la campagne de mesures et sont récupérés toutes les 3-4 semaines (3 campagnes au total).

Les pièges à matières en suspension sont des tubes de 5cm de diamètre et de 50cm de long maintenus à la verticale dans la colonne d'eau grâce à des fers à béton (figure 2.4). Les dimensions des tubes ont été choisies de telle manière que le rapport d'aspect (longueur du tube/diamètre) soit supérieur ou égale à 10, rapport d'aspect qui a été estimé à récolter un maximum de MES (Bloesch, 1979).

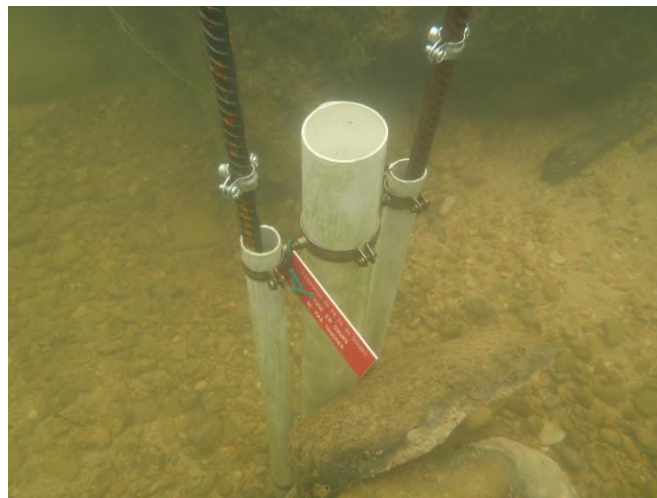


Figure 3.2: Photo d'un piège à matières en suspension installé à la verticale de l'écoulement dans la Loue.

Les MES récoltées dans les trois pièges de la même station sont rassemblées dans le même échantillon. Les 4 échantillons ainsi récoltés sont analysés au Laboratoire de Chimie des Eaux de Besançon (LCE).

Les analyses faites sur ces sédiments sont les suivantes :

- Azote Kjeldhal (par titrimétrie : NF en 25663)
- Phosphore total (par Ganimède : NF en ISO 6878)
- Matières organiques et matières minérales (par gravimétrie : NF en 12879)

- COT (par oxymétrie : NF en ISO 14235)

Une série d'analyse complémentaire a été réalisée sur une des campagnes et a consisté à analyser certains micropolluants :

- HAP (par chromatographie en NF en ISO 13877)
- PCB (par chromatographie en NF en XP X30-453)
- Métaux lourds (par ICP-OES en NF en ISO 11885)

III.3.3. Analyses des eaux

Pour chacune des 3 campagnes ainsi que lors du suivi des deux épisodes de crues, des prélèvements d'eaux ont été réalisés sur la station de Cessey diversifiée et sur celle de la Piquette diversifiée, afin de caractériser la physico-chimie de la Loue dans ces secteurs. Nous avons considéré que la physico-chimie entre les stations colmatées et diversifiées du même secteur est relativement similaire puisque ces deux stations ne sont situées qu'à quelques centaines de mètre l'une de l'autre et qu'aucun affluent n'est situé entre elles.

Les analyses sur ces échantillons d'eaux, réalisées par le LCE, ont consisté à mesurer :

- Azote ammoniacal
- Azote Kjeldhal (par titrimétrie : NF en 25663)
- Nitrites (par photospectrométrie : NF en 26777)
- Nitrates (par chromatographie chronique : NF en ISO 10304-1)
- Phosphore total + PO_4^{3-} (par ganimède : NF en ISO 6878)
- COD (par spectrophotométrie : NF en 1484)
- DCO ou oxydabilité (par spectrophotométrie : ISO 15705)
- DBO
- Matières en suspension totales

III.3.4. Analyses chimiques des sédiments fins du lit

Afin de déterminer les éléments retenus (nutriments, toxiques, etc.) par les sédiments du lit, ces derniers sont prélevés dans des régions du lit où ils sont les plus fins (vases, sables). En effet, les sédiments fins, du fait de la présence d'un site d'échange plus importants, sont susceptibles d'adsorber de plus grande quantité de nutriment, HAP, PCB, métaux lourds, etc. Les analyses sur ces sédiments seront réalisées au LCE et sont les suivantes :

- Azote total
- Phosphore total
- Matières organiques et matières minérales
- COT et carbone total
- HAP
- PCB

- Métaux lourds

III.4. Problématique des concrétions calcaires (tufs)

Afin d'étudier la microstructure des différents tufs, des analyses cristallographiques par Diffraction de Rayons X (DRX) seront réalisées par Myriam Euvrard (Laboratoire de Chrono-Environnement, Université de Franche Comté) sur ces différents types de tufs:

- Nassis
- Tufs expansés
- Tufs lisses

III.5. Conséquence sur le compartiment biologique

III.5.1 Peuplement macrobenthique

Les macroinvertébrés benthiques correspondent à l'ensemble des métazoaires invertébrés ayant une taille supérieure à 500 μm (jusqu'à 250 μm pour certains macroinvertébrés lacustres). Ils vivent dans une large gamme de substrats dans les écosystèmes aquatiques. Puisque que les macroinvertébrés sont susceptibles de coloniser tout type de substrats et qu'ils sont très diversifiés, ils sont donc de bons indicateurs de la qualité des habitats. D'autre part, cette faune est peu mobile et lors d'une perturbation ponctuelle, leur recolonisation est lente. Elle permet donc de prendre en compte une intégration spatiale et temporelle de la qualité des différents habitats et de qualité des eaux.

Une méthode d'échantillonnage a été conçue en 1994 au laboratoire d'hydrobiologie de la faculté des Sciences de Besançon (Bacchi, 1994 ; Parmentier 1994) et finalisée par Teleos en 2000 (Teleos 2000). Elle consiste à prélever les macroinvertébrés dans différents habitats en prenant en considération à la fois le type de substrat, la vitesse du courant et la hauteur d'eau.

Le protocole consiste d'abord à délimiter la zone d'étude (la longueur de la zone d'étude doit faire à peu près 2 fois sa largeur) en intégrant un plat et un radier. Ensuite, il faut repérer les différents substrats, différentes vitesses de courant et hauteurs d'eau présents. Chaque substrat doit être échantillonné au moins une fois dans la classe de vitesse et de hauteurs d'eau où il est le plus présent. Les prélèvements sont réalisés au filet Sürber de 1/20 m^2 avec une maille de 500 μm et sont fixés au nombre de 20 prélèvements.

Afin de comparer le peuplement de macroinvertébrés en fonction des microhabitats, nous avons choisi d'étendre la méthode à 40 prélèvements dans chaque station. Les 20 prélèvements supplémentaires sont choisis prioritairement sur les substrats/supports colmatés.

Les prélèvements fixés à l'aide d'alcool sont tamisés avec un tamis de 250 µm et puis triés et examinés à la loupe binoculaire. Les macroinvertébrés sont déterminés à la famille, au genre ou à l'espèce, cette détermination dépend de ce que permet la taxonomie larvaire. Il est évident que plus on va loin dans la détermination, plus l'information sur la qualité des habitats de notre site d'étude sera précise.

Il est important de noter que l'échantillonnage a été effectué entre le 26/04/2011 et le 29/04/2011. L'émergence de certaines espèces (Trichoptère, coléoptères, Odonates, etc.) peut avoir eu lieu plus tôt dans la saison, ce qui ne doit pas être omis dans l'analyse des résultats.

À partir de cet échantillonnage faunistique, nous avons établi le diagnostic écologique des stations, en calculant notamment différents indices (IBGN et Cb2) permettant d'évaluer la qualité biologique et écologique de la zone d'étude et de comparer les stations les unes aux autres. Mais surtout, nous avons pu comparer l'échantillonnage faunistique inter et intra stations par type d'habitat.

Indice Biologique Global Normalisé (I.B.G.N.)

L'Indice Biologique Global Normalisé (AFNOR NF TG 90-350), établi par Verneau et *al.* (1982), est basé sur l'examen de la polluo-sensibilité des macroinvertébrés benthiques (s'applique uniquement aux cours d'eau de petites et moyennes dimensions). Cet indice permet donc d'évaluer l'incidence d'une perturbation sur le milieu récepteur.

Cet indice est défini par une note indicielle comprise entre 0 (qualité médiocre) et 20 (très bonne qualité) qui est calculé à partir du tableau (AFNOR, 1992). Ce tableau représente en abscisse 12 classes de variétés taxonomiques. Chacune de ces classes correspond à une gamme de nombre total de taxons récoltés même s'ils ne sont représentés que par un seul individu. L'ordonnée du tableau correspond à 9 groupes faunistiques indicateur (GI) où le groupe 9 est celui dans lequel les taxons sont les plus sensibles à la pollution. La note IBGN peut donc être calculée par la relation suivante :

$$\text{IBGN} = \text{GI} + (\text{classe de variété}) - 1$$

où GI est défini en ne prenant en compte que les taxons indicateurs représentés par au moins trois individus ou 10 individus selon les taxons.

En l'absence significative de taxons indicateurs (3 ou 10 individus), la note IBGN est égale à 0.

Coefficient d'aptitude biogène (Cb2)

Le Cb2, établi également par Verneaux (1982), permet d'apprécier l'aptitude biogène d'un site d'eau courante à partir de l'analyse de la macrofaune benthique, selon un protocole standard (protocole MAG 12 dans cette étude). Le Cb2 est noté entre 0 et 20 et résulte de la somme de deux indices :

$$\text{Cb2} = \text{Iv} + \text{In}$$

où Iv (indice de variété taxonomique) évalue la part du peuplement macrobenthique influencée par la qualité de l'habitat alors que In (indice nature de la faune) évalue celle influencée par la qualité de l'eau.

$$I_v = 0,22 * N$$

avec N : nombre de taxons répertoriés appartenant à la liste des taxons utilisés pour le Cb2

$$I_n = 1,21 \times \frac{\sum_1^k i_{\max}}{k}$$

où i_{\max} est l'indice de sensibilité des taxons les plus sensibles présents dans la liste faunistique et $k=n/4$ avec n le nombre de taxons indicateurs présents dans la liste faunistique avec une densité supérieure ou égale à trois individus.

III.5.2. Peuplement piscicole

De la même manière, nous avons cherché à évaluer le peuplement piscicole en fonction des micro-habitats de la station. Dans cet objectif, la méthode a consisté à pêcher par habitats dans les 4 stations, les différents habitats étant définis par la vitesse du courant, la hauteur d'eau et le substrat/support.

Afin d'échantillonner ces mosaïques d'habitat, nous avons choisi d'utiliser un « cadre à projection ». Cette technique, mis au point par Morillas (1994), consiste en une armature parallépipédique en aluminium de surface au sol de 0.8*0.8 m, entouré d'un filet à maille de 3 mm de diamètre. Sa hauteur est modulable de 0.5 à 1.5 m. Ce cadre est projeté le plus loin possible de façon à isoler un site présélectionné et de pêcher électriquement à l'intérieur de façon exhaustive. Cette technique, appelé CAPPE (Cadre A Projection Prospecté Par Electricité) est adapté pour la prospection des petites espèces de fond et ne convient naturellement pas pour les espèces de pleine eau qui fuient trop rapidement.

La stratégie d'échantillonnage a alors consisté en un échantillonnage stratifié en procédant préalablement à un repérage des différents pôles d'attraction à partir de la méthode IAM. Pour chaque pêche, nous avons alors noté l'espèce et la classe d'âge (O+, juvénile et adulte).

Dans un objectif de traitement statistique des données, nous avons procédé à un échantillonnage d'au moins 60 placettes par station.

IV. RESULTATS

IV.1 Cartographie habitationnelle des stations

Les relevés de terrain ont été effectués selon le protocole IAM entre le 27 et le 30 juin pour les trois stations : les deux stations situées à Cessey et la station Piquette colmatée. Nous n'avons pas pu réaliser dans cette période le relevé sur la dernière station en raison de plusieurs épisodes orageux qui nous ont obligé à effectuer cette mesure le 11 août. Ces cartographies ont donc été réalisées lorsque le débit de la Loue à Chenecey était proche de son débit d'étiage QMNA5 de $6.60 \text{ m}^3/\text{s}$. En effet, le débit à Chenecey a été de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ entre le 27 et le 30 juin et de $12 \text{ m}^3/\text{s}$ le 11 août.

Sur l'ensemble des quatre stations, les indices obtenus montrent un déficit de la qualité physique de ces stations (tableau 4.1). Les notes IAM s'échelonnent entre 4000 et 10000 alors que sur ces stations, elles devraient avoisiner autour de 14000. Cette mauvaise qualité peut en partie être expliquée par la quasi absence de sous berges et de ripisylve connective sur ces 4 stations. De plus, les substrats comme les galets et les mélanges gravier/galet sont souvent recouverts par des concrétions calcaires ou colmatés par des développements algaux durant la période des relevés de terrain. Ces colmatages réduisent l'attractivité de ces substrats envers la faune piscicole surtout lorsque les concrétions calcaires forment des dalles tufeuse sans anfractuosités. Cependant, en ce qui concerne le colmatage par les algues, nous avons choisi de ne pas le prendre en compte dans le calcul de l'indice IAM en raison du décalage de la période de relevé entre la station Piquette colmatée et Piquette diversifiée. En effet, la prolifération algale a fortement augmenté entre le 30 juin et le 11 août. Le colmatage par les concrétions calcaires est quant à lui prise en compte dans le calcul de la note.

En dépit de ces observations, il existe une réelle différence entre la qualité physique des stations colmatées et diversifiées sur les deux secteurs Cessey et La Piquette, notamment mise en exergue par les notes IAM. La variété des supports/ substrats est plus importante sur les stations diversifiées que sur celle colmatées dans les deux secteurs. De plus, la proportion de substrats/supports colmatés par les proliférations algales, les concrétions calcaires et les fines sont plus élevées sur les stations colmatées par rapport aux stations diversifiées. Enfin, les mosaïques d'écoulement sur les stations colmatées sont plus homogènes que sur les stations diversifiées.

Ces nombreuses observations ont pour conséquence une augmentation du nombre de pôles d'attraction sur les stations diversifiées par rapport aux stations colmatées.

	Cessey colmatée		Cessey diversifiée		Piquette colmatée		Piquette diversifiée	
Longueur (m)	219		194		132		294	
Largeur moyenne (m)	56		59		41		49	
Surface (m2)	13015,3		11279		6081		15680	
substrat	recouvrement (%)		recouvrement (%)		recouvrement (%)		recouvrement (%)	
	non colmatés	colmatés	non colmatés	colmatés	non colmatés	colmatés	non colmatés	colmatés
branchage, grosses racines (bra)	0,4		0,6		1		1,2	
sous-berges (ber)	0,2		0,2		0,14		0,08	
hydrophytes (hyi)	8		4,6		1,2		8,1	
blocs avec caches (blo)	2,3	1,9 (fines)	1,9		4,2		10	
galets (gal)	0,4		12,9	18,5 (algues)	5,7	10,3 (algues)	0,5	10,5 (algues)
galets pavés (tufés) (gls)	4,7						6,2	
hélophytes (hel)			1		0,3		0,6	
chevelu racinaire, végétations rases (chv)	1,5	16,9 (algues)	3,5		0,04		2,4	3 (algues)
galets et graviers mélangés (ggr)	26,6		41,3		19,8		18,4	8,7 (algues)
graviers (gra)	0,4		1,2				0,5	
nassis (nassis)			0,7				1,8	
tufs avec anfractuosités (bls)	1,6		11,2		3,9		1,5	
tuf sans anfractuosités (tuf)		31,8 (algues)				51,7 (algues)		26,2 (algues)
litières organiques (lit)			0,05					
sables (sab)	0,1		0,3				0,09	
éléments fins, limons (fin)	0,5		1,4				0,03	
fonds nus organique, vases (fno)	0,7		0,5		0,3		0,1	
dalles, surfaces indurés (dal)	2,3		0,09		1,3			
hauteur								
< 5 cm	1		2,7		2,1		2,4	
6 à 20 cm	4,8		5,6		2,1		5,8	
21 à 70 cm	8,8		68,4		21,3		76	
71 à 150 cm	82,3		27,6		67		15,7	
> 151 cm	3,1				7,5			
vitesse								
< 10 cm	9,2		28,9		30,2		12,8	
11 à 40 cm	89,7		55,8		65,8		38,4	
41 à 80 cm	1,1		16,3		4		31,2	
81 à 150 cm			3				14,7	
> 151 cm			0,3				2,8	
Pôles d'attraction	47		77		36		87	
IAM	4575		9783		3986		7329	
IAM de référence	14030		14030		13550		13790	

Tableau 4.1: Description de la qualité physique sur les 4 stations.

IV.2. Apports de fines au cours d'eau

IV.2.1. Flux de fines

La filtration sous pression des MES contenus dans les eaux a été réalisée uniquement lors de la première campagne, le 30 mai 2011 sur les 4 stations. Nous avons filtré une dizaine de litre de ces eaux prélevées sur un filtre de diamètre de pores de $0.22\mu\text{m}$. Après une dizaine de litre, le filtre est totalement colmaté. La mesure a été réalisée deux fois par station. Le colmatage des filtres pourrait s'expliquer par la présence d'une quantité importante de colloïdes (diamètre inférieur à $0.43\ \mu\text{m}$). En effet, ces colloïdes en se coinçant dans les pores des filtres seraient susceptibles de les colmater rapidement.

Les résultats que nous avons obtenus grâce à ce dispositif ne sont pas en accord avec ceux réalisés par le Laboratoire de Chimie des Eaux de Besançon (LCE). Nous trouvons des valeurs de concentration de MES plus élevées que celle mesurées par le laboratoire. Ces valeurs plus élevées pourraient s'expliquer par la différence de diamètre des pores utilisé entre les deux méthodes. Le diamètre des pores des filtres, de $0.43\ \mu\text{m}$, utilisés par le LCE est supérieur à celui que nous avons utilisé de $0.22\ \mu\text{m}$. Ainsi, la mesure obtenue par le LCE ne prendrait pas en compte les colloïdes.

Cependant, cette première explication ne doit pas omettre le fait qu'il est possible que cette différence puisse être due aux incertitudes dans les mesures. Une manière de trancher entre ces deux explications aurait été de disposer de filtre de même porosité que ceux utilisés par le LCE. Cependant, nous n'avons pas été en mesure de disposer de ces filtres.

Les résultats des concentrations en MES obtenus sur les trois campagnes de mesures ainsi que les prélèvements réalisés lors de deux épisodes orageux sont représentés sur la figure 4.1. Ces prélèvements ont eu lieu :

- 30 mai : lors de la récupération des MES dans les pièges, période d'étéage.
- 8 juin : réalisé lors d'un pic de crue après une longue période sans précipitation.
- 22 juin : lors de la récupération des MES dans les pièges, période d'étéage.
- 18 et 20 juillet en début et fin de décrue après un évènement orageux.
- 02 août : lors de la récupération des MES dans les pièges, période d'étéage.

Ces résultats indiquent une variation importante du flux de fines entre les périodes d'étéage et les épisodes orageux (figure 4.2). L'apport de fines dans la Loue semble donc se faire essentiellement durant les épisodes orageux. Le flux de fines est multiplié par 1000 durant ces épisodes par rapport au période d'étéage.

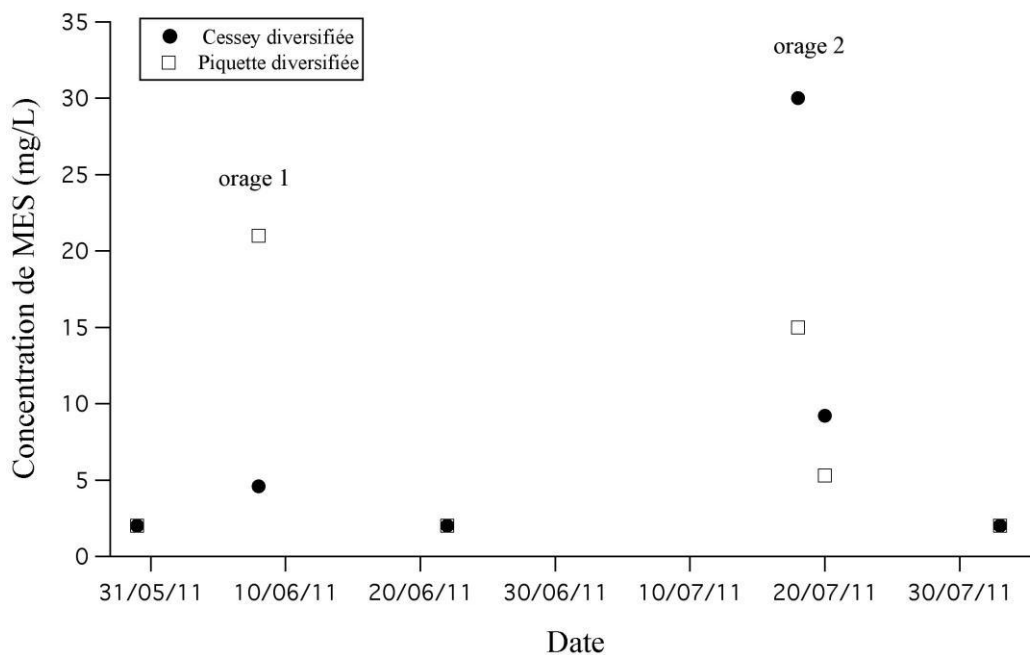


Figure 4.1: Evolution des concentrations des matières en suspension sur les stations de Cessey diversifiée et Piquette diversifiée entre le 30 mai et le 02 août 2011.

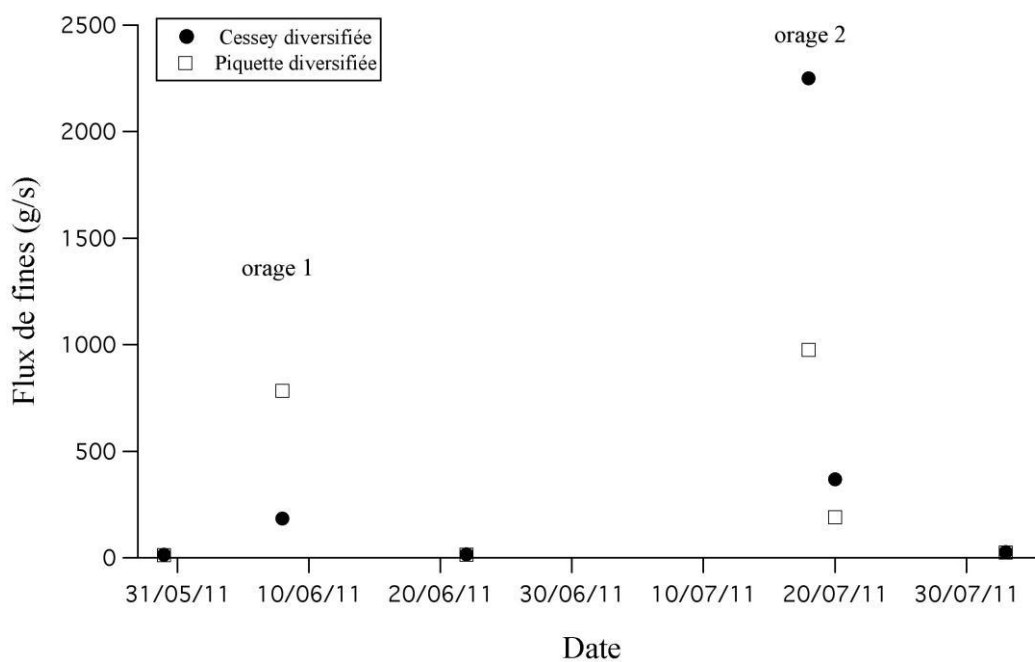


Figure 4.2: Evolution du flux de fines sur les stations de Cessey diversifiée et Piquette diversifiée entre le 30 mai et le 02 août 2011.

IV.2.2 Conséquences sur la physico-chimie de la Loue

IV.2.2.1 Analyses sur les matières en suspension (MES)

Les sédiments piégés dans les tubes installés dans la Loue durant environ trois semaines consécutives ont été prélevés à trois reprises le 30 mai, le 22 juin et le 2 août. Lors de la première campagne, le cours d'eau était en étiage et aucune précipitation significative n'est tombée durant ces trois semaines alors que les deux campagnes suivantes sont caractérisées par plusieurs événements orageux qui ont significativement fait augmenter la proportion de MES dans la Loue. Les résultats des analyses réalisées sur ces MES sont indiqués dans le tableau 4.2.

Le pourcentage représenté par la matière organique sur l'ensemble des matières en suspension récoltées dans les pièges à sédiments est particulièrement important sur les 4 stations et encore plus dans le secteur de la Piquette.

Le phosphore total mesuré dans les MES correspond au phosphore soit incorporé dans des structures minérales ou organiques, soit adsorbé sur les sédiments. Les valeurs élevées de phosphore mesurées révèlent que les MES sont une source non négligeable de phosphore au milieu aquatique par désorption ou encore par les activités microbiennes libérant des ortho phosphates dans le milieu (Marxsen & Schmidt, 1993). Le secteur de la Piquette présente des taux de phosphore légèrement plus élevés que ceux enregistrés sur le secteur de Cessey, sans toutefois d'écart significatif d'après le test statistique de Kruskal-Wallis ($p > 0.05$). Le taux de phosphore apporté par les fines diminue de manière importante entre mai et août (entre les 3 campagnes), notamment une baisse très importante de la quantité de phosphore dans les MES est observée en août sur la station de la Piquette colmatée (figure 4.3).

Les informations qui proposent des classes de valeurs définissant un « bon état écologique » sont rares dans la littérature. La province de l'Ontario au Canada a proposé, à partir d'étude portant sur les effets de la qualité des sédiments sur les organismes benthiques, la valeur seuil de 2000 mg/kg pour le phosphore total mesuré dans les sédiments au-dessus de laquelle les sédiments sont considérés comme pollués et affectant la santé des organismes vivant dans ces sédiments (Persaud et al., 1993). Or, les valeurs de phosphore que nous avons mesuré dépassent souvent cette valeur.

L'azote Kjeldhal mesurée dans les MES est aussi en quantité assez élevée mais reste en dessous de la valeur seuil de 4800 mg/kg proposée par le guide de l'Ontario comme affectant sévèrement le milieu aquatique. Les fines transportées par le cours d'eau sont un apport important en azote au cours d'eau et joue un rôle clé dans le cycle de cet élément dans le milieu aquatique, sachant que cet élément est encore plus facilement échangeable avec le milieu aquatique que le phosphore. La comparaison entre les trois campagnes n'est pas rendu possible du fait que les analyses n'ont pas été réalisées de la même manière. Pour les deux premières campagnes, la faible quantité de MES récoltée a obligé le LCE à analyser ces MES comme des boues liquides alors que pour la dernière campagne, ils ont pu réaliser ces analyses sur la matière sèche, ce qui explique les différentes unités utilisées.

Lors de la campagne du 22 juin, les évènements pluvio-orageux de cette période ont permis un transport plus important de MES dans la rivière et donc une quantité plus élevée de MES ont pu ainsi être récupérée dans les pièges (à peu près 10 fois plus de MES récupéré que lors de la campagne précédente). Des analyses de métaux lourds ont pu donc être réalisées sur ces MES par le Laboratoire de Chimie des Eaux de Besançon. Les concentrations en métaux sont supérieures aux valeurs naturelles en restant toutefois dans la classe de bon état écologique fixée par la DCE. On peut cependant noter une différence entre les deux secteurs avec des valeurs légèrement plus élevées sur le secteur de la Piquette par rapport au secteur de Cessey sans toutefois être significatives (test Kruskal-Wallis, $p > 0.05$).

	30/05/2011			
	Piquette diversifiée	Piquette colmatée	Cessey diversifiée	Cessey colmatée
Paramètres				
COT - Méthode Anne (mg/kg de C)	212	101	122	141
Azote Kjeldahl (mg/L)	25,3	13,4	14,6	18,3
Phosphore (mg/kg de MS)	2430	2340	2120	2060
Matières Sèches (g/L)	1,9	1	1,2	1,5
Matières Organiques (% de MS)	21,9	19,9	16,9	14,6
Matières Minérales (% de MS)	78,1	80,1	83,1	85,4
	22/06/2011			
	Piquette diversifiée	Piquette colmatée	Cessey diversifiée	Cessey colmatée
Paramètres				
COT - Méthode Anne (mg/kg de C)	122	116	71	70,8
Azote Kjeldahl (mg/L)	291	268	253	379
Phosphore (mg/kg de MS)	2550	2190	1450	1580
Matières Sèches (g/L)	17	15	21	27
Matières Organiques (% de MS)	21,3	23,1	16,2	14,4
Matières Minérales (% de MS)	78,7	76,9	83,8	85,6
Métaux lourds				
Cadmium (mg/kg MS)	<1	<1	<1	<1
Nickel (mg/kg MS)	17,7	16,1	11,2	11,9
Zinc (mg/kg MS)	137	114	72,7	88,8
Cuivre (mg/kg MS)	16,4	13,9	9,6	10,4
Plomb (mg/kg MS)	12,6	11,6	10,3	10,9
Arsenic (mg/kg MS)	5	4,6	3,3	3,7
	02/08/2011			
	Piquette diversifiée	Piquette colmatée	Cessey diversifiée	Cessey colmatée
Paramètres				
COT - Méthode Anne (mg/kg de C)	81,5	90,5	86	73,3
Azote Kjeldahl (mg/kg)	975	1150	1180	1060
Phosphore (mg/kg de MS)	1770	610	1100	1230
Matières Sèches (g/L)	150	140	230	190
Matières Organiques (% de MS)	15,2	16,2	10,2	11
Matières Minérales (% de MS)	84,8	83,8	89,8	89

Tableau 4.2: Résultats des analyses réalisées sur les MES prélevées dans les pièges le 30 mai, le 22 juin et le 02 août 2011.

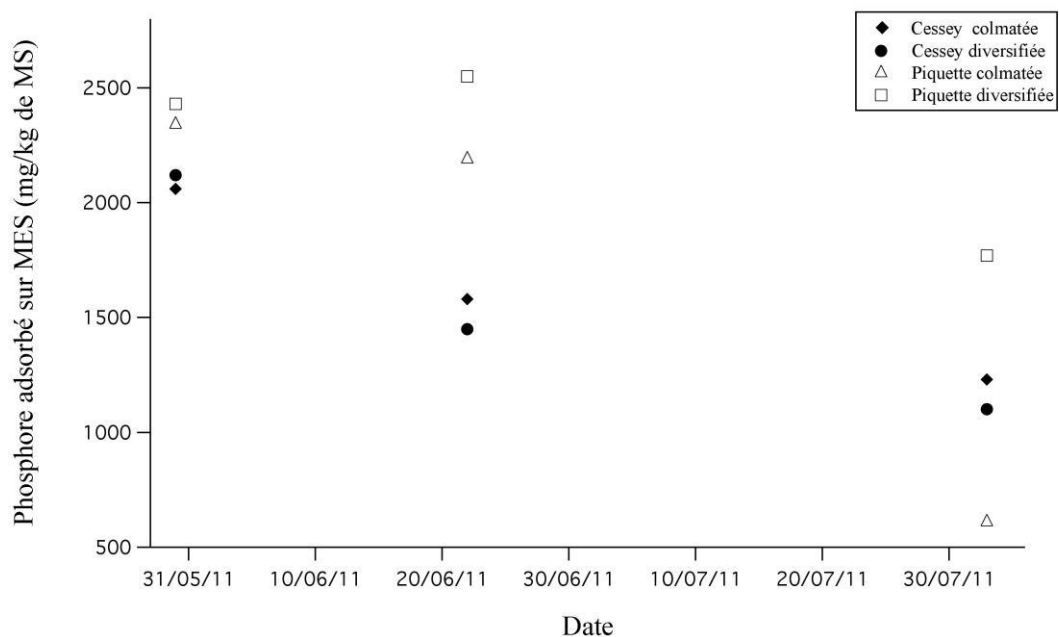


Figure 4.3: Evolution du phosphore dans les MES sur les 4 stations entre le 30 mai et le 02 août 2011.

Les analyses du phosphore total dans les MES ne permettent pas de connaître le rapport entre le phosphore inorganique et organique (IP/OP). Cependant, une étude menée par Owens et Walling (2002) a étudié la valeur de ce rapport dans des rivières dont le bassin versant est dominé par de la pâture et des terres cultivées et a estimé que, dans de telles rivières, ce rapport est compris entre 2 et 2.7. Or, l'intérêt de connaître la valeur de ce rapport réside dans le fait que le phosphore inorganique est plus biodisponible que le phosphore organique. (Stevens et Stewart, 1982 ; Dorich et Nelson, 1984 in Owens et Walling, 2002).

IV.2.2.2 Analyses sur les sédiments du lit

Les analyses sur les particules fines prélevées dans le lit de la Loue sur les 4 stations indiquent que les quantités de phosphores total contenues dans les sédiments du lit sont bien plus faibles (environ 4 fois plus faible) que les quantités mesurées dans les MES (test Kruskal-Wallis : $p < 0.05$) (tableau 4.3). La différence entre ces deux quantités correspond soit à ce qui a été échangé avec le milieu et consommé par le milieu aquatique (bactéries, algues, etc.) ou bien s'explique par la différence de granulométrie ou de pourcentage de matière organique entre les sédiments fins du lit et les MES (Owens et Walling, 2002).

Les résultats sur ses sédiments révèlent aussi la présence de métaux lourds en quantités légèrement supérieures aux valeurs naturelles mais toutefois restant en dessous des seuils fixés par la DCE comme « bon état écologique ».

En ce qui concerne les PCB et HAP, les PCB sont en quantité trop faible pour être détectés par le laboratoire de Chimie des Eaux de Besançon. Les HAP sont quant à eux en quantité très élevée sur les 4 stations, comme le Benzo(a)anthracène qui est très toxique. Les HAP relevés sur les stations situées à la Piquette sont en quantité plus importante que sur les stations situées à Cessey (test Kruskal-Wallis : $p < 0.05$).

	Piquette diversifiée	Piquette colmatée	Cessey diversifiée	Cessey colmatée
Paramètres				
Azote Kjeldahl (mg/kg)	628	760	921	748
Phosphore (mg/kg de MS)	459	493	445	392
COT - Méthode Anne (g/kg de C)	11,5	14,8	17,5	12,3
Matières Sèches (g/kg)	640	680	580	590
Matières Organiques (% de MS)	3,4	3,2	3,7	4,3
Matières Minérales (% de MS)	96,6	96,8	96,3	95,7
Métaux lourds				
Cadmiun (mg/kg MS)	< 1	< 1	< 1	< 1
Nickel (mg/kg MS)	7,9	7,2	7,2	6
Zinc (mg/kg MS)	40,8	41,8	42,2	32,1
Cuivre (mg/kg MS)	5,6	4,7	7	4
Plomb (mg/kg MS)	16,7	7,6	8,5	6,2
Arsenic (mg/kg MS)	4,1	4,4	3,6	5
HAP/PCB				
P.C.B. sur solide (mg/Kg de MS)	<0,11	<0,11	<0,12	<0,12
Fluoranthène (mg/Kg de MS)	0,3	0,17	0,1	0,066
Benzo(k)fluoranthène (mg/Kg de MS)	0,16	0,1	0,062	0,038
Benzo(b)fluoranthène (mg/Kg de MS)	0,048	0,029	0,018	<0,013
Benzo(a)pyrène (mg/Kg de MS)	0,21	0,14	0,087	0,053
Indéno(1,2,3-c,d)pyrène (mg/Kg de MS)	0,1	0,067	0,042	0,027
benzo(g,h,i)pérylène (mg/Kg de MS)	0,079	0,057	0,034	0,024

Tableau 3.3: Résultats des analyses sur les sédiments fins prélevés dans le lit sur les 4 stations de la Loue.

IV.2.2.3 Analyses sur les eaux

Les échantillons d'eau analysés au laboratoire de Chimie des Eaux de Besançon correspondent aux échantillons pour lesquels la concentration en MES a été estimée, les dates de prélèvements sont donc celles décrites dans la section IV.2.1. L'ensemble des résultats est indiqué dans l'annexe 3.

Rapport DCO/DBO5

En ce qui concerne les paramètres relatifs aux matières oxydables (DBO5 et DCO), en prenant en compte uniquement les prélèvements hors crues, le rapport DCO/DBO5

augmente entre mai et août sur les deux stations Piquette diversifiée et Cessey diversifiée avec des valeurs dépassant 5 (figure 4.4). Or, l'équilibre du cycle de la matière oxydable se traduit normalement par un rapport de 3 à 4. Des faibles valeurs de ce rapport signifient que la matière organique dans la rivière est facilement biodégradable. Or, même si ces paramètres indépendants ont des valeurs inférieures au seuil de « bon état écologique » indiqué par la DCE, l'augmentation de ce rapport pourrait se traduire par un éventuel apport de substances peu facilement biodégradables ou de substances inhibant les capacités auto-épuratives de la rivière au cours de l'été.

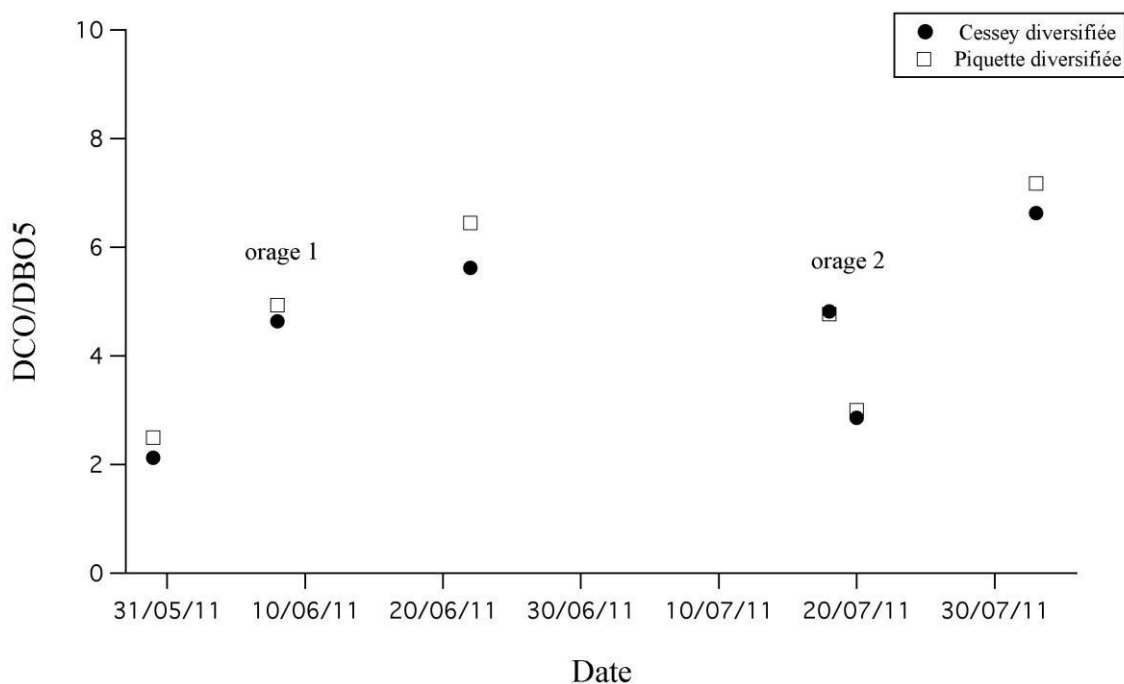


Figure 4.4: Evolution du rapport DCO/DBO5 dans les eaux prélevées sur les stations Piquette diversifiée et Cessey diversifiée entre le 30 mai et le 02 août 2011.

Nutriments

Pour les paramètres relatifs au phosphore et au nitrate, les résultats indiquent une eau peu chargée en phosphate avec une légère augmentation lors des crues mais ne dépassant pas 0.5 mg/L (« bon état » d'après les normes de la DCE). Cependant, d'après les valeurs seuils établis par Nisbet et Verneaux (1970) en se basant sur les normes biologiques, les valeurs en phosphores demeurent excessives pour une rivière salmonicole comme la Loue. En ce qui concerne les nitrates, l'eau de la Loue est relativement riche avec des concentrations >2 mg/L. En période d'étiage, ces valeurs augmentent légèrement au cours de l'été (figure 4.5). Durant les épisodes orageux, les concentrations en nitrates sont jusqu'à 3 fois supérieures aux valeurs mesurées hors épisodes pluvio-orageux pour atteindre des valeurs proches de 10 mg/L. Bien qu'il semble que les concentrations en nitrate enregistrées dans les eaux à la Piquette soient

supérieures à celles enregistrées à Cessey, les tests statistiques affirment qu'il n'existe pas de différences significatives entre les deux secteurs ($p > 0.05$).

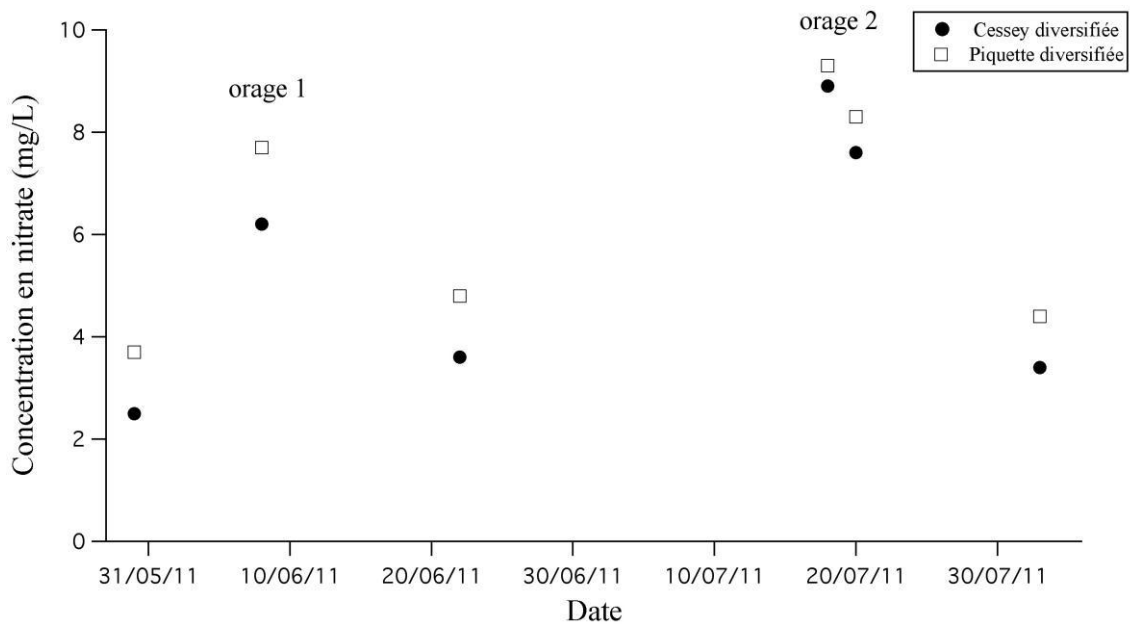


Figure 4.5: Evolution des concentrations de nitrates dans les eaux prélevées sur les stations Piquette diversifiée et Cessey diversifiée entre le 30 mai et le 02 août 2011.

IV.3 Analyse de la microporosité des différents types de concrétions calcaires

Des analyses cristallographiques par diffraction de rayon X (DRX) ont été réalisées par Myriam Euvrard du Laboratoire de l'Université de Franche Comté sur trois différents types de concrétions calcaires : sur un nassis situé à la Piquette diversifiée et un nassis situé à Cessey diversifiée, sur un tuf expansé situé sur la station Piquette colmatée et une dalle tufeuse située sur la station Cessey colmatée. Dans tous les échantillons, la variété cristalline majoritairement présente est la calcite.

L'analyse de la taille moyenne des cristallites indique des variations importantes suivant les échantillons (annexe 7):

- Tuf expansé sur la station Piquette colmatée: 282 nm
- Nassis sur station Cessey diversifiée: 184 nm
- Nassis sur la station Piquette diversifiée: 216 nm
- Tufs lisses sur la station Cessey colmatée: 110 nm

Ces résultats confirment qu'il existe bien une différence de structure, comme nous pouvons l'observer à l'échelle macroscopique, entre les différents types de tufs. Cette observation pourrait s'expliquer par des conditions de formations qui diffèrent entre ces concrétions calcaires, comme la différence d'espèce de cyanobactérie à l'origine du tuf,

les vitesses de formation plus ou moins rapides liées à différentes conditions hydrologiques, thermique, d'apport en nutriments, etc.

IV.4 Conséquences sur le compartiment biologique

IV.4.1 Peuplement des macroinvertébrés benthiques

IV.4.1.1 Structure des peuplements

Le tri et la détermination des 20 premières placettes, suivant un protocole MAG20, et des 20 dernières placettes en favorisant des supports/substrats colmatés a permis d'obtenir les listes faunistiques figurant en annexe 5.

Ce protocole a permis d'évaluer l'abondance sur les 4 stations, à partir des 40 prélèvements, qui varie de 4903 ind/m² sur la station Piquette colmatée à 8562 ind/m² sur la station Piquette diversifiée et de 7379 ind/m² sur la station Cessey colmatée à 10984 ind/m² sur la station Cessey diversifiée (tableau 4.4).

La variété générique semble suivre la même tendance au niveau de Cessey puisque qu'elle passe de 54 sur la station colmatée à 69 sur la station diversifiée. Au contraire, cette observation ne se confirme pas pour la Piquette, la variété générique est en effet sensiblement identique entre les deux stations et la légère tendance qui se dessine est plutôt inversée avec une variété de 55 pour la station colmatée et de 54 pour celle diversifiée.

Les indices de qualité définis par la note IBGN et le Cb2 indique une meilleure qualité biologique pour les stations situées à la Piquette (IBGN de 18/20 et Cb2 de 17/20 pour la colmatée et de 16.5/20 pour la diversifiée) que celles situées à Cessey (IBGN de 15/20 et Cb2 de 15/20 pour la colmatée et de 15.5/20 pour la diversifiée). Ces valeurs moyennes correspondent à un état biologique dégradé de la Loue. Le peu de différence entre les indices des stations colmatées et peu colmatées peut être expliqué par le fait que les placettes prélevées dans le protocole IBGN sont sensiblement les mêmes (même substrat/support, vitesse et hauteur d'eau).

Les plécoptères sont représentés par 5 genres en prenant en compte les 4 stations : *Leuctra*, *Protonemura*, *Nemura*, *Besdolus* et *Dinocras*. Les genres les plus polluosensibles sont le genre *Dinocras* qui est uniquement présent sur les stations situées à la Piquette (avec une abondance plus importante sur la station diversifiée) et le genre *Besdolus* uniquement présents sur la station Cessey diversifiée. Ce dernier genre avait disparu de la Loue depuis plusieurs années. Le genre *Leuctra* le moins polluosensible représente de 89% à 100% des plécoptères présents sur chaque station à l'exception de la station piquette diversifiée où le genre *Dinocras* est autant représenté.

Parmi les Ephéméroptères, le genre particulièrement sensible *Oligoneurilla* est observé uniquement sur la station Cessey diversifiée. L'abondance des Ephéméroptères est largement dominée sur les quatre stations par le genre *Serratella ignita*. Quant aux trichoptères, le genre polluo-sensible *Odontocerum* est uniquement présent sur les

stations situées à la Piquette avec un nombre de taxons plus élevé sur la station colmatée (52 pour 42), même si ces valeurs restent dans la même classe d'abondance établit par Verneaux (1973). Les genres sensibles *Lepidostoma* et *Ryacophila* perdent réciproquement 1 et 2 classes d'abondance entre la station Piquette diversifiée et la station Piquette colmatée.

Le pourcentage de taxons saprobiontes et/ou polluo-résistants (*E. baetis*, *E. caenis*, *E. Serratella*, *T. Hydropsyche*, *D. Simulidae*, *C. Gammaridae*, Oligochètes, Planaires, Achètes) est plus élevé sur les stations situées à la Piquette que celles dans le secteur de Cessey. Ce pourcentage est plus élevé sur la station Piquette diversifiée (81%) que sur la station plus Piquette colmatée (74%). Sur le secteur de Cessey, il est très similaire sur les 2 stations d'environ 65%. Ce pourcentage reste donc dans l'ensemble assez faible.

Le genre *Gammarus*, très sensible aux toxiques et peu sensible à la charge organique est en déficit sur les 4 stations (en classe 3 ou 4).

Les grandes tendances décrites précédemment se confirment lorsque l'on considère seulement 20 placettes et non plus 40 placettes. Cependant, on peut noter une importante augmentation de la variété générique de 9 genres sur la station Cessey diversifiée en considérant les prélèvements des 40 placettes. Au contraire, les conclusions quant à la qualité biologique du macrobenthos sont très différentes en considérant uniquement 8 placettes comme dans le protocole IBGN et 20 placettes comme dans le MAG20. Notamment, la variété générique est particulièrement sous-estimée en considérant uniquement les 8 prélèvements. Ces résultats confirment l'intérêt de considérer au moins 20 placettes pour caractériser l'état écologique d'un cours d'eau à partir de l'étude du peuplement des macroinvertébrés benthiques.

En définitive, dans le secteur de Cessey, la structure du peuplement benthique indique une meilleure qualité biologique sur la station présentant une mosaïque habitationnelle plus riche. En revanche, en ce qui concerne les deux stations situées à la Piquette, les conclusions sont moins claires mais il semblerait que la tendance générale soit légèrement en faveur de la station Piquette diversifiée par rapport à la station Piquette colmatée.

	Piquette colmatée	Piquette diversifiée	Cessey colmatée	Cessey diversifiée
<u>Calcul IBGN sur les 8 prélèvements :</u>				
Variété taxonomique :	39	35	32	31
Taxon indicateur (GI) :	<i>Odontoceridae</i>	<i>Perlidae</i>	<i>Leuctridae</i>	<i>Leuctridae</i>
IBGN (/20) :	18	18	15	15
<u>Calcul de robustesse :</u>				
Taxon indicateur (GI) :	<i>Leuctridae</i>	<i>Odontoceridae</i>	<i>Glossosomatidae</i>	<i>Glossosomatidae</i>
Robustesse IBGN' (/20) :	17	17	15	15
<u>Calcul Cb2 sur les 8 prélèvements :</u>				
Variété taxonomique :	39	35	32	31
Indice variété Iv (/10) :	8,6	7,7	7	6,8
Nombre total de taxons indicateurs n :	23	25	23	25
Nombre de taxons indicateurs retenus k :	6	6	6	6
kTaxons indicateurs (i) :	Empididae Ephemeridae Glossosomatidae Lepidostomatidae Odontoceridae Sericostomatidae	Perlidae Ephemeridae Glossosomatidae Heptageniidae Lepidostomatidae Odontoceridae	Empididae Ephemeridae Glossosomatidae Lepidostomatidae Sericostomatidae Leuctridae	Ephemeridae Glossosomatidae Heptageniidae Lepidostomatidae Leuctridae Psychomyidae
Indice nature In (/10) :	8,5	8,7	8,3	8,1
Iv + In :	17	16,4	15,3	14,9
Cb2 (/20) (Iv+In±0,25):	17,0	16,5	15,5	15,0
<u>SUR LES 20 PRÉLÈVEMENTS :</u>				
Abondance :	5 133	9 109	7 169	11 738
Variété générique :	54	51	51	60
Plécoptères (nb taxons) :	4 (28)	2 (21)	1 (21)	3 (62)
Éphéméroptères :	7 (1587)	8 (1747)	6 (1900)	9 (1861)
Trichoptères :	18 (894)	18 (736)	19 (2649)	15 (2192)
Coléoptères :	8 (358)	8 (595)	7 (725)	9 (1309)
Gammaridae	475	507	346	413
Saprobiontes / Poluorésistants / Ubiquistes	66%	82%	65%	70%
<u>SUR LES 40 PRÉLÈVEMENTS :</u>				
Abondance :	9 806	17 123	14 758	21 967
Variété générique :	55	54	54	69
Plécoptères (nb taxons) :	4 (50)	3 (32)	1 (32)	3 (80)
Éphéméroptères :	7 (2909)	8 (3091)	7 (3706)	10 (4845)
Trichoptères :	18 (1517)	18 (1815)	19 (4413)	19 (4705)
Coléoptères :	9 (590)	9 (1361)	8 (1734)	10 (3021)
Gammaridae	819	1243	849	822
Saprobiontes / Poluorésistants / Ubiquistes	74%	81%	66%	65%

Tableau 4.4: Analyse du peuplement macrobenthique sur les 4 stations.

IV.4.1.2 Répartition habitationnelle des macroinvertébrés

La comparaison de l'abondance relative et de la variété obtenues sur chaque substrat confirme la préférence des macroinvertébrés pour les bryophytes et spermaphytes immergés, à l'exception de la station Piquette colmatée (tableau 4.5). Cette différence s'explique par la faible biomasse de bryophytes sur cette station par rapport aux autres. En effet, la quantité de bryophyte prélevée dans le surber était toujours inférieure sur cette station.

Les substrats colmatés présentent en générale un moins bon couple abondance/variété que leurs homologues non colmatés. La comparaison entre les différents types de tufs sur les stations situées à Cessey met en évidence la préférence du macrobenthos pour les tufs présentant des anfractuosités par rapport à ceux qui en sont dépourvus. Cette même comparaison est moins nette en ce qui concerne les stations situées à la Piquette. La répartition du macrobenthos en fonction de la vitesse semble plus homogène sur le secteur de la Piquette alors qu'il y a une préférence nette des placettes avec des vitesses élevées sur le secteur de Cessey avec une désertion des placettes lenticulaires qui peut être la conséquence d'une perturbation de l'oxygénation du milieu.

Les quelques valeurs relevées de l'oxygène dissous révèle des taux toujours plus élevés sur les stations de la Piquette par rapport à celle de Cessey. Cependant, pour évaluer réellement ces perturbations, il faudrait installer une sonde qui enregistre en continu l'oxygène dissous afin éventuellement d'étudier les variations journalières de l'oxygène dissous.

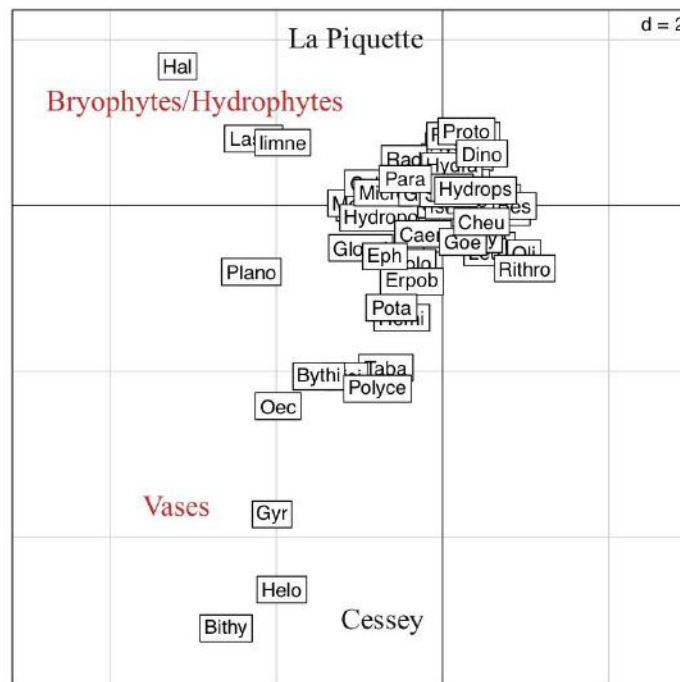
	Cessey colmatée		Cessey diversifiée		Piquette colmatée		Piquette diversifiée	
	abondance relative (%)	variété relative (%)	abondance relative (%)	variété relative (%)	abondance relative (%)	variété relative (%)	abondance relative (%)	variété relative (%)
Substrats/supports								
Bryophytes (bryo)	7,5	44	7,3	45	1,6	24	7,1	43
Bryo colmatés algues (bryo alg)			3,0	27	1,4	27	3,1	30
Hydrophytes (hyi)	4,3	38	4,0	28	1,2	31	4,1	27
Litières (lit)	1,2	22	2,3	23	1,6	36	0,6	22
Chevelus racinaires (chv)	1,9	19	2,1	18	2,4	34	1,2	24
Galets (gal)	3,0	44	2,4	40	5,1	37	1,2	32
Galets tufés (gal tuf)	2,5	43			1,2	34	2,3	31
Blocs (blo)	0,9	38	0,5	22	2,1	26	0,7	24
Blocs tufés (blo tuf)			0,4	18	1,7	34		
Graviers (gra)	1,0	39	1,7	42	0,5	25	1,4	35
Hélophytes (hel)	1,0	24	0,9	32				
Vases (vas)	0,2	13			1,6	27	0,7	13
Sables (sab)	0,3	17	1,3	8	1,8	33	1,4	43
Algues (alg)	1,2	34	3,2	28	0,9	36	1,5	35
Surface uniforme (dal)	0,9	35	1,7	15	2,4	40	2,7	40
Nassis (nassis)	2,2	44	0,6	29			1,2	52
Tufs avec infractuosités (tuf exp)	1,2	41	1,5	31			0,7	39
Tuf sans infractuosités (tuf dal)	0,9	31	1,0	25	1,3	28	1,3	39
vitesse								
< 5 cm/s	1,0	29	1,9	30	1,4	52	3,6	33
5 à 25 cm/s	2,4	39	1,9	31	1,4	44	1,6	33
26 à 75 cm/s	6,0	43	2,7	29	1,3	30	3,0	32
76 à 150 cm			3,9	29			1,3	41
> 150 cm			9,8	36			0,9	27
hauteur								
< 5 cm	1,5	41	1,9	28	0,2	24	2,3	31
6 à 25 cm	3,6	35	3,4	33	1,6	33	4,2	34
26 à 50 cm	2,0	37	1,2	29	1,2	29,8	2,0	34
51 à 100 cm	1,5	33	2,8	29	1,4	31,5	1,2	33

Tableau 4.5: Abondance relative et variété générique relative du macrobenthos associées à différentes modalités de l'habitat.

A partir des 40 prélèvements, l'organisation spatiale du benthos et la comparaison des placettes colmatées et non colmatées ont pu être réalisées en procédant à une analyse factorielle des correspondances (AFC) (figure 3.5).

Afin de faciliter la lecture, les taxons ultra minoritaires dont l'abondance totale est inférieure à 3, ont été écartés. La densité des taxons ont été transformé en classes d'abondance (Verneaux 1973).

L'inertie totale de l'ensemble des données sur les 4 stations n'atteint que 0.3. Cette valeur très inférieure à 1 indique un contraste écologique peu marqué. Cependant, sur les deux premiers axes, l'AFC met en évidence le *preferendum* de certains taxons pour un des deux secteurs de la Loue étudié et pour des habitats bien particuliers (figure 4.6). Ainsi, les genres *Lasiocephala*, autres *limnephilinae* et *Halesus* sont surtout prélevés sur le secteur de la Piquette dans des chevelus pour *Halesus* ou dans des galets, des bryophytes ou des spermaphytes immergés pour les deux autres. D'autre part, les taxons fousseurs sont mis en évidence par l'AFC en étant associé aux substrats tels que les vases, les litières et les sables.



Leu	Leuctra	Lepi	Lepidostoma hirtum	Limn	Limnius	Bithy	Bithynia
Proto	Protonemoura	Athri	Athripsodes	Ouli	Oulimnius	Bythi	Bythinella
Nem	Nemoura	Cer	Ceraclea	Rio	Riolus	Stag	Stagnicola
Dino	Dinocras	Oec	Oecetis	Ore	Orectochilus	Myx	Myxas glutinosa
Bes	Besdolos	Myst	Mystacides	Hydro	Hydrocyphon	Rad	Radix
Bae	Baetis	Anab	Anabolia	Hydrae	Hydraena	Seg	Segmentina nitiba
Oli	Oligoneurilla	Hal	Halesus	Ant	Anthomyiidae	Plano	Planorbis
Ecdy	Ecdyonurus	Mel	Melampophylax	Athe	Athericidae	Ancy	Ancylus fluviatilis
Rithro	Rithrogena	limne	Autres Limnephilinae	Chiro	Chironomidae	Erpob	Erpobdella
Caen	Caenis	Aga	Agapetus	Simu	Simuliidae	Glossi	Glossiphonia
Serra	Serratella ignita	Odon	Odontocerum albicorne	Limo	Limoniidae	Helo	Helobdella stagnalis
Torl	Torleya Major	Holo	Holocentropus	Empi	Empididae	Hemi	Hemiclepsis
Para	Paraleptophlebia	Poly	Polycentropus	Psycho	Psychodidae	Oligo	Oligochètes
Eph	Ephemera	Psy	Psychomyia	Taba	Tabanidae	Dug	Dugesia
Pota	Potamanthus	Rhya	Rhyacophila	Tipu	Tipulidae	Gyr	Gyraulus
Goe	Goera	Seri	Sericostoma	Calo	Calopteryx	Polyce	Polycelis
Hydrops	Hydropsyche	Hydro	Hydroporinae	Sia	Sialis	Hydra	Hydracarien
Cheu	Cheumatopsyche Lepida	Elm	Elmis	Micro	Micronecta		
Hydrop	Hydroptila	Eso	Esolus	Gam	Gammarus		
Lasio	Lasiocephala	Ste	Stenelmis	Pisi	Pisidium		

Figure 4.6: Carte factorielle FIF2 calculée sur l'ensemble des données des 4 stations : projection des taxons de macroinvertébrés et des trois descripteurs substrats/supports, vitesse et hauteur d'eau.

Afin de comparer la répartition des taxons plus ou moins exigeants sur les substrats colmatés ou non colmatés, nous avons procédé à la même analyse que précédemment mais à l'échelle de la station. A cette échelle, bien que là encore l'inertie de l'AFC soit bien inférieure à 1, l'analyse révèle tout de même que les taxons exigeants sont prélevés principalement dans les substrats à fortes anfractuosités comme les spermaphytes, bryophytes et galets. Les substrats colmatés par du tuf ou des algues sont associés aux taxons moins exigeants (figure 4.7).

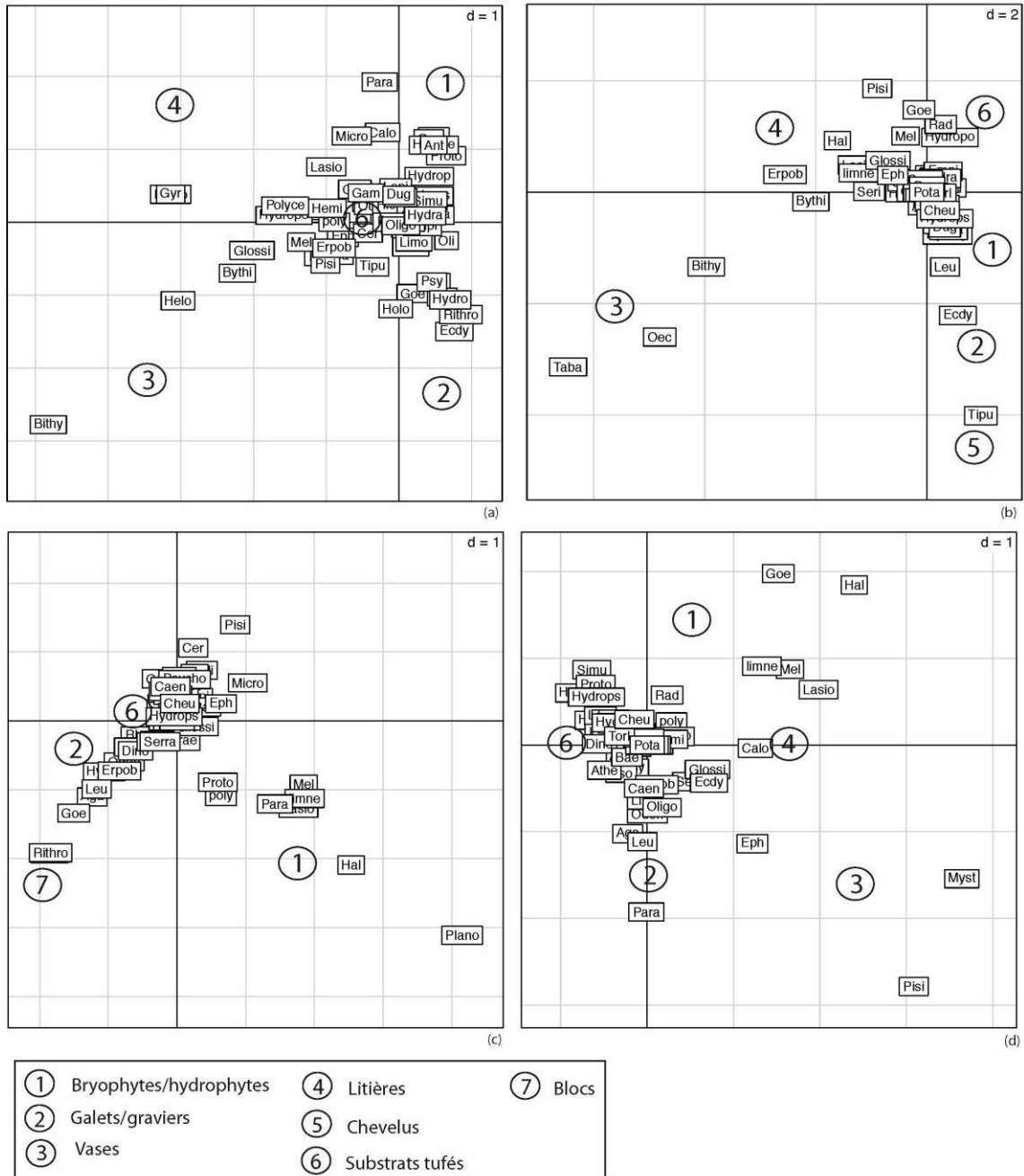


Figure 4.7: Carte factorielle F1F2 calculée sur chaque station : (a) Cessey diversifiée, (b) Cessey colmatée, (c) Piquette diversifiée et (d) Piquette colmatée.

IV.4.2. Peuplement piscicole

L'échantillonnage par Cadre A Projection Prospecté par Electricité (CAPPE) sur les quatre stations a permis d'étudier d'une part la répartition des différents écostades (O+, juvénile et adulte pour chaque espèce pêchée) sur les différents habitats aquatiques et d'autre part d'en déduire la composition du peuplement piscicole pour les petites espèces à l'échelle de la station.

IV.4.2.1 Analyse des densités piscicoles à l'échelle de la station

Les densités numériques de chaque espèce pêchée à l'échelle de la station ont été estimées en multipliant les résultats obtenus sur chaque placette associée à un habitat particulier par la surface totale occupée par cet habitat sur la station. Il est évident qu'il ne s'agit pas d'un inventaire exhaustif du peuplement piscicole composant chaque station. De plus, ces densités numériques obtenues pas la méthode CAPPE ne pourront pas être interprété par rapport au peuplement théorique défini suivant le modèle de la biotypologie longitudinal qui se base sur des inventaires exhaustifs (CSP, 2005). Ces résultats pourront uniquement être interprétés en termes de comparaison entre les différentes stations.

Les densités numériques en *Chabot*, *Vairon* et *Truites* sont bien supérieures sur les stations présentant une mosaïque d'habitats diversifiés (figure 4.8 et 4.9). Cette tendance se vérifie en ce qui concerne la structure des classes d'âge de ces espèces puisque cette dernière semble plus équilibrée sur les stations présentant des habitats diversifiés (annexe 1). Même si la méthode de pêche n'est pas particulièrement adaptée pour la pêche des truites adultes, le nombre de *truite fario* pêché sur l'ensemble des stations est particulièrement bas pour de telles stations, notamment on peut noter une quasi absence de jeune stade. La baisse de densité du chabot entre les stations diversifiées et colmatées est sans nul doute liée au colmatage de son habitat où il trouve habituellement refuge entre les interstices des blocs et des galets.

Certaines espèces sont manquantes de notre échantillonnage sur les deux secteurs. Notamment sur le secteur de Cessey, certaines espèces, électives du type écologique de ce secteur, aurait dû être pêchées comme le *Hotu*, le *Toxostome*, la *Vandoise* et l'*Apron*. Or, pour la plupart de ces espèces, nous avons pu en observer sur la station sans jamais réussir à en pêcher. La pêche du *Hotu* et du *Toxostome* par la méthode de CAPPE n'est pas particulièrement bien adaptée puisque ces espèces fuient trop rapidement à l'approche d'un danger. En ce qui concerne, l'absence de l'*Apron* dans notre échantillonnage, cela s'explique par la quasi-disparition de cette espèce sur la Loue.

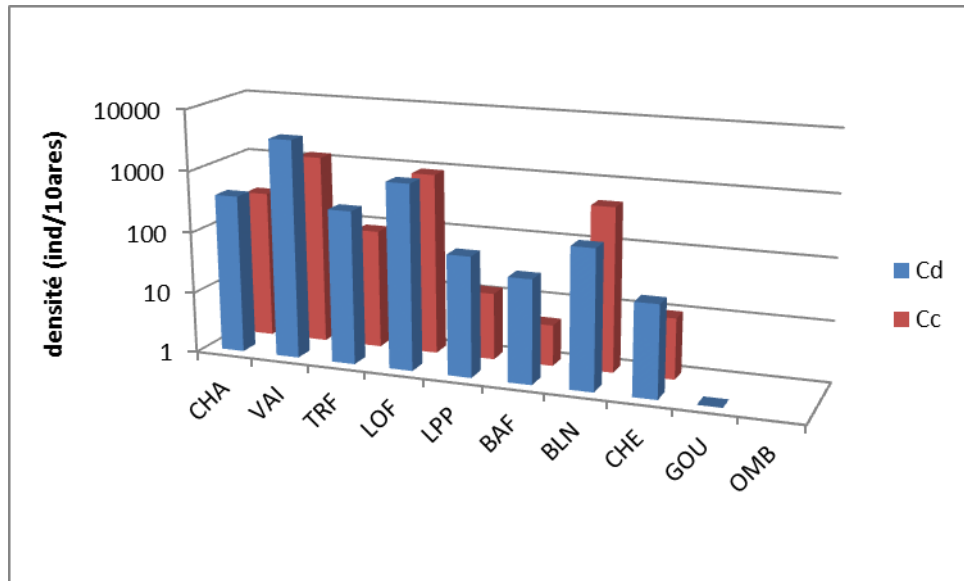


Figure 4.8 : Comparaison des peuplements piscicoles entre la station Cessey diversifiée (Cd) et la station Cessey colmatée (Cc)

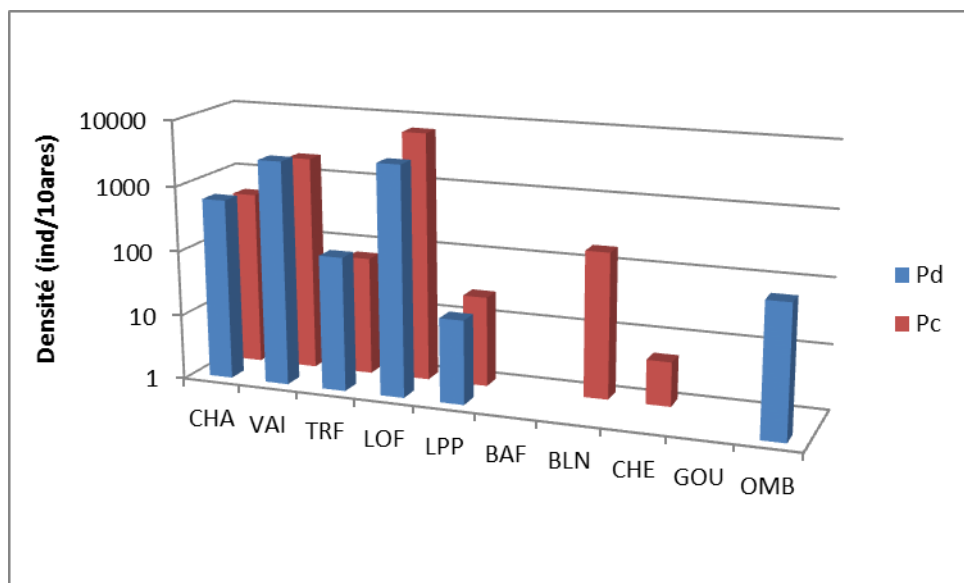


Figure 4.9 : Comparaison des peuplements piscicoles entre la station Piquette diversifiée (Pd) et la station Piquette colmatée (Pc).

IV.4.2.2 Répartition habitationnelle des poissons

Le calcul de la densité piscicole par placette et de la variété totale associée à chaque habitat défini par un substrat/support, une vitesse et une hauteur d'eau indique l'intérêt des poissons pour les branchages immergés et les herbiers (tableau 4.6). Les vitesses lentes et les hauteurs moyennes présentent les meilleurs couples densité-variété alors que les faibles hauteurs d'eau et les vitesses rapides sont peu attractives.

En ce qui concerne l'habitabilité des substrats colmatés par des concrétions calcaires, les tufs présentant des anfractuosités sont associés à des meilleurs couples densité/variété que les dalles tufeuse ne présentant pas d'anfractuosités. En effet, les cavités de ces tufs avec anfractuosités peuvent faire de bonnes caches, ce qui rend cet habitat favorable vis-à-vis des poissons.

La répartition spatiale des différents écostades a été conduite en opérant des AFC sur des données par stations et par mosaïques d'habitats.

L'analyse sur l'ensemble des résultats des 4 stations est réalisée sans tenir compte de la présence de l'ombre qui est uniquement pêché sur la station Piquette diversifiée. En effet, la prise en compte de cette espèce minoritaire diminue le pouvoir de résolution de l'AFC en écrasant les données.

Cette analyse montre un meilleur contraste (inertie de 0.62) de la répartition des écostades sur les 4 stations que lors de l'étude de la répartition du peuplement macrobenthique sur les différents habitats. Elle révèle une répartition spatiale des captures qui est déterminée par des types d'habitats et des gradients de vitesse (figure 4.10).

La comparaison de la répartition des espèces en fonction de trois types de substrats que sont les blocs avec anfractuosités et les tufs sans et avec anfractuosités (dont les nassis) indiquent une préférence nette des truites et des chabots pour les nassis d'autant plus prononcé pour les jeunes stades (figure 4.11). Les différentes espèces se répartissent suivant un gradient d'anfractuosité : les *truites* et les *chabots* favorisent les substrats avec anfractuosités élevées (nassis et blocs), les stades les plus avancés des *vairons*, *blageons*, *loches franches* affectionnent les tufs avec anfractuosités alors que les stades les plus jeunes des *loches* et des *blageons* sont principalement pêchés sur les tufs sans anfractuosités.

	Cessey colmatée		Cessey diversifiée		Piquette colmatée		Piquette diversifiée	
nb capture sur 60 placettes	271		522		565		346	
variété totale (nb écostades)	15		19		15		13	
	Densité (nb/m ²)	Variété	Densité (nb/m ²)	Variété	Densité (nb/m ²)	Variété	Densité (nb/m ²)	Variété
Substrats/supports								
branchage, grosses racines (bra)	33,3	6	35,2	10	40,9	9	27,3	4
sous-berges (ber)	12,5	6	3,1	2	25,0	5	10,9	13
hydrophytes (hyi)	13,1	8	13,3	8	9,4	10	14,1	9
blocs avec caches (blo)	7,3	5	20,0	6	35,2	7	4,7	5
galets (gal)			2,0	1	7,8	4	1,6	1
galets pavés (tufés) (gls)	0,6	2	3,1	2				
galets colmatés algues			6,3	3	28,9	6	1,6	3
hélophytes (hel)			20,3	5	81,3	7		
chevelu racinaire, végétations rases (chv)	6,3	4	6,7	5	31,3	4	2,6	4
Chv colmaté algues	2,0	4						
galets et graviers mélangés (ggr)			3,3	5	7,7	4	2,5	3
(ggr) colmaté algues			1,6	1			9,4	3
graviers (gra)			1,6	1			0,0	0
nassis (nassis)			6,6	7			7,8	6
tufs avec infractuosités (bls)	3,8	10	20,0	12			6,7	5
tuf sans infractuosités (tuf dal)	4,7	3	31,3	4	5,7	5		
Dalles tufeuses avec bryophytes et algues	2,0	2			5,5	5	13,4	9
litières organiques (lit)			54,7	3			31,3	4
sables (sab)			17,2	2				
éléments fins, limons (fin)	3,1	5	18,8	3	10,2	3		
fonds nus organique, vases (fno)			30,8	3	54,7	6	10,2	3
dalles, surfaces indurés (dal)								
vitesse								
< 10 cm	9,2	14	25,7	16	38,3	14	19,2	8
11 à 40 cm	4,7	9	11,6	17	6,5	10	7,0	9
41 à 80 cm	14,1	2	3,9	7	6,3	7	8,0	9
81 à 150 cm	1,6	1	0,5	1			3,4	4
> 151 cm			0,5	1				
hauteur								
< 5 cm								
6 à 20 cm	16,1	9	23,5	16	0,0	0	9,8	7
21 à 70 cm	7,8	13	7,7	14	29,6	12	9,4	12
71 à 150 cm	3,1	7	9,7	11	7,8	13	4,4	7
> 151 cm	1,6	3						

Tableau 4.6 : Répartition des densités et des variétés du peuplement piscicole en fonction des caractéristiques de l'habitat : substrats/supports, vitesse et hauteur d'eau.

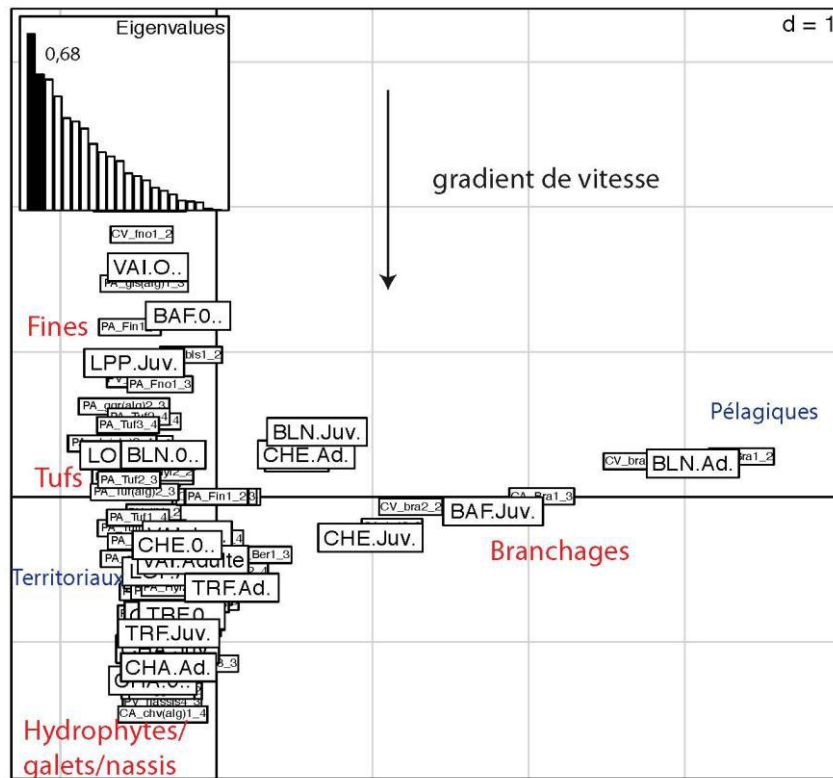


Figure 4.10: Carte factorielle FIF2 des résultats des 4 stations : projection des espèces de poisson, des stations et des 3 descripteurs de l'habitat.

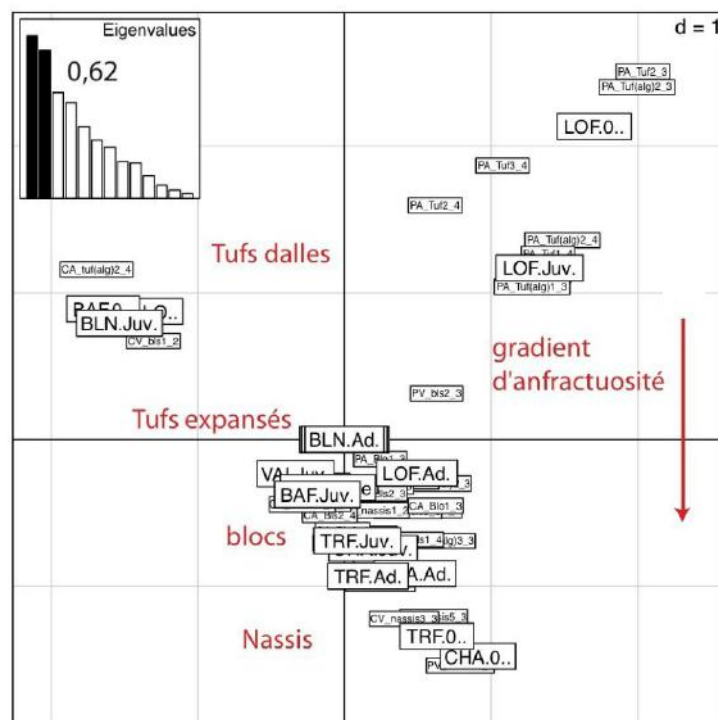


Figure 4.11: Carte factorielle FIF2 projetant les espèces de poisson, les vitesses de courant, les hauteurs d'eau et trois types de substrats (blocs, blocs tufés, nassis, tufs avec et sans anfractuosités).

V. INTERPRETATION ET DISCUSSION

V.1 L'apport de fines dans la Loue

Le suivi ponctuel du flux fines dans la Loue indique une augmentation de ce flux d'un facteur 1000 entre les plus grandes crues et les débits d'étiage enregistrés sur notre période d'étude (de fin mai à début août). Cette observation semble confirmer les conclusions apportées par Smith et al. (2003) qui ont suivi pendant deux ans (1994-1996) le transport de fines dans la rivière de Swale (Angleterre). Ce transport se révèle avoir lieu à 66% durant les événements de crues par transport en suspension. Or, une étude menée par Lenzi (2000) sur une rivière de montagne indique que la quantité de sédiments fins transportée durant une période de crues ne peut pas être expliquée uniquement par la remobilisation des sédiments du lit. L'explication d'une telle quantité nécessite de prendre en compte l'apport de fines par l'érosion des sols du bassin versants.

Ces apports de fines provenant du bassin versant sont susceptibles d'être une source en nutriments et en toxiques. Les analyses réalisées sur les matières en suspension dans la Loue ont révélé des taux élevés en phosphore dans les MES, particulièrement sur le secteur de la Piquette où les taux de phosphore sont légèrement plus élevés que ceux enregistrés sur le secteur de Cessey. Ce taux apporté par les fines diminue de manière importante entre mai et août (entre les 3 campagnes), notamment une baisse importante de la quantité de phosphore des MES est observée en août sur la station de la Piquette colmatée.

Plusieurs explications peuvent être proposées pour expliquer cette diminution. La première raison pourrait être la différence dans la taille des particules en suspension puisque la quantité de phosphore adsorbé dépend de l'aire spécifique des particules en suspension (Owens et Walling, 2002). La seconde explication serait liée à la désorption de ce phosphore. Lorsque l'eau de surface est appauvrie en ions, les solutés piégés à la surface des sédiments peuvent alors être libérés et diffuser vers la colonne d'eau (Lefebvre, 2003). Ces phénomènes se produisent notamment lors des crues qui peuvent engendrer une dilution de l'eau de surface et une érosion des sédiments. Les sédiments sont caractérisés par leur « équilibre de concentration au phosphate » qui représente la concentration de l'eau à laquelle le phosphore n'est ni adsorbé ni désorbé ainsi si la concentration en phosphate diminue dans la colonne d'eau, le phénomène de désorption du phosphore des sédiments va être accru. Ce phénomène est d'autant plus important lorsqu'il s'agit de fines puisque les sites d'échanges sont plus importants. Or, la baisse de la quantité de phosphore des MES mesurée entre les 3 campagnes est justement caractérisée par une augmentation des épisodes de crues sur la même période. Enfin, un autre facteur responsable de la baisse du phosphore des MES peut être lié à l'activité microbienne. Cette activité est capable de consommer ce phosphore et par voie de conséquence de libérer des ortho phosphates dans le milieu (Marxsen & Schmidt, 1993) qui pourront être alors absorbés de façon privilégiée par les végétaux aquatiques et les algues en particulier.

Les apports de nitrates se font essentiellement sous forme dissoute lors des épisodes pluvio-orageux. Lors de ces crues, les concentrations de nitrates mesurées dans les deux secteurs de Cessey et de la Piquette dans la Loue sont accrues d'un facteur 3. Cet apport de nitrates et l'apport de phosphates via les particules fines lors des crues augmente donc considérablement les quantités de nutriments bio-disponibles à courts et moyen terme. Or, les algues ont une des positions les plus favorables dans l'écosystème pour capter ces éléments nutritifs. Ainsi, une augmentation de la charge nutrimentielle peut se traduire par une prolifération algale. Nous n'avons pas été en mesure de suivre le développement algal au cours de notre étude, mais les observations que nous avons pu en faire indiquent une augmentation du recouvrement entre début juillet et début août. Les apports importants en nitrates mesuré lors des prélèvements durant cette période et les phénomènes de relargage du phosphore provenant des MES et du compartiment sédimentaire pourrait éventuellement expliquer le développement de ces algues s'il se vérifie (Dorioz, 1996 in Owens et Walling, 2002). Une étude menée actuellement par le bureau d'étude Eaux Continentales portant entre autre sur le suivi du développement algale sur plusieurs stations sur la Loue pourrait confirmer nos observations. Malheureusement, nous ne disposons pas encore de ces résultats.

Les analyses sur les sédiments fins prélevé dans le lit de la Loue sur les 4 stations révèlent des taux en phosphore adsorbé moins élevés que sur les MES. Ces différences sont sans doute due à des différences dans la taille des particules ou dans le pourcentage de matière organique entre ces deux matériaux (Owens et Walling, 2002).

Ces résultats suggèrent donc que les matières en suspension enrichies en phosphore adsorbé vont être une source de phosphore bio-disponible à court terme mais aussi à plus long terme lorsqu'ils seront stockés dans les sédiments du lit.

V.2 Les concrétions calcaires

Sur les 4 stations étudiées sur la Loue, nous avons pu distinguer trois différents types de concrétions calcaires : les nassis formant des barres tufeuses et créant des sous berges, les tufs « expansés » présentant quelques anfractuosités et les tufs « denses » qui forment des surfaces lisses.

Or, les analyses de cristallographie réalisées par Myriam Euvrard sur ces différentes concrétions calcaires révèlent une différence de structure au niveau de la taille moyenne des cristallites. Plusieurs raisons peuvent être envisagées pour expliquer cette différence de structure.

D'une part, la différence d'espèces responsable de la formation de ces concrétions calcaires peut expliquer la différence de structure de ces tufs. Des études menées sur plusieurs rivières calcaires du bassin de la Seine et de Bourgogne montrent que les précipitations les plus intenses de calcites sont des précipitations calcaires d'origine micro-algaire et sont dans 90% des cas dus à des cyanobactéries (*Phormidium incrustatum*, *Schizothrix fasciculata*) et chlorophycées (*Gongrosia incrustaus*) (Pitois,

2003 ; Pitois, 2005). La précipitation biochimique de calcite se fait à la surface des gaines polysaccharidiques entourant les cellules. Kano (2003) et Arp (2001) ont mise en évidence une alternance saisonnière dans la lamination des dépôts avec des laminations poreuses au printemps, associées à des *Phormidium incrustatum* α et des laminations dense en été et en automne, associées à des *Phormidium incrustatum* β et *Phormidium foveolarum*. La détermination des cyanobactéries mise en jeu dans les trois types de concrétions calcaires présents sur nos 4 stations d'études est en cours de réalisation par un bureau d'étude. Cette étude pourra sans doute permettre de savoir si différentes cyanobactéries sont responsables de la formation de ces différents types de tufs.

D'autre part, l'apparition et le développement optimal de la microflore incrustante dépend de plusieurs facteurs abiotiques que sont les conditions trophiques, la température, l'éclairement, la granulométrie des fonds, la profondeur et la vitesse du courants (Pitois, 2005). Or, ces facteurs de contrôle sont donc susceptibles d'être à l'origine du développement des différentes formes de concrétions calcaires. La vitesse du courant est un des facteurs de contrôle qui joue un rôle importants dans le développement de la microflore incrustante et donc de la vitesse de cimentation des fonds. Le dépôt de concrétion calcaire est trois fois plus important pour des vitesses de courant de 50 cm/s par rapport à des vitesses de 5 cm/s (Pitois, 2003 ; Primc-Habdija et al. 2001). En effet, dans les régions de la rivière où la vitesse est faible, les dépôts de fines empêchent le développement de la microflore incrustante. Cependant, la stabilité des fonds de la rivière étant nécessaire pour le développement de cette flore, les vitesses trop élevées ne sont pas non plus favorables à la formation des concrétions calcaires.

La disposition des fonds tufés sur nos 4 stations ne fait pas apparaitre de relation claire entre les différents types de tufs et la vitesse du courant et la profondeur. On peut tout de même noter que la majeure partie de ces surfaces cimentées par les concrétions calcaires se situe dans des zones dont la profondeur est comprise entre 21 et 70 cm et la vitesse de courant entre 21 et 70 cm.

V.3. Les conséquences du colmatage des fonds sur la qualité biologique de la Loue

L'étude du peuplement macrobenthique et piscicole sur les 4 stations fait apparaitre des différences inter et intra stations.

V.3.1. Comparaison inter-station

La qualité biologique du peuplement sur les 4 stations indique des signes de perturbations. Les indices IBGN et Cb2 devraient atteindre 20/20 sur de telles stations dans une rivière à truite et à ombre, cette dégradation de la qualité biologique est d'autant plus marquée sur les stations situées à Cessey où ces indices sont seulement d'environ 15/20. Un autre fait inquiétant est la faible abondance des plécoptères sur ces stations, leur abondance étant représentée à 86% par le genre le moins sensible *Leuctra*, les autres genres étant échantillonnés en très faible quantité. Seulement 5 genres de Plécoptères sont échantillonnés sur les 40 placettes prélevées sur les 4 stations.

Les 40 prélèvements effectués sur les stations à Cessey permettent une comparaison avec les données obtenues par Verneaux en 1973 sur une station située à Chenecey-Buillon à quelques kilomètres en amont de nos stations et appartenant au même niveau typologique. Cette comparaison fait état d'une chute de la diversité générique des EPT de 40 % pour la station diversifiée et de 48 % pour la station colmatée entre 1973 et 2011. Cette chute est principalement associée aux plécoptères pour lesquels 13 genres étaient échantillonnés en 1973 et seulement 3 en 2011. On peut tout de même noter la réapparition, bien que présent en 1973, du genre *Besdolus* qui n'avait pas été retrouvé depuis plusieurs années sur ce secteur de la Loue.

Le peuplement benthique des stations situées à la Piquette présente, d'après les indices IBGN et du Cb2, une meilleure qualité biologique que les stations situées à Cessey. Or, en considérant l'ensemble des prélèvements sur les 40 placettes et en étudiant plus spécifiquement la composition du peuplement benthique, il apparaît clairement une abondance et une variété plus riches sur le secteur de Cessey et principalement pour la station Cessey diversifiée. L'abondance en EPT (Ephéméroptères, Plécoptères et Trichoptères) suit la même évolution en étant plus élevée sur les stations situées à Cessey. Concernant le peuplement piscicole, la tendance est plutôt inversée avec une densité totale plus élevée sur le secteur de la Piquette. Cependant, cet écart s'explique par le fait que si on considère uniquement les densités des espèces susceptibles d'être bien représentées par la « pêche par cadre » (*chabots*, *loches franches* et *vairons*), les valeurs plus élevées de ces densités obtenues sur le secteur de la Piquette sont dues à son niveau typologique B5+ plus favorable pour ces espèces que le niveau typologique B6 sur le secteur de Cessey (CSP, 2005 ; Degiorgi et Raymond, 2003).

L'étude de la qualité habitationnelle des 4 stations selon le protocole IAM révèle une différence significative entre les stations colmatées et diversifiées dans les deux secteurs. Cette observation confirme donc le choix que nous avons fait de nos stations. La description des mosaïques d'habitat met en évidence une qualité physique bien plus riche sur les stations diversifiées par rapport aux stations colmatées. Les substrats présentant des anfractuosités favorables à la faune aquatique, comme les branchages, les blocs, les tufs avec anfractuosités et les nassiss, représentent une surface plus importante sur les stations diversifiées. Quant aux substrats colmatés ne présentant pas d'anfractuosités et défavorables à la faune, ils occupent jusqu'à 50% de la surface totale de la station Piquette colmatée. De plus, les stations colmatées perdent deux classes de vitesses par rapport aux stations diversifiées. Cette différence de la mosaïque habitationnelle entre les stations colmatées et diversifiées sur les deux secteurs se traduit par des notes IAM de 2.1 à 1.8 fois plus faibles sur les stations colmatées, les plus importantes différences ayant été enregistrées sur le secteur de Cessey.

Cette diminution de qualité physique engendre une baisse de la qualité biologique concernant le peuplement macrobenthique et piscicole. Cette différence est particulièrement nette entre les deux stations situées à Cessey. En ce qui concerne le peuplement du macrobenthos, l'abondance et la variété échantillonnées sur les 40

placettes sont plus élevées sur la station diversifiée que sur la station colmatée dans le secteur de Cessey (figure 5.2), cette tendance se confirme en ce qui concerne les variétés d'Ephéméroptère, Plécoptères et Trichoptères. La relation étroite entre la diversité des habitats et la variété du macrobenthos a été démontré par Scarsbook et Townsend (1993) qu'ils expliquent par le fait que l'hétérogénéité habitationnelle réduit les impacts liés aux perturbations, comme les crues, en favorisant la présence de zones refuges. L'étude du peuplement piscicole selon la méthode de pêche par « cadre à projection » (CAPPE) confirme les évolutions observées sur le peuplement macrobenthique sur le secteur de Cessey. La densité totale de poisson (ind/ha) est supérieure sur la station diversifiée ainsi que les densités de *Chabot*, de *Loche Franche* et de *Vairon* (figure 5.1). Nous avons choisi de comparer les densités plus particulièrement de ces espèces car il s'agit de petites espèces dont la technique de pêche par « cadre à projection » est bien adaptée.

Cette différence de qualité biologique observée sur le secteur de Cessey entre les stations colmatées et diversifiées est moins distincte sur les deux stations situées à la Piquette. La structure du peuplement macrobenthique présente une variété totale très similaire entre les deux stations (figure 5.2). Cette tendance est confortée par la variété des Ephéméroptères, Plécoptères et Trichoptères qui restent presque identique sur les deux stations (figure 5.3). Quant au peuplement piscicole, la densité totale est plus élevée sur la station colmatée qui est due principalement à une densité de *Loche Franche* plus importante sur cette station. Au contraire, la densité de *Chabot* et de *Vairons* est supérieure sur la station diversifiée, il en va de même pour la densité de truite (cette dernière remarque est tout de même à nuancer puisque cette espèce n'est pas adapté à la méthode de pêche utilisée). De la même manière, même si là encore la technique de pêche n'est pas favorable pour cette espèce, 3 ombres ont été pêchés sur la station Piquette diversifiée alors que ce n'est pas le cas sur les trois autres stations. Ces résultats signifient que le contraste observé de la qualité physique entre les deux stations n'est pas suffisant pour engendrer des différences dans la qualité biologique entre les deux stations. D'ailleurs, comme le confirme les notes IAM, ce contraste de la qualité physique des stations dans le secteur de la Piquette est bien moins important que celui observé dans le secteur de Cessey.

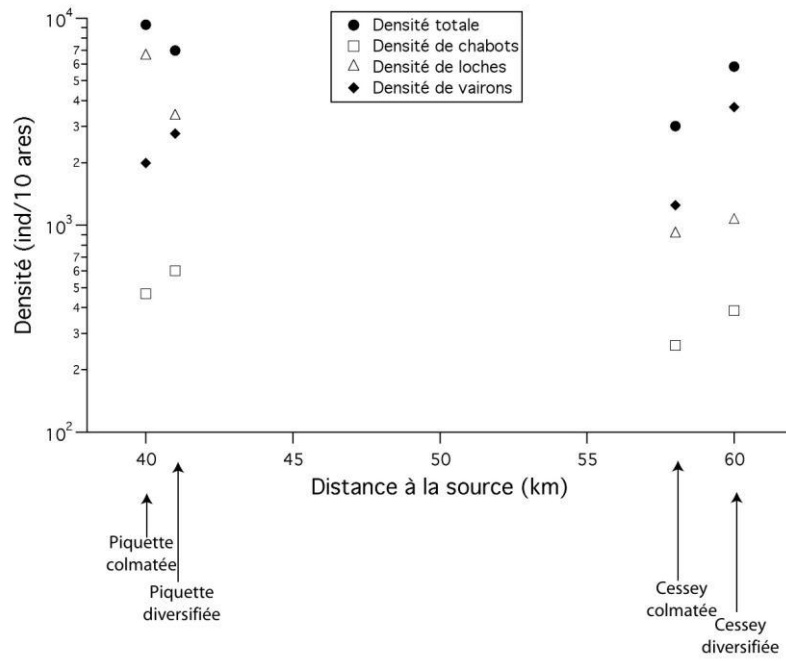


Figure 5.1: Comparaison des densités totales, de chabot, de loches et de vairons sur les 4 stations.

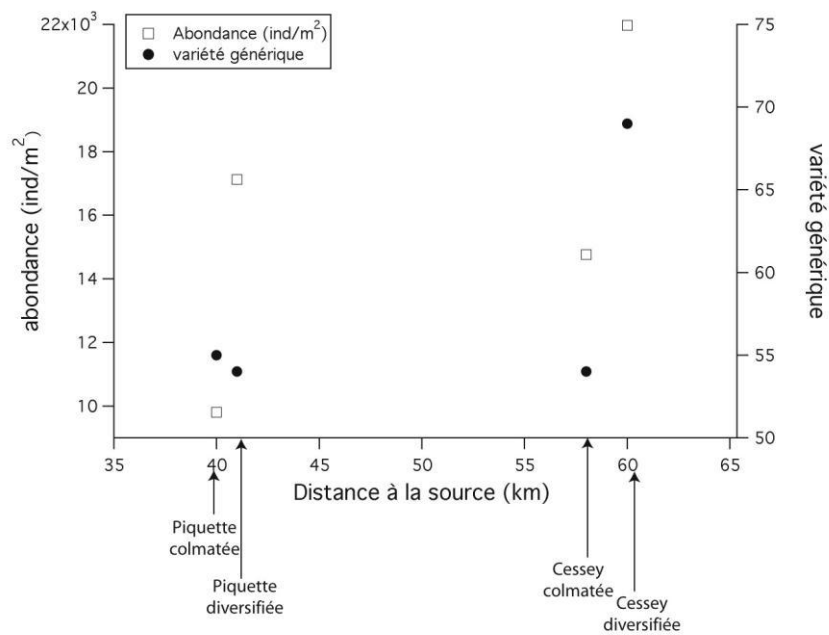


Figure 5.2: L'abondance et la variété générique du macrobenthos échantillonnées sur 40 placettes pour les 4 stations.

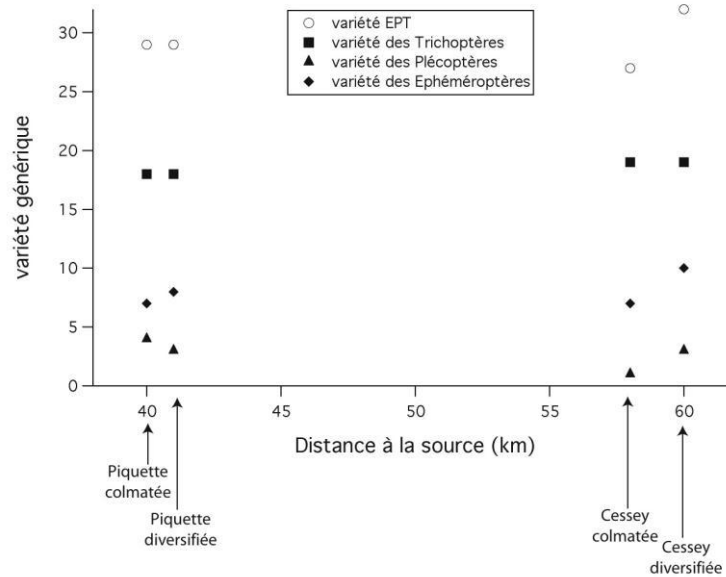


Figure 5.3: Comparaison des variétés génériques du macrobenthos entre les 4 stations.

Entre le 27 et 30 juin, le recouvrement algal est supérieur sur les stations colmatées avec un recouvrement de 50% sur la station Cessey colmatée alors qu'il n'est que de 18.5% sur la station diversifiée. Ces estimations du recouvrement sont réalisées à partir des relevés selon la méthode IAM. Au niveau de la Piquette colmatée, ce recouvrement atteint 62%. Le relevé sur la station de la Piquette diversifiée a été réalisé plus tard dans la saison, le 11 août. D'après nos observations le recouvrement algal a augmenté entre le 30 juin et le 11 août sur le secteur de la Piquette. Malgré ces observations, sur la station de la Piquette diversifiée, il reste inférieur (recouvrement algal de 48.5%) au recouvrement relevé sur la station de la Piquette colmatée. Globalement, le recouvrement algal est plus important sur le secteur de la Piquette. Cette différence pourrait en partie être expliquée par les valeurs plus élevées des concentrations en azote et phosphore enregistrées dans l'eau, les MES et les sédiments du lit dans le secteur de la Piquette (Carpenter et al, 1998 ; Smith et al. 1999). Au contraire, cette explication n'est plus valable pour expliquer les différences de recouvrement observées entre les stations colmatées et diversifiées dans un même secteur. Cet écart pourrait être dû soit aux vitesses plus élevées présentes sur les stations diversifiées qui limiteraient le recouvrement algal (Poff et al., 1990 ; Biggs et al, 1998), soit à la différence de densité de brouteurs et racleurs entre ces stations. En effet, si on pondère la note d'affinité associée à chaque taxon pour les 8 modes d'alimentation comme proposé par Tachet et al. (2010) par l'abondance de chacun de ces taxons, on obtient un score (S_j) associé à chaque modalité d'alimentation j pour chacune des stations :

$$S_j = \sum (\text{Aff}_i \times a_i)$$

où Aff_i est l'affinité du taxon i pour le mode d'alimentation j et a_i est l'abondance du taxon i .

Or, le score obtenu pour les taxons associés au mode de brouteur et racleur présentent des valeurs plus élevées sur les stations diversifiées par rapport aux scores obtenus sur les stations colmatées. Les taxons ayant pu être déterminés uniquement à la famille et

dont le mode d'alimentation varie suivant l'espèce n'ont pas été pris en compte dans les résultats de la figure 5.4. Il apparaît une forte dépendance entre le couvrement algal et le score associé aux taxons racleurs et brouteurs (figure 5.4).

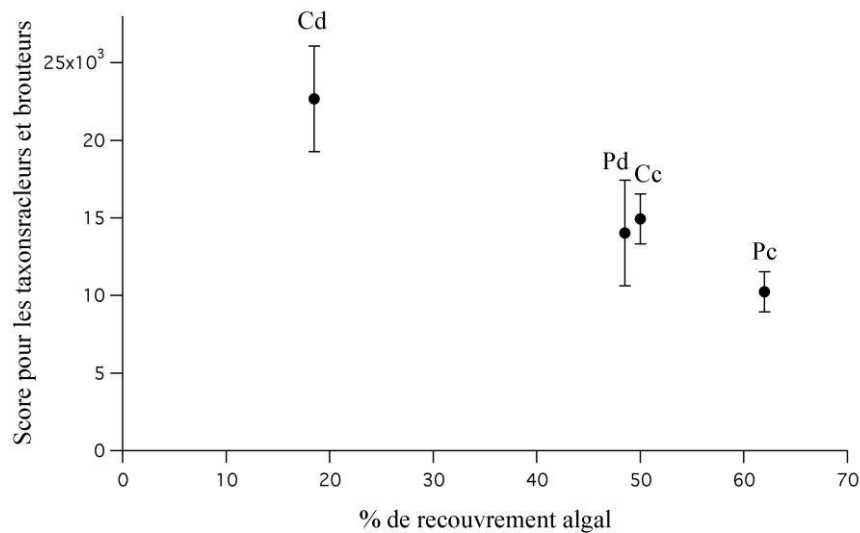


Figure 5.4: Score obtenu pour l'ensemble des taxons associés au mode de brouteur et racleurs en fonction du pourcentage de recouvrement algal (station Piquette diversifiée (Pd), Piquette colmatée (Pc), Cessey diversifiée (Cd) et Cessey colmatée (Cc)).

V.3.2 Comparaison intra station

La comparaison de la répartition des espèces du peuplement benthique et piscicole entre les différents habitats de chaque station met en évidence une distribution hétérogène de la faune sur les différents habitats de la station. Les substrats à fortes anfractuosités présentent des densités et des variétés de ces peuplements plus riches.

La comparaison entre les substrats colmatés (par les algues, les concrétions calcaires et les fines) et les substrats non colmatés fait apparaître une abondance et une variété plus importante sur les substrats non colmatés pour le peuplement macrobenthique. Cet écart est moins net pour le peuplement piscicole, la différence entre les deux types de substrats se traduit principalement par une répartition hétérogène des espèces et des classes d'âge sur ces substrats.

D'autre part, les différents types de concrétions calcaires présentent une attractivité biogène qui dépend là encore de leur anfractuosité. Les densités et les abondances du macrobenthos relevé sur les nassiss sont bien supérieures à ceux enregistré sur les autres types de tufs, même si il existe aussi un écart entre les tufs expansés présentant un peuplement plus riche et les tufs lisses moins biogènes. En ce qui concerne le peuplement piscicole, cette comparaison se traduit principalement par une répartition des écostades suivant un gradient d'anfractuosité: les *truites* et les *chabots* favorisent les substrats avec anfractuosités élevées (nassiss et blocs), les stades les plus avancés des *vairons*, *blageons* et *loches franches* affectionnent les tufs avec anfractuosités alors que les stades les plus jeunes des *loches franches* et *blageons* sont principalement pêchés sur les tufs sans anfractuosités.

VI. CONCLUSION

L'objectif de cette étude a été de mieux comprendre les relations étroites entre les trois compartiments d'une rivière: l'eau, les sédiments et le compartiment biologique, dans la rivière calcaire à truite et à ombre de la Loue.

Le suivi du flux de fines a permis de montrer que ce flux se produit essentiellement lors des crues et peut varier d'un facteur 1000 entre les périodes d'étiage et de crues. Cet apport de fines a pour conséquence un enrichissement en phosphore dans le milieu aquatique et un apport en contaminants toxiques, dont principalement des HAP. Lorsque les conditions hydrologiques le permettent, ces fines se déposent et colmatent le fond du lit de la rivière. Ce phosphore piégé dans les sédiments est susceptible d'alimenter la colonne d'eau par des phénomènes de relargage et éventuellement entraîner des excès en nutriments dans le milieu pouvant provoquer une prolifération des algues.

Cette prolifération entraîne un colmatage des fonds qui se traduit par une baisse de la diversité habitacionnelle. A cela s'ajoute le problème propre aux rivières calcaires comme la Loue, le colmatage des fonds par des concrétions calcaires (tufs). Dans la Loue, trois types de tufication sont observés dont les conditions de formations doivent différer. En effet, les analyses cristallographiques de ces tufs révèlent des différences de structure. Cependant ces différentes conditions de formations ne sont pas encore clairement établies à ce jour.

Or, la comparaison du peuplement benthique et piscicole échantillonné au niveau de ces différents tufs montre clairement un gradient d'attractivité avec une préférence nette pour les nassis puis les tufs expansés. De plus, cette comparaison a permis de mettre en évidence l'attractivité de la faune pour les stations présentant une mosaïque habitacionnelle riche. Parallèlement, les substrats colmatés présentent moins d'attrait pour une faune riche et diversifiée que les substrats non colmatés.

Enfin, l'écart de recouvrement algal entre les stations colmatées et diversifiées situées à quelques centaines de mètre l'une de l'autre ne peut être expliqué par une différence d'excès en nutriment. La cause de cet écart est donc sans doute due à la différence de densité du macrobenthos observée entre ces deux stations et notamment de la densité de brouteurs et racleurs benthiques.

En prolongement de cette étude, il serait intéressant de quantifier le colmatage par les fines et par les développements algaux. Pour ce faire, associée aux observations de recouvrement algal, une mesure de la biomasse algale permettrait d'estimer la densité du colmatage par les algues sur les 4 stations. De la même manière, une évaluation de la proportion de fine dans les sédiments composant les gravières pourrait permettre de quantifier le phénomène du colmatage lié à l'apport de fines dans la Loue.

A plus long terme, les conditions d'habitabilité des différentes concrétions calcaires pour la faune benthique se révélant très différentes, la compréhension des facteurs à l'origine de leur formation est donc essentielle pour proposer un plan d'action global afin de limiter l'étendue du colmatage des fonds par les tufs les moins biogènes.

Une étude menée par la DIREN en 1993 (in Pitois, 2003) a montré que le dragage des fonds cimentés par les tufs n'est pas une solution rentable pour se débarrasser de ce problème. En effet, bien qu'après la destruction des tufs l'abondance d'invertébré est augmentée rapidement (augmentation de 12% pour les espèces inféodées aux galets en 1995), dès 1998, le lit de la rivière est à nouveau cimenté ce qui s'accompagne d'une chute de 50% de l'abondance d'invertébrés. Ainsi, le traitement du problème de ce type de colmatage par des moyens mécaniques n'est pas viable, il est donc indispensable de comprendre les mécanismes responsables de leur formation pour employer des moyens d'action à long terme.

BIBLIOGRAPHIE

- Adam, O., 2008.** Impacts des produits de traitement du bois sur les amphipodes *Gammarus pullex* (L.) et *Gammarus Fossarum* (K.): approche chimique, hydro-écologique et écotoxicologique. Thèse de Doctorat. Université de Franche-Comté, 238p.
- Agence de l'eau, 1995.** Qualité des eaux superficielles, Bassin de la Loue, 95p.
- Arp, G., Wedemeyer, N. et Reitner, J., 2001.** Fluvial tufa formation in a hard-water creek (Deinschwanger Bach, Franconian Alb, Germany). *Facies*, vol.44, p. 1–22.
- Barry J. F. Biggs, B.J.F., Goring, D.G., Nikora, V.I., 1998.** Subsidy and stress responses of stream periphyton to gradients in water velocity as a function of community growth form. *Journal of Phycology*, vol. 34, Issue 4, p. 598–607.
- Bilotta G.S. et Brazier R.E., 2008.** Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota, *Water Research*, vol. 42, p. 2849-2861.
- Bloesch, J. et Burns, N.M., 1980.** A critical review of sedimentation trap technique. *Aquatic Sciences- Research across boundaries*, vol. 42, p. 15-55.
- Bo T., Fenoglio S., Malacarne G., Pessino M. et Sgariboldi F., 2007.** Effects of clogging on stream macroinvertebrates: An experimental approach, *Limnologica-Ecology and Management of Inland Waters*, vol. 37, p. 186-192.
- Carpenter, S. R., Caraco, N. F., Correll, D. L. , Howarth, R. W., Sharpley A. N. et Smith, V. H., 1998.** Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, vol 8, p.559–568.
- Collins, A.L. et Walling, D.E., 2007.** Sources of fine sediment recovered from the channel bed of lowland groundwater-fed catchments in the UK, *Geomorphology*, vol. 88, p. 120-138.
- CSP DR5, 1995.** Réseau National de Bassin ; mise en place du suivi piscicole. *Rapport DR508-95. Etude réalisée pour l'agence de l'eau RMC*, 36p.+ annexes.
- Decourcière H. et Martin B., 1998.** Situation typologique et qualité écologique actuelle de l'hydrosystème Hzaute-Loue. Rapp. DESS, Univ f Comté, I.S.T.E.
- Degiorgi , F. et Raymond, J.C., 2003.** Guide technique : Utilisation de l'ichtyofaune pour la détermination de la qualité globale des écosystèmes d'eau courante. 197 p. + annexes.
- DIREN, 1997.** Qualité des eaux superficielles. Bassin de la Loue (données 1995). 94p.
- Dodds, W., 2003.** The role of periphyton in Phosphorus retention in shallow freshwater aquatic system. *Journal of Phycology*, vol. 39, Issue 5, 840 p.
- Frossard, V., 2006.** Etude des proliférations algales sur la Loue : Eté 2006. Rapport de Master 2, Université de Franche Comté, 103 p.
- Greig S.M., Sear D.A. et Carling P.A., 2005.** The impact of fine sediment accumulation on the survival of incubating salmon progeny, Implications for sediment management, *Science of the Total Environment*, vol. 344, p. 241-258.
- HAURY et al. 2000.** Les macrophytes aquatiques bioindicateurs des systèmes lotiques. Intérêts et limite des indices macrophytiques. Agence de l'eau Artois Picardie, 101p.

- Kano A., Matsuoka J., Kojo T., Fujii H., 2003.** Origin of annual laminations in tufa deposits, southwest Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* vol. 191, p. 243-262.
- Kemp P., Sear D., Collins A., Naden P. et Jones I., 2011.** The impacts of fine sediment on riverine fish, *Hydrological Processes*, Published online in Wiley Online Library.
- Lefebvre, S., 2003.** Interface eau-sédiments des cours d'eau en région agricole : rôle dans les cycles biogéochimiques. Thèse de Doctorat. Université de Rennes 1. 288p.
- Lenzi, M.A.; Marchi, L., 2000.** Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites (northeastern Italy), *Catena*, vol. 39, p. 267-282.
- Mahler, B.J.; Lynch, F.L., 1999.** Muddy water: temporal variation in sediment discharging from a karst spring, *Journal of Hydrology*, vol. 214, p. 165-178.
- Malavoi, J.R., 2006.** Etude géomorphologique de la Loue, Phase I : diagnostic, 130p.
- Marxsen, J. et Schmidt, H.-H., 1993.** Extracellular phosphatase activity in sediments of the Breitenbach, a central European mountain stream. *Hydrobiologia*, vol. 253, p. 207-216.
- Morillas, N., 1994.** Ecologie des poissons en rivière: application à une nouvelle méthode d'échantillonnage. Mémoire de DUEHH Univ. Franche-Comté.
- Nelson, E.J.; Booth, D.B., 2002.** Sediment sources in an urbanizing, mixed land-use watershed. *Journal of Hydrology*, vol. 264, p. 51-68.
- Nisbet, M. et Verneaux, J., 1970.** Composantes chimiques des eaux courantes, discussions et propositions de classes en tant que bases d'interprétation des analyses chimiques. *Annales de Limnologie*, vol 6., Issue 2, p. 167-190.
- Owens, P.N., Walling, D.E., 2002.** The phosphorus content of fluvial sediment in rural and industrialized river basins. *Water Research*, vol. 36, p. 685-701.
- Owens P.N., Batalla R.J., Collins A.J., Gomez B., Hicks D.M., Horowitz, A.J., Kondolf G.M., Marden M., Page M.J., Peacock D.H., Petticrew, E.L., Salomons W., Trustrum N.A., 2005.** Fine-grained sediment in river systems: environmental significance and management issues. *River Res Applications*, vol. 21, p.693-717.
- Persaud D, Jaagumagi R, Hayton A., 1993.** Guidelines for the protection and management of aquatic sediment quality in Ontario. Ontario Ministry of Environment and Energy. Ontario: Queens Printer for Ontario.
- Pitois F., Jigorel A. & Bertru, G., 2003.** Development of cyanobacterial build-up and evolution of river bed morphology in the chalk stream Eaulne (Upper Normandy, France), *Biodiversity and Conservation*, vol. 12, p. 621-636.
- Pitois, F., Jigorel, A. et Ferlin, P., 2005.** Constructions cyanobactériennes calcaires dans les rivières de Haute-Normandie : perspectives de gestion. *InterCeltic colloquium on hydrology and management of water resources N°4*, vol 310, p.120-127.
- Poff, N.L.R., Voelz, N.J., Ward, J.V. et Lee, R.E., 1990.** Algal colonization under four experimentally-controlled current regimes in high mountain stream. *Journal of the North American Benthological Society*, vol. 9, p. 303-318.

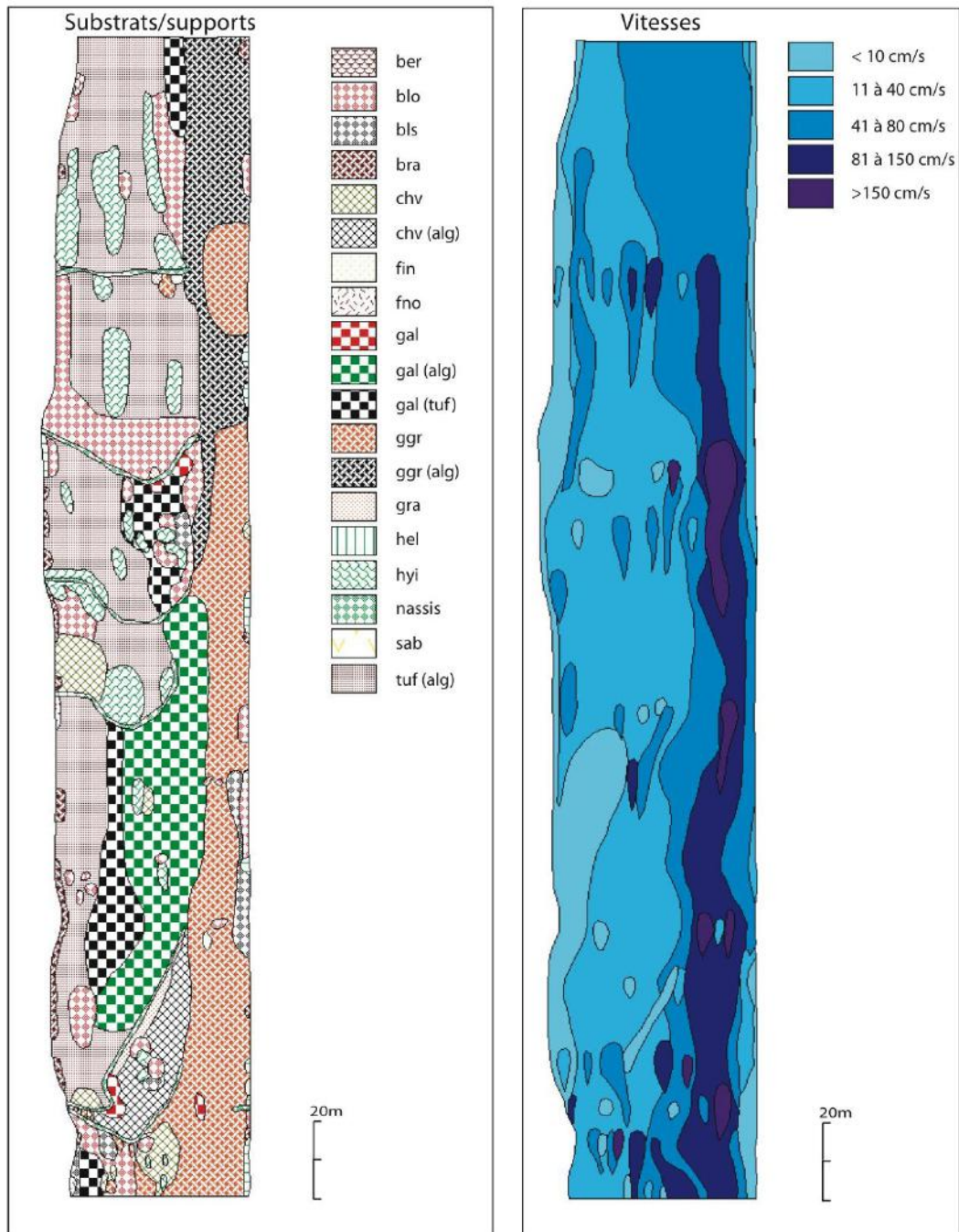
- Primc-Habdija, B., Habdija, I. et Plenkovic-Moraj, A., 2001.** Tufa deposition and periphyton overgrowth as factors affecting the ciliate community on travertine barriers in different current velocity conditions. *Hydrobiologia*, vol. 457, p. 87–96.
- Rabeni C.F., Doisy K.E. et Zweig L.D., 2005.** Stream invertebrate community functional responses to deposited sediment, *Aquatic Sciences*, vol. 67, p. 395-402.
- Russell, M.A.; Walling D.E.; Hodgkinson, 2001.** Suspended sediment sources in two small lowland agricultural catchments in the UK, *Journal of Hydrology*, vol. 252, p. 1-24.
- Smith, B.P.G., Naden, P.S., Leeks, G.J.L. et Wass, P.D., 2003.** The influence of storm events on fine sediment transport, erosion and deposition within a reach of the River Swale, Yorkshire, UK. *The Science of the Total Environment*, vol. 314-316, p. 451-474.
- Saint-Olympe, L., 2005.** Contribution à l'étude de l'écologie de l'Apron du Rhône (Zingel asper). Rapport de Master 2, Université de Franche Comté. 58p+ ann.
- Scarsbrook, M. R. et Townsend C. R., 1993.** Stream community structure in relation to spatial and temporal variation: a habitat templet study of two contrasting New Zealand streams. *Freshwater Biology*, vol.29, Issue 3, p. 395–410.
- Smith, V. H., Tilman, G. D. et Nekola, J. C., 1999.** Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental pollution*, vol. 100, p. 179–196.
- Tachet, H., Richoux, P., Bournaud, M., Usseglio-polatera, P., 2010.** Invertébrés d'eau douce - Systématique, biologie et écologie. CNRS Editions. 588 p.
- Téléos, 2002.** Etude des potentiels écologiques aquatiques des sites Natura 2000 de la Loue et du Lison, 87p + ann.
- Tomczak, J., 2004.** Synthèse bibliographique, Eutrophisation et proliférations végétales en milieu continental, Rapport de DESS, Université de Franche Comté, 50p.
- Vacelet, E., 2008.** Etude du développement algal et des micropolluants de la Loue. Rapport de Master 2, Université de Franche Comté. 136p.
- Verneaux J. 1973.** Cours d'eau de Franche-Comté. Recherche sur le réseau hydrographique du Doubs. Essai de biotypologie. Thèse d'Etat Univ. Fr. Comté, Besançon, 257 p.
- Verneaux, J., 1982.** Expression biologique qualitative et pratique, de l'aptitude des cours d'eau au développement de la faune benthique. Un coefficient d'aptitude biogène : le Cb2. *Trav. Cent. Hydrobiol. Univ. Besançon*, 20 p.
- Walling, D.E.** Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems. *Science of the Total Environment*, 2005, vol. 344, p. 159-184.
- Wood, P. J. et Armitage, P. D., 1997.** Biological effects of fine sediments in the lotic environment. *Environment Management*, vol. 21, p. 203-217.

ANNEXES

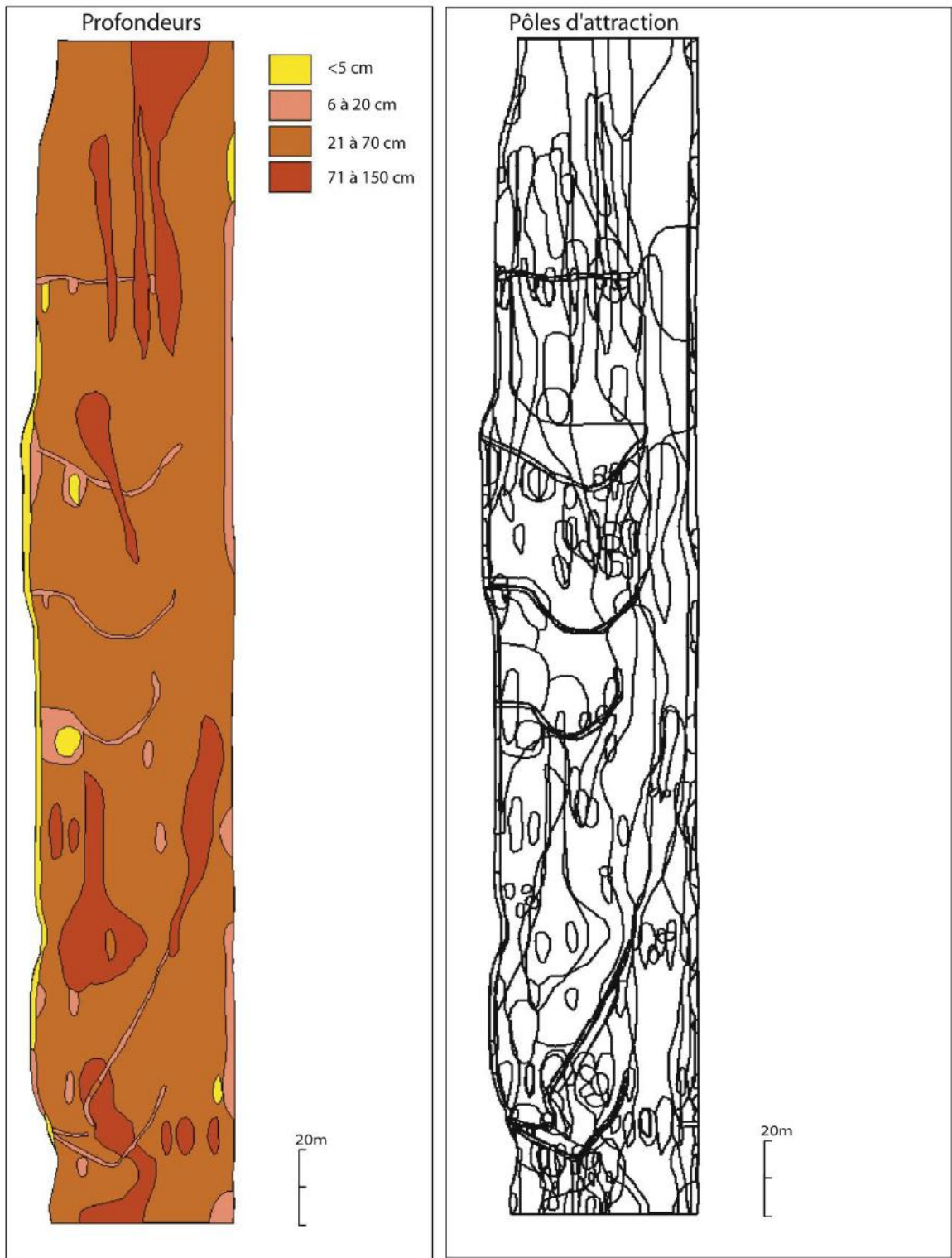
Annexe 1: Cartographies des habitats des 4 stations

bra	branchage, grosses racines	gra	graviers
ber	sous-berges	nassis	nassis
hyi	hydrophytes	bls	tufs avec infractuosités
blo	blocs avec caches	tuf	tuf sans infractuosités
gal	galets	lit	litières organiques
gls	galets pavés (tufés)	sab	sables
hel	hélophytes	fin	éléments fins, limons
chv	chevelu racinaire, végétations rases (chv)	fno	fonds nus organique, vases
ggr	galets et graviers mélangés	dal	dalles, surfaces indurés

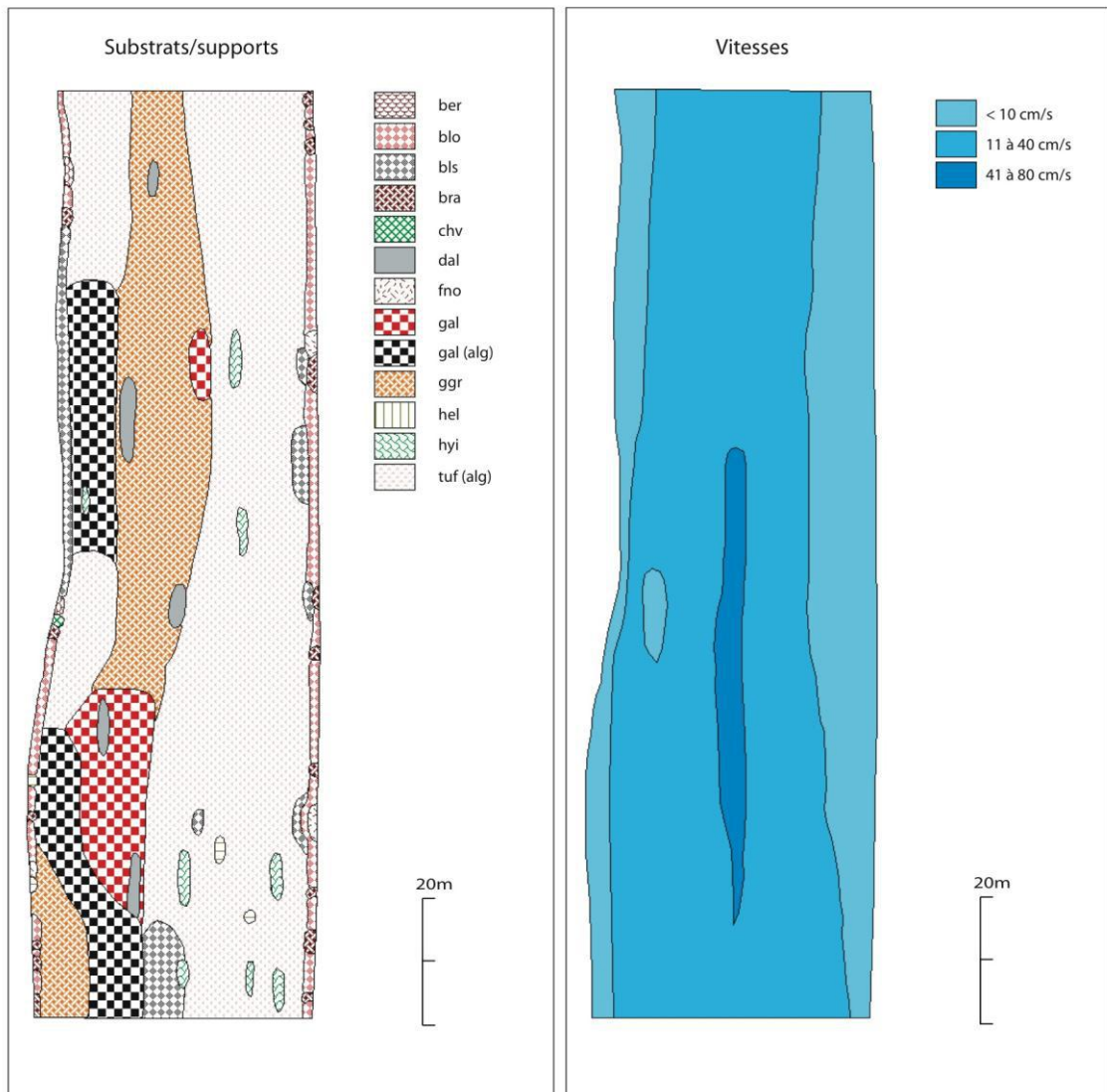
Piquette diversifiée



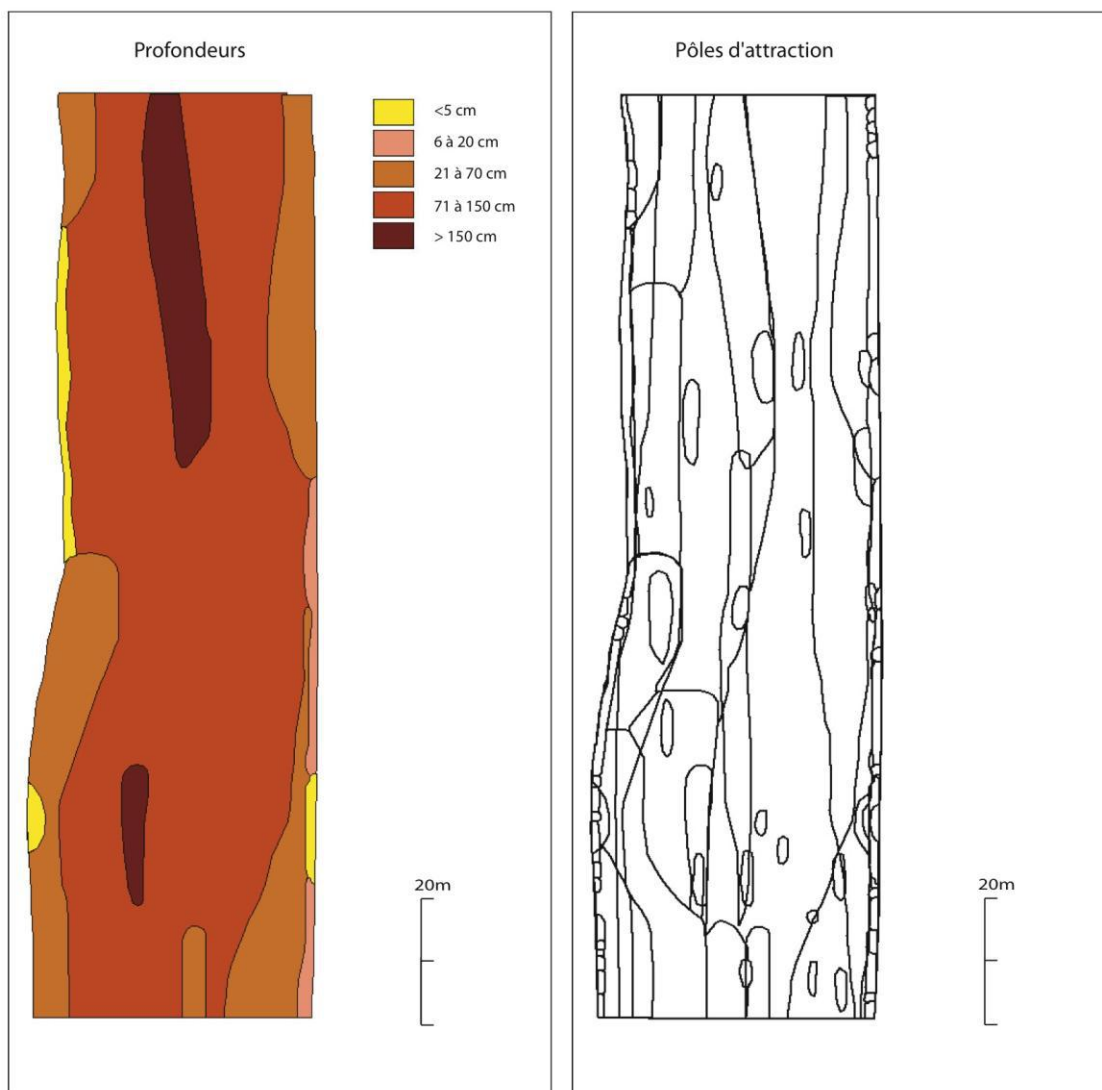
Piquette diversifiée



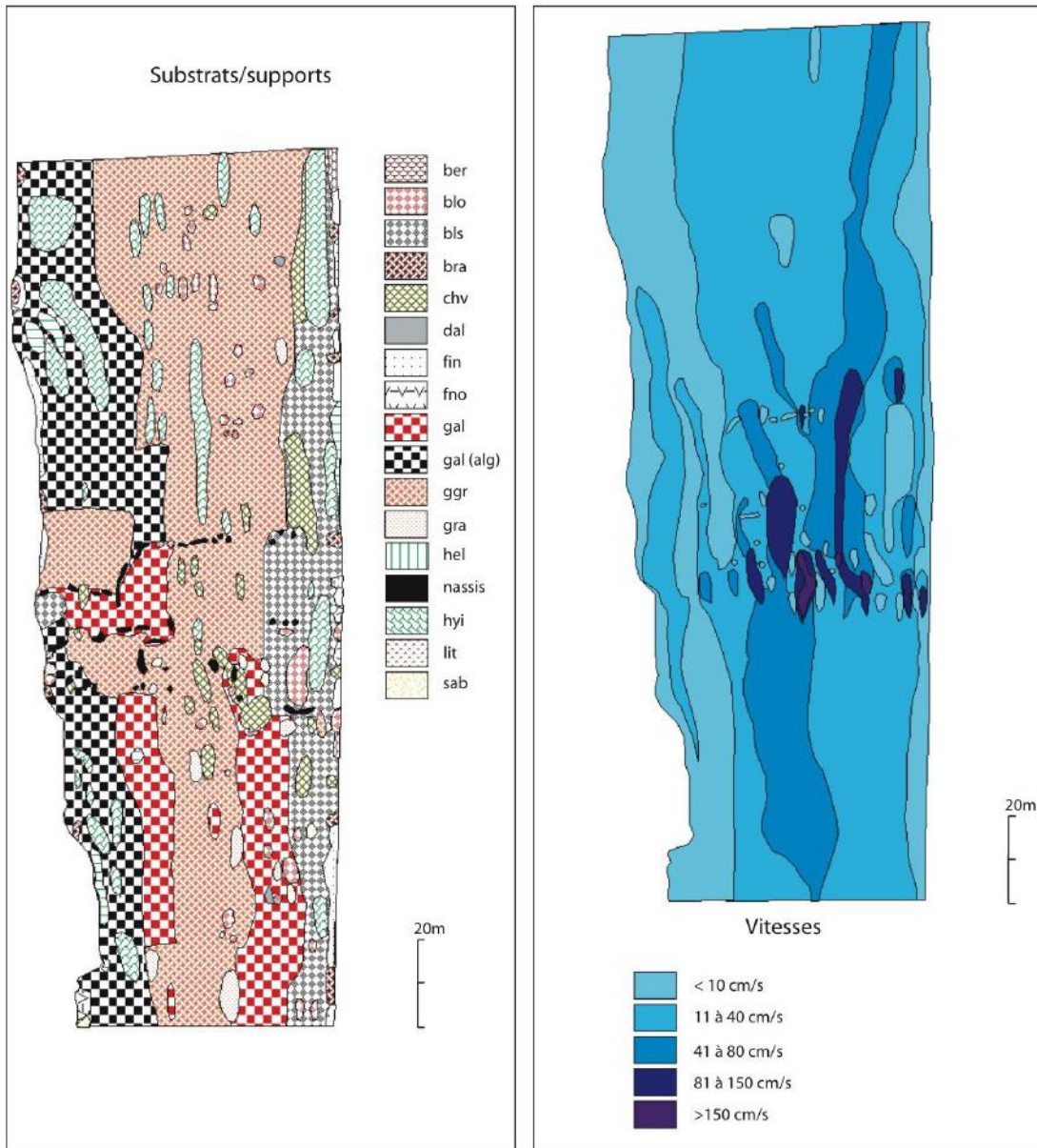
Piquette colmatée



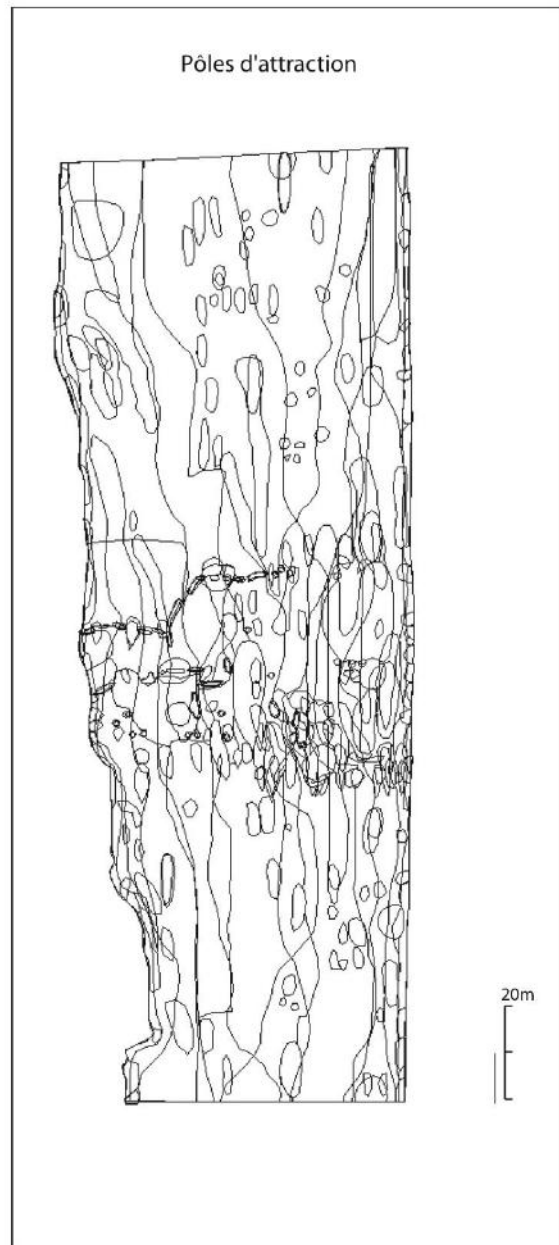
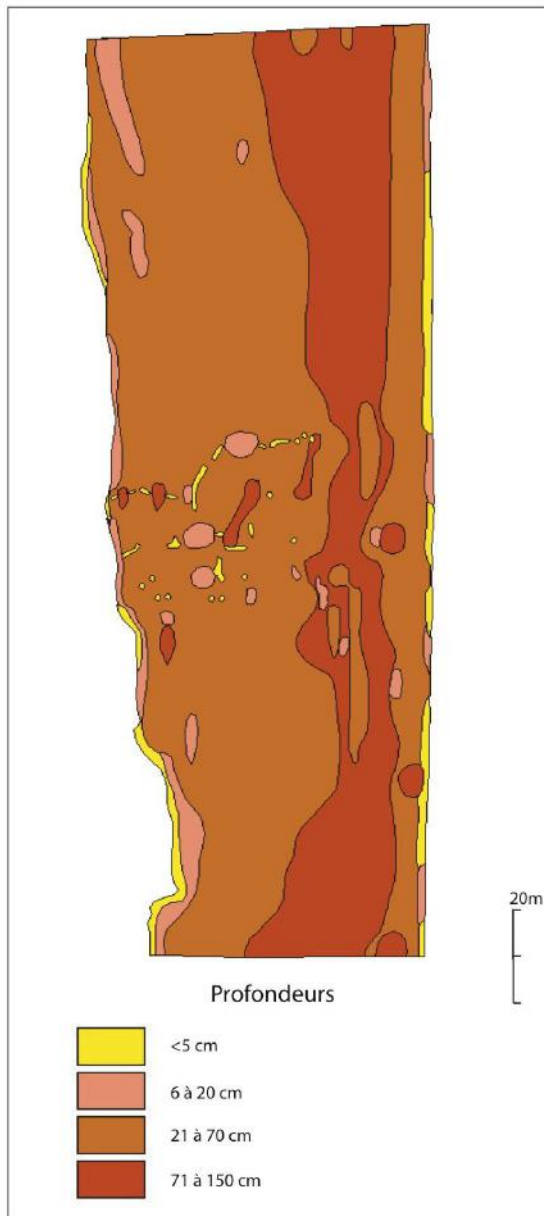
Piquette colmatée



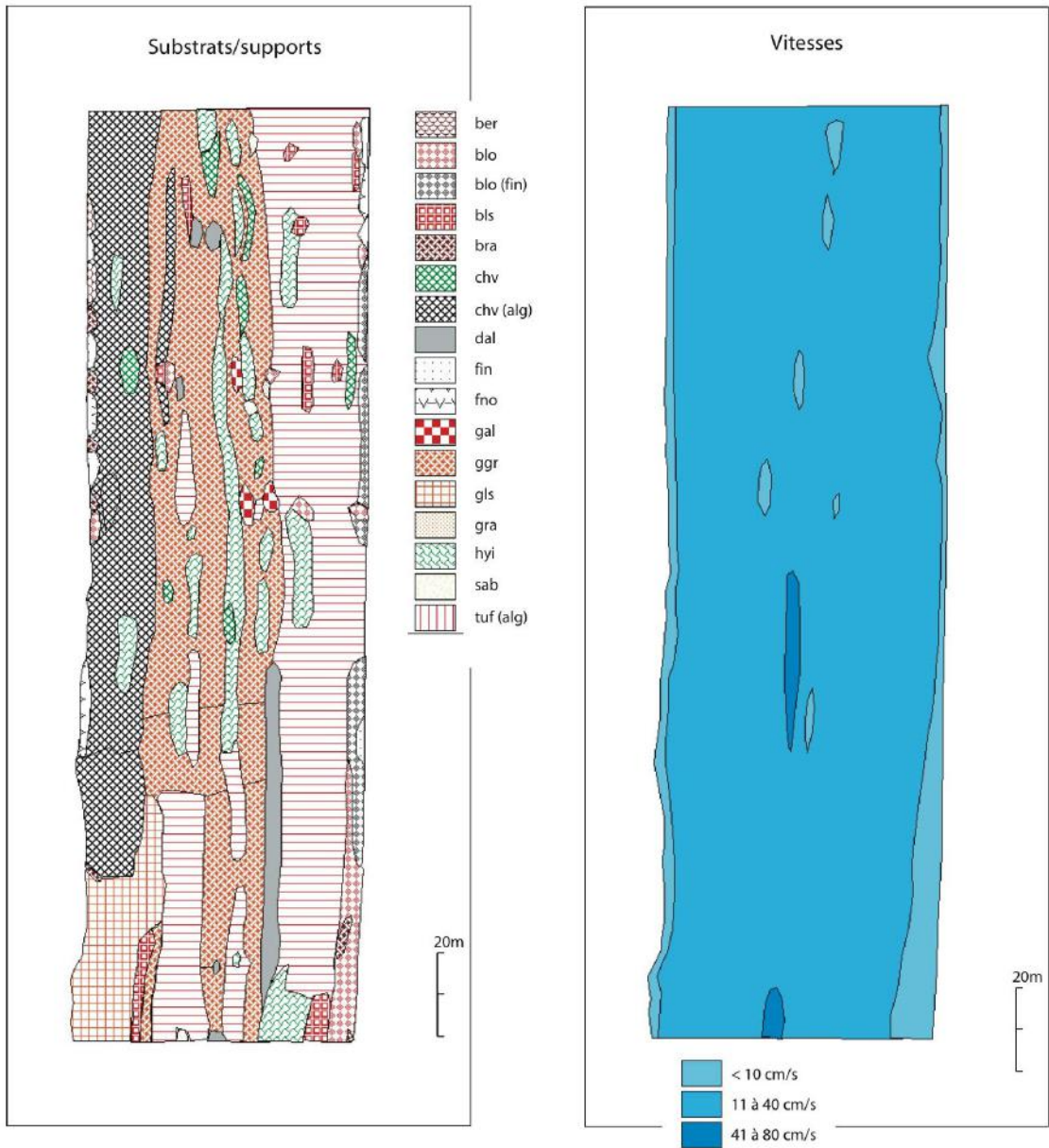
Cessey diversifiée



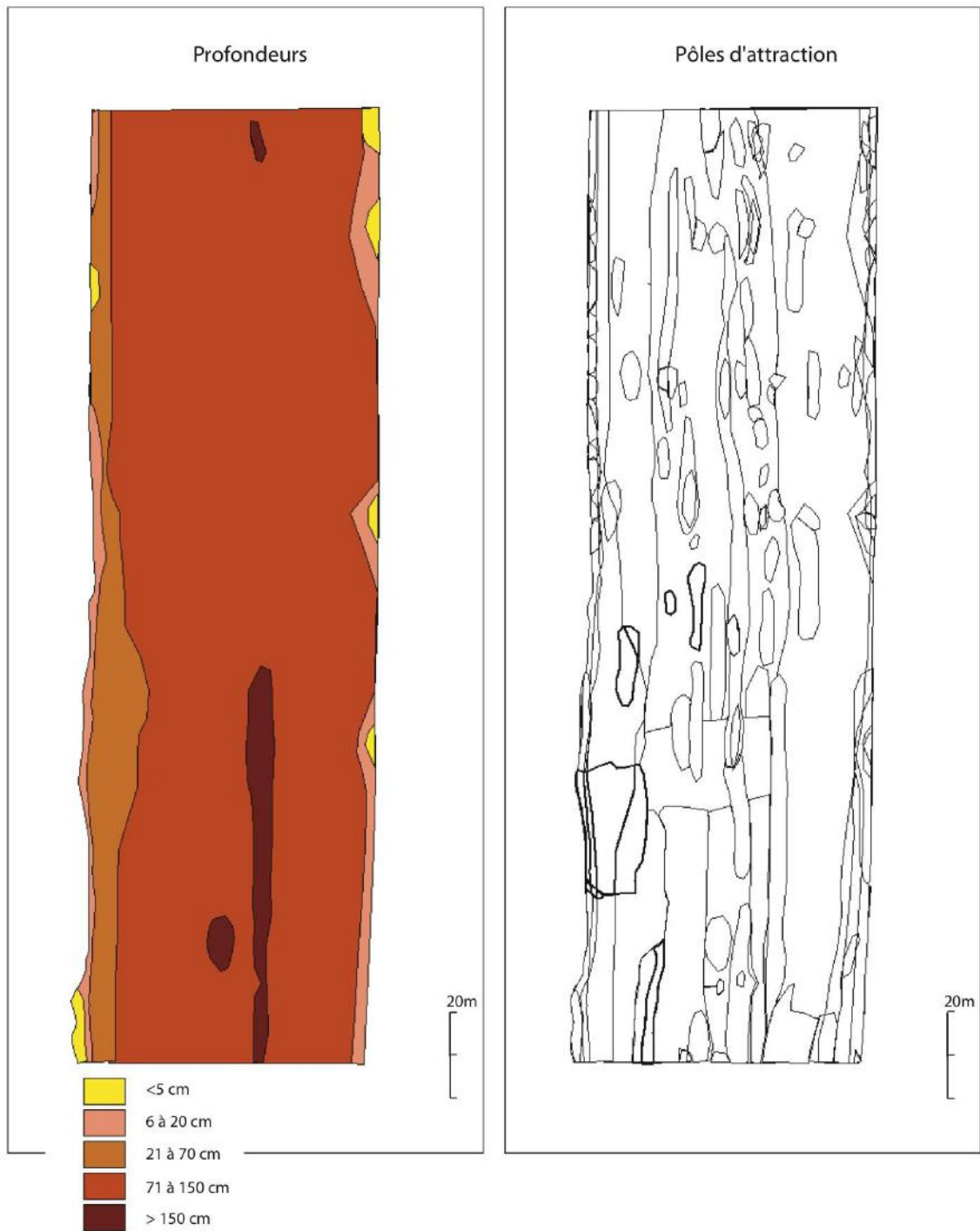
Cessey diversifiée



Cessey colmatée



Cessey colmatée



Annexe 2: Résultats des mesures des concentrations en MES

		30/05/2011			
		Débits Chenecey-Buillon: 7,37 m3/s			
		Débit Lison à Myon : 1,13 m3/s			
		Débit estimé à la Piquette: 7,37-1,13=6,24 m3/s			
Méthode		Cessey diversifiée	Cessey colmatée	Piquette diversifiée	Piquette colmatée
Filtration par pression	Concentration MES (mg/L)	3,9 ±1	8,5 ±0,2	3,67 ±0,9	7 ±0,2
	Flux de fines (g/s)	28,7	62,6	22,9	43,7
Laboratoire de Chimie des Eaux	Concentration MES (mg/L)	<2		<2	
	Flux de fines (g/s)	<14,7		<12,5	

		08/06/2011			
		Débits Chenecey-Buillon: 40 m3/s			
		Débit Lison à Myon : 2,7 m3/s			
		Débit estimé à la Piquette: 37,3 m3/s			
Méthode		Cessey diversifiée	Cessey colmatée	Piquette diversifiée	Piquette colmatée
Laboratoire de Chimie des Eaux	Concentration MES (mg/L)	4,6	4,3	21	13
	Flux de fines (g/s)	184,0	172,0	783,3	484,9

		22/06/2011			
		Débits Chenecey-Buillon: 8,61 m3/s			
		Débit Lison à Myon : 1,18 m3/s			
		Débit estimé à la Piquette: 7,43 m3/s			
Méthode		Cessey diversifiée	Cessey colmatée	Piquette diversifiée	Piquette colmatée
Laboratoire de Chimie des Eaux	Concentration MES (mg/L)	<2		<2	
	Flux de fines (g/s)	<17,2		<14,9	

		18/07/2011			
		Débits Chenecey-Buillon: 75 m3/s			
		Débit Lison à Myon :			
		Débit estimé à la Piquette: m3/s			
Méthode		Cessey diversifiée	Cessey colmatée	Piquette diversifiée	Piquette colmatée
Laboratoire de Chimie des Eaux	Concentration MES (mg/L)	30		15	
	Flux de fines (g/s)	2250		975,0	

		20/07/2011			
		Débits Chenecey-Buillon: 40 m3/s			
		Débit Lison à Myon :			
		Débit estimé à la Piquette: m3/s			
Méthode		Cessey diversifiée	Cessey colmatée	Piquette diversifiée	Piquette colmatée
Laboratoire de Chimie des Eaux	Concentration MES (mg/L)	9,2		5,3	
	Flux de fines (g/s)	368		190,8	

		02/08/2011			
		Débits Chenecey-Buillon: 13,6 m3/s			
		Débit Lison à Myon : m3/s			
		Débit estimé à la Piquette: m3/s			
Méthode		Cessey diversifiée	Cessey colmatée	Piquette diversifiée	Piquette colmatée
Laboratoire de Chimie des Eaux	Concentration MES (mg/L)	<2		<2	
	Flux de fines (g/s)	<27,2		<24	

Annexe 3: Résultats des analyses sur les eaux

Paramètre	30/05/11		8/06/11		22/06/11		18/07/11		20/07/11		2/08/11	
	Piquette Aval	Cessey Aval	Cessey Amont	Piquette Aval	Piquette Amont	Piquette Aval	Cessey Aval	Piquette Aval	Cessey Aval	Piquette Aval	Cessey Aval	Piquette Aval
DBO1+5 non diluée (mg de O2/L)	1,8	1,7	1,1	1,5	1,5	1,3	1,3	2,2	1,5	2,1	0,6	0,8
ST-DCO (mg/L)	4,5	3,6	5,1	7,4	6,8	7,3	10,6	4,5	6	4,3	5,3	5,3
Maxi_res En Suspension Totales (mg/L)	<2	<2	4,6	21	13	<2	30	5,3	9,2	<2	<2	<2
Nitrates (mg/L)	0,04	0,03	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,02	0,03
Phosphore total (mg/L)	<0,03	<0,03	<0,03	0,08	0,07	<0,03	<0,03	0,06	0,06	0,05	<0,03	<0,03
Nitrates (mg/L)	3,7	2,5	6,2	7,7	7,6	3,6	9,3	8,87	8,3	7,59	4,4	3,4
Carbone Organique Dissout (mg(C)/L)	1,5	1,64	1,61	1,84	1,86	2,45	2,67	2,79	2,94	3,14	2,02	2,2
Carbone Organique Total (mg(C)/L)	1,76	2	1,73	2,09	2	2,3	<1	<1	2	1,6	2,3	2,7
Azote Kjeldahl (mg/L)	1,1	1	2,6	1,2	1,1	2	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,10	<0,10
Ammonium (mg/L)	0,14	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,11	0,16	0,13	0,12	<0,05	<0,10	<0,10
Phosphates (mg/L)	<0,10	<0,10	<0,10	0,11	0	0,23	0,16	0,13	0,12	<0,10	<0,10	<0,10
DBO5/DCO	2,50	2,12	4,64	4,93	4,53	5,62	4,77	4,82	3,00	2,86	7,17	6,63

Annexe 4 : Résultats des pêches par CAPPE

	Pd		Pc		Cd		Cc	
	ind/10ares	total/esp	ind/10ares	total/esp	ind/10ares	total/esp	ind/10ares	total/esp
CHA(0+)	95,5		89,3					
CHA(Juv)	293,7		235,8		248,7		201,0	
CHA(Ad)	214,3	603,6	141,6	466,7	137,9	386,6	60,8	261,8
VAI(O+)			855,4		719,7		407,5	
VAI(1+)					5,7			
VAI(Juv)	1555,1		136,4		1482,3		301,6	
VAI(Ad)	1209,7	2764,7	1003,7	1995,5	1504,1	3711,8	540,6	1249,8
TRF(0+)	7,1				4,4		2,6	
TRF(Juv)					95,3		18,4	
TRF(Ad)	109,0	116,0	65,5	65,5	221,6	321,3	67,1	88,1
LOF(0+)	195,0		3659,5		2,7			
LOF(Juv)	554,7		393,2		348,8		67,4	
LOF(Ad)	2621,0	3370,6	2528,4	6581,1	705,0	1056,5	843,7	911,0
LPP(Juv)	19,5	19,5	24,3	24,3	90,7	90,7	12,4	12,4
BAF(0+)					6,2			
BAF(Juv)				0,0	43,0	49,3	4,7	4,7
BLN(0+)			150,3					
BLN(Juv)			25,0		131,4		4,4	
BLN(Ad)				175,4	53,9	185,4	467,5	471,9
CHE(0+)			4,8					
CHE(Juv)				4,8	31,7	31,7	9,9	9,9
CHE(Ad)			4,5					
GOU(Juv)								
GOU(Ad)					3,2	3,2		
OMB(0+)	80,2							
OMB(Juv)	25,9	106,1		0,0		0,0		0,0

Cc : Cessey colmatée, Cd : Cessey diversifiée, Pc : Piquette colmatée, Pd : Piquette diversifiée

CODE POISSON

BAF	Barbeau	LOF	Loche franche
BLN	Blageon	LPP	Lamproie de planer
CHA	Chabot	OBR	Ombre
CHE	Chevaine	TRF	Truite fario
GOU	Goujon	VAI	Vairon

O+	de l'année	Juv	Juvénile
1+	1 an	Ad	Adulte

Piquette aval

SubsSup1	v	h	CHA(0+)	CHA(Juv)	CHA(Ad)	VAI(Juv)	VAI(Adulte)	TRF(0+)	TRF(Ad)	LOF(0+)	LOF(Juv)	LOF(Ad)	LPP(Juv)	OMB(0+)	OMB(Juv)
alg	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0
ber	2	3	0	0	0	0	2	0	3	0	0	0	3	0	0
ber	2	3	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0
blo(tuf)	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
blo(tuf)	3	3	0	3	1	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0
blo(tuf)	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
bls(chv)	1	3	0	0	0	0	0	0	0	2	2	3	0	0	0
bls(chv)	2	3	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0
bls(hvi)	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
bls	2	4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0
bra	1	3	0	0	0	17	3	0	7	0	0	1	0	0	0
bra	2	3	0	0	0	0	2	0	3	0	0	2	0	0	0
chv(alg)	1	3	0	0	0	3	0	0	0	0	1	2	0	0	0
chv(alg)	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0
chv	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
chv	2	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
chv	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0
chv	3	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
frm	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
frm	1	3	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	10	0	0
gal(alg)	2	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
gal(alg)	2	3	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0
gal(alg)	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
gal(alg)	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
gal	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
ggr(alg)	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
ggr(alg)	2	2	0	0	0	2	0	0	0	0	3	5	0	0	0
ggr	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ggr	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ggr	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ggr	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ggr	3	3	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0
ggr	3	3	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	1	0
ggr	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ggr	4	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ggr	4	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ggr	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
gra	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
hvi(alg)	2	3	0	0	0	1	3	0	0	3	5	9	0	0	0
hvi(alg)	2	3	0	0	0	0	4	1	0	0	0	3	0	0	0
hvi(alg)	3	3	0	3	4	0	4	1	0	0	0	4	0	0	0
hvi(alg)	2	4	0	0	0	3	0	0	0	0	0	2	0	0	0
hvi	3	2	2	0	0	0	1	0	0	0	2	5	0	0	0
hvi	2	3	1	0	0	0	2	0	0	0	2	11	0	0	0
hvi	2	3	0	0	0	6	4	0	0	0	1	1	0	0	0
hvi	2	3	0	0	0	5	3	0	0	0	0	3	0	0	0
hvi	3	3	0	0	0	0	11	0	0	0	4	1	0	0	0
hvi	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
hvi	3	4	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
lit	1	2	0	0	0	1	0	1	0	0	0	12	6	0	0
nassis	3	3	0	1	1	0	2	0	0	0	0	6	0	0	0
nassis	4	3	1	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
nassis	5	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tuf(alg)	2	3	0	0	0	0	2	0	0	1	1	5	0	0	0
tuf(alg)	2	3	0	0	0	14	5	0	0	1	1	9	0	0	0
tuf(alg)	2	3	0	1	0	4	6	0	0	0	0	3	0	0	0
tuf(alg)	2	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tuf(chv)	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tuf(chv)	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tuf(chv)	3	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0
tuf(hvi)	2	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

Piquette amont

SubsSup1	He (cm)	V (cm/s)	CHA(0+)	CHA(Juv)	CHA(Ad)	VAl(0+)	VAl(Juv)	VAl(Adulte)	TRF(Ad)	LOF(0+)	LOF(Juv)	LOF(Ad)	LPP(Juv)	BLA(0+)	BLA(Juv)	CHE(0+)	CHE(Ad)
Tuf(Chv/alg)	3	2	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
Tuf(Chv/alg)	3	1	0	0	0	0	0	0	0	3	0	4	0	0	0	0	0
Tuf(Chv/alg)	3	2	0	0	0	1	0	0	0	6	2	0	0	0	0	0	0
Tuf(Chv/alg)	3	2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tuf(hvi)	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Tuf(hvi)	4	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Tuf	4	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tuf	4	2	0	0	1	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hvi	3	2	0	0	1	0	0	2	1	2	0	1	0	0	0	0	0
Tuf(Chv/alg)	4	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tuf(Chv/alg)	4	2	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Tuf(Chv/alg)	4	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tuf(Chv/alg)	4	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Tuf	3	2	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0
Fin	3	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	10	0	0	0	0
Blo	3	1	0	0	2	3	1	1	0	1	0	17	0	0	0	0	0
Tuf(Chv/alg)	4	2	0	0	0	0	0	0	0	2	1	2	0	0	0	0	0
Tuf	4	2	0	0	0	1	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0
Tuf(chv)	4	2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
Hvi	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Tuf(Chv/alg)	4	2	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0
Tuf	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tuf	4	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tuf(hvi)	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Bra	3	1	0	0	0	0	6	90	3	0	0	0	0	21	0	0	2
Tuf	4	2	0	0	0	2	0	0	0	2	1	1	0	0	0	0	0
Tuf	4	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Hvi	4	3	0	1	2	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
Tuf	4	3	0	0	0	1	0	0	0	3	0	1	0	0	0	0	0
Hvi	4	2	0	0	0	5	3	0	0	1	0	1	0	2	0	0	0
Tuf	4	2	0	0	0	1	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0
Tuf	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Blo	3	1	0	0	0	0	0	13	0	0	0	8	0	0	0	0	0
Fin	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tuf	4	2	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Tuf	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tuf	4	2	0	0	0	10	0	0	0	1	0	0	0	5	0	0	0
Hvi	4	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0
Tuf	4	2	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	1	0	0	0
Bra	3	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	4	0	0	0	0
Tuf	4	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
Bra	4	1	0	0	0	0	0	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0
Gal	4	3	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
ggr	4	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gal(alg)	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gal(alg)	3	2	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0
Gal(alg)	3	2	0	1	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0
ggr(alg)	4	2	0	1	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0
ggr(alg)	3	2	0	0	0	2	0	0	0	6	0	1	0	0	0	0	0
ggr	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0
ggr(alg)	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0
Bra	3	1	0	0	0	7	1	0	1	0	0	4	0	3	0	0	0
gls(alg)	3	1	0	0	0	22	2	0	0	2	1	1	0	2	0	0	0
Hel	3	1	0	0	0	14	10	10	0	3	1	12	0	2	0	0	0
Gal(alg)	4	2	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0
Chv	4	1	0	0	1	0	10	0	0	0	5	0	0	0	4	0	0
Tuf	4	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
Gal(alg)	4	2	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0
Blo	4	1	0	0	1	2	0	10	1	0	0	8	0	0	0	0	0
gls(alg)	4	2	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0
Fno	3	1	0	0	0	15	12	3	0	0	0	1	2	2	0	0	0
Ber	4	1	0	0	0	0	0	1	2	0	0	1	0	0	10	0	2

Cessey aval

SubsUp	v	h	CHA(Juv)	CHA(Ad)	VAI(O+)	VAI(1+)	VAI(Juv)	VAI(Adulte)	TRF(O+)	TRF(Juv)	TRF(Ad)	LOF(O+)	LOF(Juv)	LOF(Ad)	LPP(Juv)	BAR(O+)	BAR(Juv)	BLA(Juv)	BLA(Ad)	CHE(Juv)	GOU(Ad)
FNO	1	2			13									4							
FNO	1	2			33																
ggr(alg)	2	3			1																
ggr	2	3																			
ggr	2	3																			
gal	3	3						2													
ggr	2	3						1													
gal	3	2																			
HYI	2	2			6		1						3	4							
HYI	2	2	1		2		3						2	1							
LJT	1	2			28	4										3					
ggr	2	2					8					1	1								
ggr	3	3						1													
ggr	4	3	1																		
ggr	5	3																			
nassis	2	3		1				4			1			1							
Bls	1	3		1				1			1										
ggr	3	2																			
Bls	3	3	1	1			1	5					1	1							
Bls	2	4										3									
nassis	3	3		1							1										
Bls	1	2			30		10	8						1		1		12			
Nassis	2	4					8			1				2			1				
ggr	3	3						6													
HYI	2	3					5														
ggr	3	4						1													
nassis	4	3																			
Gls	2	4	1				1														
Bls	1	4								1											
HYI	2	3					2	1						3							
Chv	2	2	1				5						2	3						1	
FIN	2	3					7						1			4					
ggr	1	3						10													
gra	3	3						1													
Bra	2	4						2					1				1	5	26		
FNO	1	3												4		5					
HEL	1	2					28	1						2	2						7
BLO	1	2	1	1			1	1						1	2						
BRA	2	2						3			4							4	5		
Bls	1	3	2				16	1					1	2			1	2			
nassis	1	2		1			5	1	1					6							
nassis	2	2	1																		
SAB	1	3					6	5													
Bls	2	4	1	1			1							1							
ggr	4	4																			
Bryo	5	3																			
Bls	3	3	1	1																	
Chv	5	3												1							
ggr	2	4																			
HYI	2	3					3			4	1										
Gal	2	3						2													
Hel	2	2					2						1								
Gls(alg)	1	3					1							3							
Gls(alg)	1	2					3						1								
Hel	1	2					1						1								
Hel	1	2					6							1							
Bra	1	2					12	7													
ggr	2	3																			
Bls	1	4		1										4							
Tuf	2	2	2				12	1						5							
Bra	2	3					1	6	1				3	4							1
Ber	2	2			1	1															

Cessey amont

SubsSupI	v	b	CHA(Juv)	CHA(Ad)	VAI(O+)	VAI(Juv)	VAI(Adulte)	TRF(0+)	TRF(Juv)	TRF(Ad)	LOF(Juv)	LOF(Ad)	LPP(Juv)	BAR(Juv)	BLA(Juv)	BLA(Ad)	CHE(Juv)
Tuf poreux	1	3		1		2											
Tuf poreux	2	3				1	1										
Tuf poreux	2	3					1					2					
Tuf poreux	1	3				1					1						
Tuf poreux	1	3				1						1					
Tuf poreux	1	4															
Bis	1	3		1								6					
Bra	1	3					2					1					
Ber	1	3					1									1	2
Tuf poreux	1	3															
Tuf hisse	1	3	1			4											
Tuf travertin	2	5															
tuf poreux	1	3										1					
tuf travertin	2	5					2					1					
hyi	1	3				3	1				2	4					
Tuf poreux	1	3				3									1		
Tuf poreux	1	3		1								2					
Blot(fin)	1	3		1								4					
Fin	1	2											1				
Tuf poreux	1	3			1	1					2	2					
Tuf poreux	1	3		1			2										
tuf travertin	2	5															
infractuosité tuf	2	3					1					1					
Tuf poreux	1	3				1											
hyi	1	3		1		3											
Tuf poreux	1	3															
Blot(fin)	1	3										6					
Fin	1	2			1							2	2				
Bra	1	2														40	1
hyi	2	3				3										6	
hyi	2	3				2	2										
hyi	2	2	2								1	4					
Tuf dalle	2	2			1												
hyi	2	3				3	2				2	8					
Tuf travertin	2	5								1							
hyi	2	3														9	
Blo	3	4	1				8										
tuf travertin	4	4					1										
Blo	2	3					2			1							
Blo	2	4					1										
hyi	2	3					3					5				1	
Gal(tuf)	2	4															
Gal(tuf)	2	4															
Gal(tuf)	2	4															
Chv	1	2		2					1			4					
Bra	1	3				4									2		14
Gal(tuf)	2	4				1											
Gal(tuf)	2	4									1						
tuf(alg)	2	4				3											
tuf(alg)	2	4					1										
hyi	1	3	1			1						2				2	
hryo	2	3				1											
Tuffbryo	2	4															
sous tuf	2	4					10										
bryo(alg)	2	4				1											
bryo(alg)	2	3	1									1					
hyi	1	3				18						1					
Ber	1	3				10			1			1					
hyi	2	3															
Fin	1	3															
Tuf travertin	2	4							1								
Blot(tuf)	2	4	1				3										
alg	1	4		1													

Annexe 5: Résultats des listes faunistiques sur les 4 stations

			Piquette Amont	Piquette Aval	Cessey Amont	Cessey Aval
			TOTAL MAG40	TOTAL MAG40	TOTAL MAG40	TOTAL MAG40
PLECOPTERES	Leuctridae	Leuctra	46	18	32	71
	Nemouridae	Protonemoura	1	1	0	2
		Nemoura	1	0	0	0
	Perlidae	Dinocras	2	13	0	0
	Perlodidae	Besdolus	0	0	0	7
EPHEMEROPTERES	Baetidae	Baetis	263	633	433	794
	Oligoneuridae	Oligoneurilla	0	0	0	7
	Heptageniidae	Ecdyonurus	6	7	4	27
		Rithrogena	0	6	0	28
	Caenidae	Caenis	67	21	108	171
	Ephemerellidae	Serratella ignita	2326	2125	2976	3608
		Torleya Major	176	207	87	105
	Leptophlebiidae	Paraleptophlebia	1	1	1	1
	Ephemeridae	Ephemera	70	91	97	100
	Potamantidae	Potamanthus	0	0	0	4
TRICHOPTERES	Goeridae	Goera	1	5	3	7
	Hydropsychidae	Hydropsyche	82	747	1602	679
		Cheumatopsyche Lepida	2	10	1598	2488
	Hydroptilidae	Hydroptila	122	107	13	4
	Lepidostomatidae	Lasiocephala	146	38	9	7
		Lepidostoma hirtum	331	144	366	449
	Leptoceridae	Athripsodes	29	68	463	373
		Ceraclea	1	2	9	12
		Oecetis	0	1	4	2
		Mystacides	1	0	3	0
	Limnephilidae	Anabolia	0	0	0	3
		Halesus	43	19	6	10
		Melampophylax	12	27	82	9
		Autres Limnephilinae	114	119	34	10
	Glossosomatidae	Agapetus	103	63	8	381
	Odontoceridae	Odontocerum albicorne	52	42	0	0
	Polycentropodidae	Holocentropus	0	0	4	1
		Polycentropus	11	2	7	3
	Psychomyiidae	Psychomyia	171	131	118	194
	Rhyacophilidae	Rhyacophila	10	45	39	50
Sericostomatidae	Sericostoma	286	245	45	23	
COLEOPTERES	Dytiscidae	Hydroporinae	5	0	2	5
	Elmidae	Elmis	196	938	455	850
		Esolus	68	151	203	610
		Stenelmis	14	60	178	172
		Limnius	73	106	263	848

		Oulimnius	133	45	266	240
		Riolus	96	53	363	282
	Gyrinidae	Orectochilus	2	1	4	11
	Scirtidae	Hydrocyphon	0	1	0	2
	Hydraenidae	Hydraena	3	6	0	1
DIPTERES	Anthomyiidae		0	0	0	1
	Athericidae		5	28	10	7
	Chironomidae		2702	6015	2681	4541
	Simuliidae		17	1973	643	2430
	Limoniidae		142	116	119	96
	Empididae		59	83	71	55
	Psychodidae		0	4	0	0
	Tabanidae		2	0	1	9
	Tipulidae		0	0	22	4
ODONATES	Calopterygidae	Calopteryx	3	0	0	4
MEGALOPTERES	Sialidae	Sialis	4	0	3	0
HETEROPTERES	Corixidae	Micronecta	0	1	0	1
AMPHIPODES	Gammaridae	Gammarus	819	1243	849	822
BIVALVES	Sphaeriidae	Pisidium	11	3	1	9
GASTEROPODES	Bithyniidae	Bithynia	0	0	2	2
		Bythinella	0	0	8	4
	Lymnaeidae	Stagnicola	0	0	1	0
		Myxas glutinosa	0	0	0	1
		Radix	14	228	4	4
	Planorbidae	Segmentina nitiba	0	0	0	1
		Planorbis	0	1	1	2
Ancylidae	Ancylus fluviatilis	3	2	0	1	
ACHETES	Erpobdellidae	Erpobdella	15	35	14	58
	Glossiphoniidae	Glossiphonia	13	9	7	16
		Helobdella stagnalis	0	0	0	10
		Hemiclepsis	1	0	0	3
OLIGOCHETES			284	673	383	978
TRICLADES	Dugesiidae	Dugesia	6	62	29	176
	Planariidae	Gyraulius	0	0	0	5
		Polycelis	0	0	0	12
Hydracarien			640	348	24	64

Listes faunistiques de la station Cessey diversifiée (20 premières placettes)

Année : Cours de sea LOE
 Station : Area Cessey
 Date : 26/04/2011

ORDRE	Famille	Date																				TOTAL
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
INSECTES	BIVOUX	3	1	3	1	3	1	1	1	1	3	4	4	2	2	2	2	2	3	2	1	
	Scorpions	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Centres	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Centres	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
PILICOPTERES	Leucosticta	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Pteromalidae	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
HYMÉNOPTÈRES	Chalcididae	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Proctosptera	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Stenobothridae	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Blattidae	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Braconidae	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Ichneumonidae	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Ichneumonidae	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Ichneumonidae	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Ichneumonidae	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Ichneumonidae	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
TRICHOPTÈRES	Hydropsychidae	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Trichoptera	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
COLÉOPTÈRES	Carabidae	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Curculionidae	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
DIPTÈRES	Muscidae	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Syrphidae	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
NEUROPTÈRES	Chrysomelidae	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Dermaptera	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
MOLLUSQUES	Hydrobiidae	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Hydrobiidae	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
VERBES	Araneidae	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Araneidae	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
MÉTAMÈRES	Collembola	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Collembola	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
TOTAL		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

Annexe 6: Les valeurs seuils proposées par le guide de l'Ontario au Canada sont fixées par rapport aux effets sur les organismes benthiques (Persaud et al., 1993).

Table 1: Provincial Sediment Quality Guidelines for Metals and Nutrients.
(values* in µg/g (ppm) dry weight unless otherwise noted)

METALS	No Effect Level	Lowest Effect Level	Severe Effect Level
Arsenic	-	6	33
Cadmium	-	0.6	10
Chromium	-	26	110
Copper	-	16	110
Iron (%)	-	2	4
Lead	-	31	250
Manganese	-	460	1100
Mercury	-	0.2	2
Nickel	-	16	75
Zinc	-	120	820
NUTRIENTS			
TOC (%)	-	1	10
TKN	-	550	4800
TP	-	600	2000

* - values less than 10 have been rounded to 1 significant digit. Values greater than 10 have been rounded to two significant digits except for round numbers which remain unchanged (e.g., 400).

- - denotes insufficient data/no suitable method.

TOC - Total Organic Carbon TKN - Total Kjeldahl Nitrogen TP - Total Phosphorus

(June 1992)

Annexe 7 : Descriptif des calculs de l'Indice d'Attractivité Morphodynamique (IAM)

L'indice IAM sanctionne la variété des classes de hauteurs d'eau, de vitesses et de substrats/supports ainsi que l'attractivité des substrats/supports pour l'ichtyofaune.

$$IAM = [\sum_1^n Si \times \text{Attract}(\text{subs})] \times \text{Var}(\text{subs}) \times \text{Var}(\text{he}) \times \text{Var}(v)$$

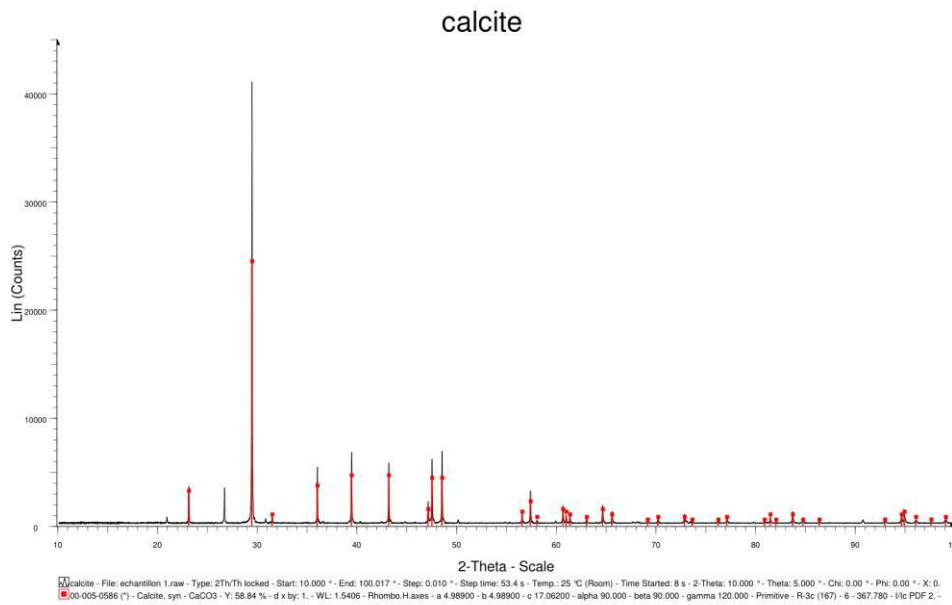
où : v est la vitesse du courant, he est la hauteur d'eau et subs représente les substrats/supports. L'attractivité des substrats supports est représenté par Attract(subs) et Var est la variété de la grandeur entre parenthèse, par exemple Var(he) indique le nombre de classe de hauteurs d'eau.

Substrat	Code	Attractivité
branchages, grosses racines	BRA	100
sous-berges	BER	90
hydrophytes éparses	HYI	80
blocs avec caches	BLO	60
galets	GAL	50
hélophytes	HEL	40
chevelus racinaires, végétations rases	CHV	40
blocs sans anfractuosités	BLO	30
galets et graviers mélangés	GGR	25
graviers	GRA	20
galets pavés	GLS	10
litières organiques	LIT	10
sables	SAB	8
éléments fins, limons	FIN	4
fonds nus organiques, vases	FNO	3
dalles, surfaces indurées (sans cache)	DAL	1
Afluentes, sources, réurgences		BONUS +25%

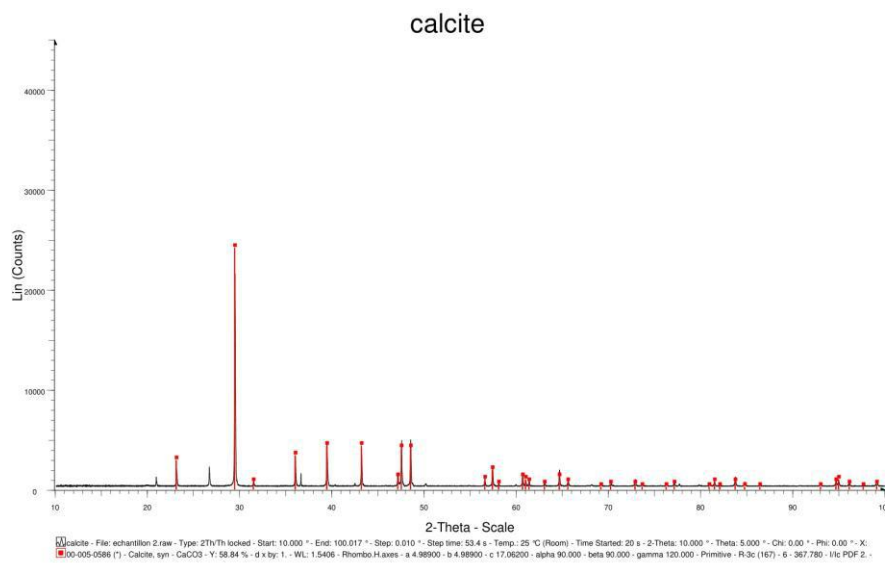
Attractivité des différents substrats/supports

Annexe 8 : Résultats des analyses cristallographiques par DRX sur les différents types de tufs

Tufs expansés sur la station Piquette colmatée

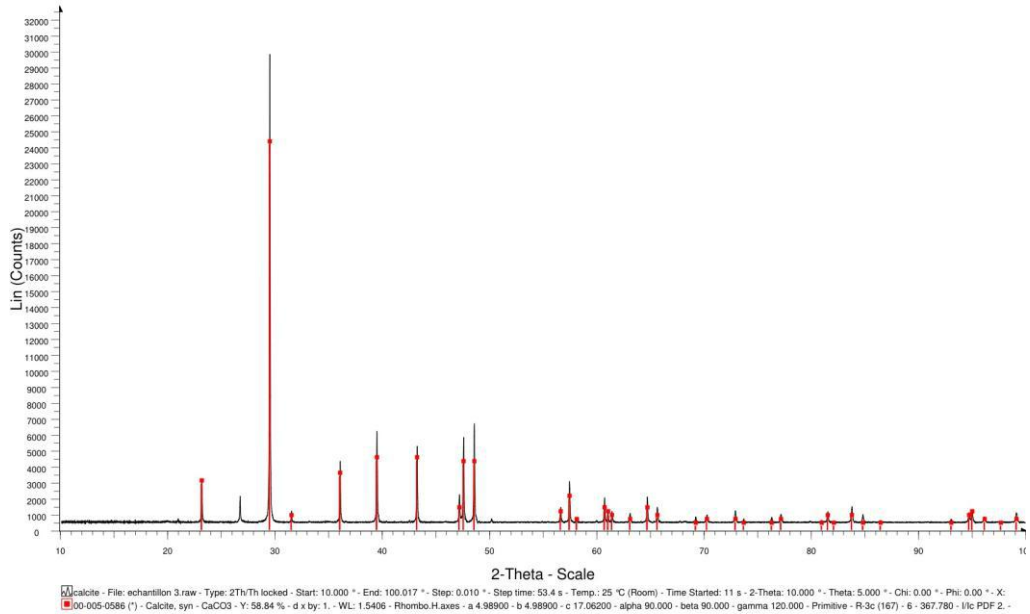


Nassis sur la station Cessey diversifiée



Nassis sur la station Piquette diversifiée

calcite



Dalle tufeuse sur la station Cessey colmatée

calcite

