



Étude de l'état de santé des rivières karstiques en relation avec les pressions anthropiques sur leurs bassins versants

François Degiorgi, Pierre-Marie Badot

► To cite this version:

François Degiorgi, Pierre-Marie Badot. Étude de l'état de santé des rivières karstiques en relation avec les pressions anthropiques sur leurs bassins versants. Laboratoire Chrono-environnement - CNRS - UFC (UMR 6249). 2020, pp.47. hal-04764319

HAL Id: hal-04764319

<https://hal.science/hal-04764319v1>

Submitted on 3 Nov 2024

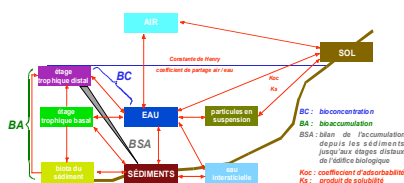
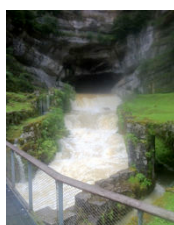
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Étude de l'état de santé des rivières karstiques en relation avec les pressions anthropiques sur leurs bassins versants



Bilan synthétique des opérations réalisées et des recherches et analyses effectuées et disponibles

François Degiorgi, Pierre-Marie Badot

18 février 2020

Avertissement

Ce document présente la synthèse des résultats des investigations menées entre juillet 2012 et décembre 2018 pour rechercher et hiérarchiser les causes d'altération des rivières karstiques.

Conception/coordination : Pierre-Marie Badot & François Degiorgi

Participants : Eric Lucot, Audrey Bolard, Etienne Chanez, Axelle Chiffre, Nadia Crini, Alexia Ducrot, Jean Claude Lambert, Marc Steinmann

Les investigations ont toutes été réalisées par l'équipe du Laboratoire Chronoenvironnement. Certaines investigations in natura l'ont été avec l'aide et le soutien logistique des partenaires suivants :

- la Fédération de Pêche du Doubs pour les pêches électriques (coordination : Christian Rossignon) ;*
- le bureau d'étude BI_EAU pour le phytobenthos (Maria Leitao) ;*
- le bureau d'étude TELEOS pour une partie des pêches et une partie du benthos (Hervé Décourcière) ;*

L'essentiel des analyses chimiques ont été réalisées au sein de la plate-forme d'analyses chimiques du laboratoire Chronoenvironnement.

D'autres analyses chimiques ont été effectuées par

- de 2013 à 2015, le laboratoire ABL Analytics (Porrentruy, CH), fermé en 2016 (micropolluants)*
- de 2013 à 2016 le laboratoire QUALIO de l'Université de Franche-Comté (analyse de l'eau, paramètres de routine)*
- en 2015, l'Institut des Sciences Analytiques de l'Université de Lyon (Audrey Buleté, Loic Spinner) pour les résidus médicamenteux*
- de 2016 à 2018 le laboratoire de Chimie Environnementale (Dominique Grandjean et Felipe De Alencastro) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (pesticides).*

OBJECTIFS DU PROGRAMME ET PRINCIPALES INVESTIGATIONS REALISEES

Contexte

Depuis la fin des années 1960, un faisceau de signes, mesures et observations montrent que les rivières de Franche-Comté subissent une érosion lente mais continue de leurs fonctions biologiques :

- la couleur des eaux en période de crue a évolué et il n'est pas rare qu'elles présentent une teinte "chocolat" dès que le débit dépasse le module ;
- les fonds de galets et de graviers sont régulièrement colmatés de particules fines, de feutrage organique, ou d'algues filamenteuses ;
- les herbiers d'hydrophytes se densifient et se colmatent d'algues épiphytes ;
- des espèces réputées sensibles, comme les grands plécoptères, l'écrevisse Pied Blanc, les grandes éphémères, les trichoptères... se raréfient, voire disparaissent ;
- les captures de salmonidés par les pêcheurs montrent une nette tendance à la baisse ;
- les espèces médianes ou basales comme l'ombre ainsi que de nombreuses espèces d'insectes aquatiques opèrent une remontée vers les secteurs amont ;
- ...

Cette évolution négative semble s'être affirmée, sinon accélérée, depuis peu. Des mortalités massives de salmonidés sont survenues en 2010 et 2011, notamment au moment de leur période de reproduction.

De tels processus d'altération ont également été observés sur d'autres cours d'eau calcaires franc-comtois. Dans le cas de la Loue, ces phénomènes ont été d'autant plus spectaculaires que cette rivière était parmi les moins perturbées et présentait des stocks de salmonidés encore très importants jusqu'en 2008. La Loue et ses affluents constituent un observatoire représentatif pour rechercher les origines de l'appauvrissement général des ressources écologiques des rivières karstiques.

Objectifs généraux

Depuis juillet 2012, le laboratoire Chronoenvironnement (UMR 6249, CNRS/UFC/UBFC) a entrepris avec le soutien financier de l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, puis de la Région Bourgogne - Franche-Comté et du conseil départemental du Doubs, un programme de recherches centré sur ce réseau hydrographique pour atteindre les objectifs suivants (Figure 1) :

1. caractériser de manière approfondie l'état de santé actuel de la Loue et ses évolutions avec des méthodes plus précises que celles employées dans les suivis réglementaires de la qualité des eaux réalisés dans le cadre de la directive cadre sur l'eau ;
2. appréhender les mécanismes de perturbations des fonctions biologiques du cours d'eau par l'analyse conjointe des compartiments fluviaux et des principaux étages de l'édifice biologique ;
3. identifier les contaminants présents dans les différents compartiments de l'écosystème et leurs voies de transferts, hiérarchiser leurs impacts possibles, examiner leurs sources potentielles à l'échelle du bassin versant ;
4. explorer les relations existant entre l'évolution des activités socio-économiques du bassin versant de la Loue d'une part et la qualité des eaux et les capacités d'autoépuration de la rivière d'autre part.

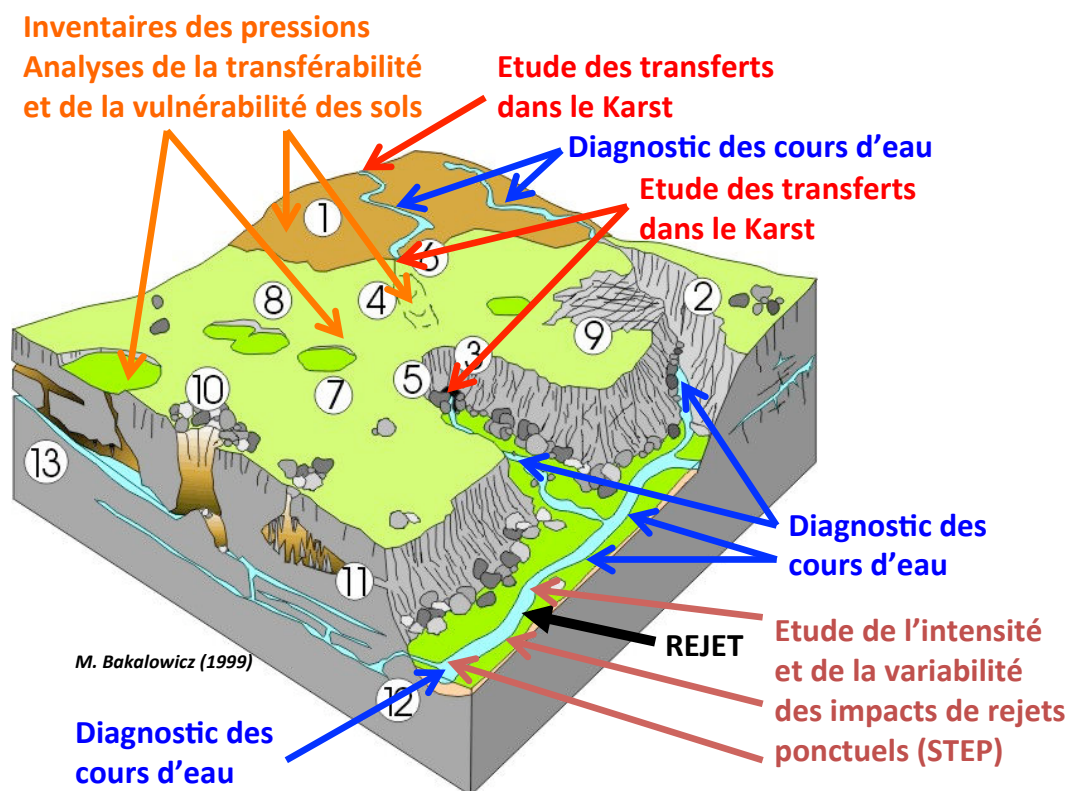


Figure 1. Objectifs généraux du programme de recherches (diagramme issu de Bakalowicz 1999)

Approche méthodologique : rappel des investigations réalisées.

Pour atteindre ces objectifs, plusieurs types d'investigations ont été menés durant plusieurs années sur un réseau de stations et de sites disposés de façon à caractériser l'état de santé écologique de la Loue et de ses affluents et à évaluer les relations éventuelles avec les pressions anthropiques (figure 2, tableau 1).

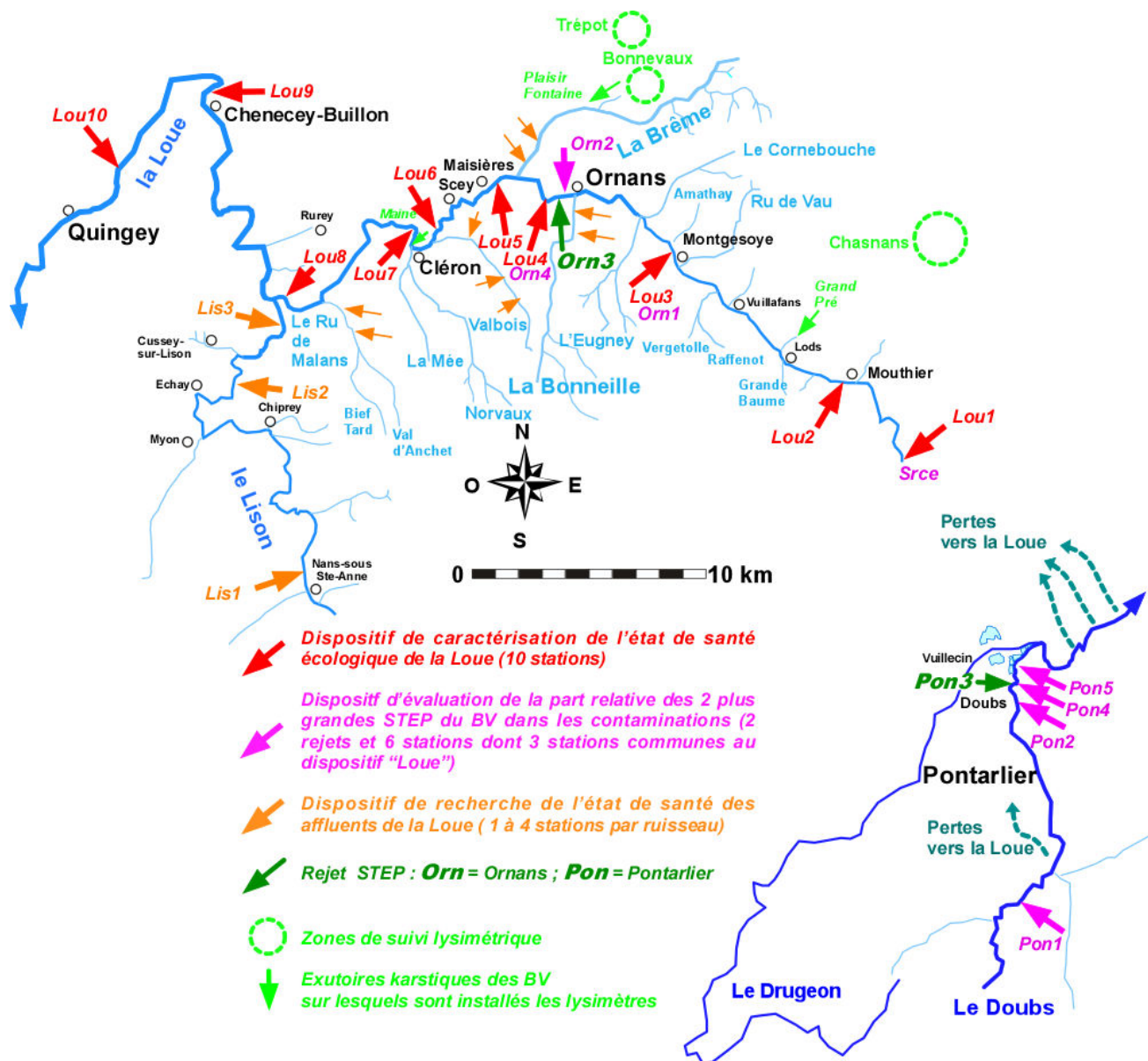


Figure 2. Localisation des réseaux de stations jalonnant le réseau hydrographique de la Loue, et de ses principaux affluents, y compris le Doubs apical

Sur cet ensemble de stations, l'état des potentiels biologiques de la Loue et de ses affluents karstiques ainsi que leurs variations spatio-temporelles ont été caractérisées de 2012 à 2018. Dans le même temps, différents processus susceptibles d'être responsables des altérations décelées ont été analysés en distinguant plusieurs types de perturbations, de contaminations et de transferts. Parallèlement, un bilan spatialisé

des pressions et des usages susceptibles d'être impliqués dans les dysfonctionnements observés a été dressé à l'échelle des sous-bassins versants.

Les investigations mises en œuvre dans ce cadre ont été articulées en trois tranches dont une a été dédoublée.

1. La première tranche, réalisée entre juin 2012 et avril 2014, a permis d'établir un premier diagnostic sur l'état de la rivière ainsi que sur les processus susceptibles d'être à l'origine de l'altération des potentiels biologiques de la Loue.
- 2A. Les résultats de la tranche 2A, menée d'octobre 2013 à février 2015, ont corroboré ces avancées et ont permis d'orienter la recherche des causes des altérations de potentiels écologiques.
- 2B. De 2014 et fin 2015, la tranche 2B a permis de conforter les conjectures sur les causes de perturbations des rivières karstiques, puis d'en quantifier les impacts sur les organismes aquatiques par
 - l'analyse des pressions agricoles et de la vulnérabilité des sols agricoles du bassin versant ainsi que de leur capacité de rétention, d'épuration et de transfert des flux nutritifs et carbonés ;
 - le suivi de la dynamique des colmatages algaux, confrontée avec celle des nutriments et en contaminants chimiques ;
 - la caractérisation de la dangerosité de l'exposition conjointe à différents contaminants ainsi que de leurs impacts sur les capacités biogènes des cours d'eau, *in situ* et au laboratoire ;
 - une évaluation du degré de contamination du biote par les polluants identifiés.
3. Entre septembre 2016 et décembre 2018, les investigations menées au cours de la tranche 3, ont permis :
 - une confirmation de l'état de dégradation des édifices biologiques aquatiques, mais aussi des capacités de récupération des peuplements de poissons et de macroinvertébrés durant les périodes chaudes survenues entre 2016 et 2018 ;
 - une caractérisation du régime thermique de la Loue et, pour la partie aval du domaine d'étude, de sa qualité physique ;
 - une analyse des pressions, des contaminations en nutriments, en ETM, en HAP et de leur transferts depuis les sols agricoles jusqu'à la Loue *via* 2 affluents ;
 - un bilan spatialisé des pressions anthropiques et de leur évolution temporelles.

Le présent rapport constitue la synthèse des informations que ces travaux de recherches ont permis de réunir et il formule des conjectures quant aux principales causes de l'altération des rivières karstiques et quant à leur hiérarchisation.

Thèmes	Contenu et objectifs	Investigations
Peuplements de poissons	Etat des potentiels piscicoles et de leurs variations spatio-temporelles récentes	31 pêches électriques exhaustives à 3 passages
Peuplements benthiques et entomologie	Evolution spatio-temporelle des structures quantitatives des peuplements benthiques Relations avec les contaminations et les colmatages algaux	70 MAG 20 et 70 IBG-RCS Inventaires spécifiques quantitatifs des Ephéméroptères, Plécoptères, Trichoptères sur 12 sites pendant 3 ans (288 chasses stationnelles)
Communautés de producteurs	Structure et bioindication des macrophytes Structure et bioindication de l'épibenthos Variabilité et variations des colmatages par les algues filamenteuses	18 IBMR 16 inventaires de l'épibenthos 94 mesures stationnelles du colmatage par les algues filamenteuses
Qualité physique, thermographie, morphologie	Régime thermique de la Loue de 2013 à 2017 Qualité physique stationnelle la Loue Qualité physique globale de la Loue +affluents	50 relevés thermiques annuels 10 IAM aval et synthèse Méthode de tronçon sur 120 km
Qualité chimique des eaux de la Loue entre 2013 et 2015	Analyses des variations longitudinales saisonnières, en crue et en étiage, des éléments majeurs dans la Loue en crue et en étiage (16 campagnes sur 20 sites)	320 analyses de 12 éléments dont les principales formes de nutriments
Qualité chimique des sédiments et MES de la Loue (entre 2013 et 2015)	Analyse des teneurs en nutriments, ETM, HAP et pesticides dans les sédiments de la Loue et du Doubs apical 2 campagnes sur 10 stations dont une avec triplicats + 4 campagnes pour encadrer les STEP d'Ornans et de Pontarlier	64 analyses N et P 88 analyses ETM, HAP et pesticides
Vulnérabilité et transférabilité des sols agricoles	Analyse des transferts de nutriments et contaminants depuis les sols de deux sous bassins représentatifs (Grand Bief et Plaisir Fontaine) en fonction des pratiques agricoles (prairies/cultures) et de l'épaisseur des sols (superficiel/profond) : 2 sites ateliers (24 plaques lysimétriques), 2016 à 2018	320 analyses nutriments 32 analyses de contaminants
Qualité chimique et contaminations de des affluents karstiques Transferts à la Loue	Analyse des transferts de nutriments dans 2 affluents karstiques, en relation avec les suivis lysimétriques et transferts à la Loue	40 campagnes 6 stations 240 analyses nutriments
	Analyse des ETM, HAP et pesticides dans deux exutoires karstiques et transfert via les eaux et les MES	24 analyses de contaminants (eau et MES)
	Analyse des ETM, HAP et pesticides dans la Loue et la Brème	12 analyses contaminants (eau et sédiments)
Dangers et risques des co-expositions	Evaluation des dangers et des risques liés aux contaminations conjointes par les HAP et les pyréthrinoides décelés dans la Loue	4 tests écotox complets sur sédiments 6 tests écotox complets sur eau 300 réplicats
Contamination du biote	Transferts et bioaccumulation des ETM et des pesticides dans les algues et les poissons	40 analyses dans les algues 36 analyses dans les poissons
Inventaire des pressions anthropiques	Bilan des pressions anthropiques : occupation des sols, intrants agricoles, utilisations des biocides, décharges, pollution grise, rejets domestiques et industriels...	Enquêtes Récolte des données Cartes et synthèse

Tableau 1. Récapitulatif des investigations effectuées dans le cadre du programme de recherche des causes d'altération des rivières karstiques (atelier Doubs Loue Lison)

SYNTHESE DES PRINCIPAUX RESULTATS

Variations hydroclimatiques interannuelles

Une des hypothèses émises par l'expertise ONEMA (2012) était que les tendances au réchauffement de l'eau et de l'aggravation des étiages pouvaient avoir contribué à l'altération des potentiels biologiques. Pour vérifier dans quelles mesures et dans quel sens les variations hydrologiques et thermiques contribuent à altérer les capacités biogènes des cours d'eau étudiés, le crible phénoménologique devait être appliqué durant plusieurs années et pour des périodes hydroclimatiques contrastées.

Or, durant les 3 premières années d'étude, les débits de la Loue, du Doubs et du Lison sont restés élevés par rapport au régime moyen de ces rivières (tableau 2). En particulier, de janvier 2012 à avril 2014, la Loue n'a pas connu de véritable étiage. Il n'est pas non plus survenu de crue importante. Seules les périodes comprises entre février et mai 2013, d'une part, puis entre décembre 2013 juin 2014, d'autre part, ont échappé à la succession des « petites » crues.

Année	Période sèche	Qmm (m ³ .s ⁻¹)	VCN3 (m ³ .s ⁻¹)	Tendances hydrologiques et fréquences
2012	Aout / 21/08	22,6	9,1	Plus que vicennale humide
2013	Aout / 05/09	19,0	10,9	Décennale humide
2014	Avril / 26/06	12,7	10,7	Triennale humide
2015	Aout / 09/09	9,1	5,5	Triennale sèche
2016	Sept. / 11/10	11,8	5,9	Triennale humide
2017	Sept. / 08/10	9,6	6,3	Biennale / triennale sèche
2018	Oct. / 24/10	3,4	3,9	Plus que cinquantennale sèche

Tableau 2. Tendances hydrologiques des 7 années d'étude (source hydro.eaufrance.fr, Vuillafans)

En revanche, durant les 4 années suivantes, de 2015 à 2018, 5 périodes d'étiage ont succédé à des périodes de lessivages plus marquées.

Cette alternance de périodes humides et de périodes sèches a permis d'évaluer dans quel sens et dans quelle mesure l'hydrologie des cours d'eau étudiés et leur régime thermique participaient ou amplifiaient les altérations de leur potentiel biologique.

Diagnostic synthétique de l'état de santé des édifices biologiques

Afin d'établir un diagnostic synthétique et spatialisé de l'état de santé écologique du réseau Doubs / Loue / Lison et de déterminer ses tendances évolutives, la structure des peuplements de poissons et de macroinvertébrés a été analysée sur un ensemble de stations prospectées à différentes reprises au cours du programme.

Les poissons et les macroinvertébrés sont des organismes consommateurs intégrateurs qui constituent des bioindicateurs sensibles de la qualité écologique des cours d'eau.

Parallèlement, l'étude de la composition des peuplements de végétaux aquatiques et de la dynamique des colmatages algaux a fourni des informations complémentaires et a permis de proposer des hypothèses explicatives à l'altération des peuplements de consommateurs.

Etat de santé et évolution des peuplements piscicoles

Les potentiels ichthyologiques de la haute et moyenne Loue sont altérés sur la totalité du linéaire étudié et montrent les évolutions spatio-temporelles présentées dans la figure 3. Les valeurs de référence sont calculées à partir des résultats de pêches électriques effectuées entre 1988 et 2010 dans les meilleures rivières à truites et à ombres de Bourgogne, Franche-Comté et Rhône-Alpes (cf. rapports piscicoles des volets 1 et 2A du présent programme).

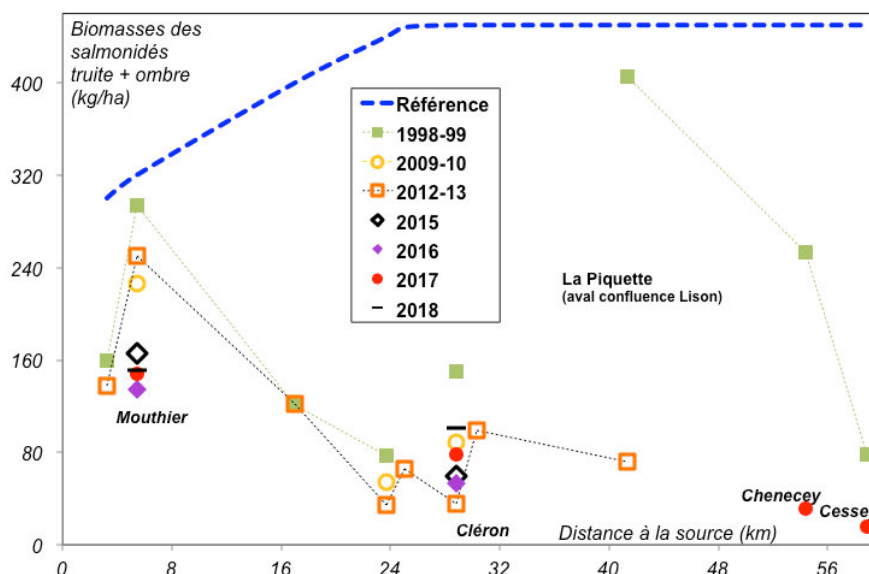


Figure 3. Evolution de la biomasse salmonicole le long de la Loue entre 1998 et 2018

Les résultats obtenus le long de la Loue montrent que :

- dans la partie apicale, l'effet des mortalités de 2009 à 2012 s'est moins fait sentir qu'à l'aval d'Ornans, mais les biomasses salmonicoles continuent à s'éroder jusqu'en 2017 ;
- dans la partie médiane, entre Ornans et la confluence du Lison, la situation catastrophique observée au début des investigations pendant les années 2012-2013 montre une légère tendance à l'amélioration mais la reconstitution des biomasses salmonicoles reste lente et le recrutement aléatoire.
- dans la partie aval, les peuplements piscicoles sont toujours très appauvris : la situation mesurée en 2017 est mauvaise pour la truite et préoccupante pour l'ombre.

Les peuplements du Lison sont eux aussi très appauvris. L'abondance des truites est déficitaire à fortement déficitaire sur l'intégralité du cours de cet affluent, tandis que les densités d'ombres, très contrastées, sont surabondantes dans la partie apicale, et fortement appauvrie dans la partie aval.

Dans les affluents plus modestes, comme la Brème ou la Bonneille, les secteurs apicaux et basaux sont pauvres en poisson, alors que les secteurs médians abritent de grandes densités de truitelles. Ce schéma reflète une altération des capacités biologiques sensible au niveau des sources, qui s'estompe avec l'autoépuration mais qui est réamorcée ou relayée dans les zones de confluence. Il reflète la dégradation surtout chimique des parties apicales et majoritairement physique des parties aval.

Dans le Doubs apical à l'aval de Pontarlier, les peuplements piscicoles se sont nettement restaurés depuis les années 1970, y compris à l'aval proche de la STEP de cette agglomération. En effet, avant 1973, la rivière était dépeuplée de tout poisson à l'aval des rejets de Pontarlier (Verneaux 1973)¹. Les efforts de collecte et d'épuration se sont traduits par une restauration partielle mais notable des potentiels salmonicoles sur cette partie du Doubs.

En revanche, les potentiels piscicoles du Doubs en amont de l'agglomération pontisaliennaise se sont fortement appauvris. Dans le secteur de la Cluse et Mijoux, en amont de pertes qui nourrissent elles aussi la source de la Loue, les fortes abondances de truites qui étaient observées dans les années 1970 n'existent plus.

Etat de santé des peuplements de macroinvertébrés aquatiques

L'analyse de l'évolution spatio-temporelle de la variété et de l'abondance des macroinvertébrés aquatiques mesurées à plusieurs époques dans les stations jalonnant la Loue et ses affluents montre des altérations analogues.

¹ Verneaux J., 1973. Cours d'eau de Franche-Comté. Recherches écologiques sur le réseau hydrographique du Doubs - Essai de biotypologie. *Thèse de doctorat, Univ. Besançon*, 260 p.

Pendant 3 années successives, de 2012 à 2015, un inventaire complet des espèces d'Ephéméroptères, Plécoptères et Trichoptères (EPT) a été dressé suivant un protocole similaire à celui appliqué à l'ensemble du réseau hydrographique du Doubs, dont la Loue, entre 1968 et 1972 par Verneaux (1973).

Durant chaque tranche du programme, 2 campagnes d'échantillonnage du benthos réalisés suivant le protocole MAG20 ont permis de décrire les structures quantitatives des biocénoses benthiques, dont des larves d'EPT, mais en incluant aussi l'ensemble du peuplement y compris les groupes comme les gammarus ou les mollusques, réputés moins sensibles aux contaminations chimiques.

En 2015, le nombre d'espèces (figure 4) est compris entre 27 à la source et 58 à l'aval de Cléron, alors qu'avant 1973, le nombre d'espèces variait de 45 (source) à 73 (la Piquette et Chenecey).

L'inventaire complet des espèces d'éphémères, plécoptères et trichoptères montre une importante baisse de biodiversité entomologique par rapport à celle qui avait été décrite à la fin des années 1960.

Sur le plan qualitatif, entre 46 et 57 % des espèces « typiques » d'EPT observées en 1973 ont été perdues dans les stations prospectées aux 2 époques. Toutefois, une partie des espèces disparues a été remplacée par des espèces plus communes, et la richesse spécifique n'a été réduite que de 25 % en moyenne.

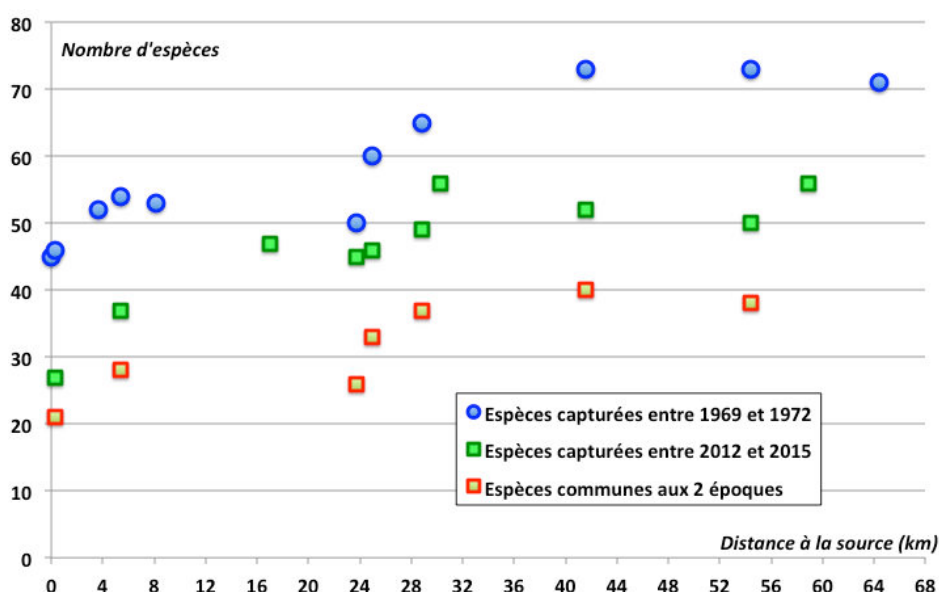


Figure 4. Evolution du nombre d'espèces d'éphémères, plécoptères et trichoptères capturés le long de la haute et moyenne Loue entre 1972 (Verneaux 1973) et 2015

Parallèlement, le nombre d'espèces réputées « sensibles » régresse, entre les 2 époques, de 12 à 57 %, selon les stations. Sauf à la source, les plus fortes diminutions de cet indicateur sont observées sur les stations situées les plus à l'aval, alors que celles-ci étaient associées, avant 1973, à la plus forte richesse spécifique.

Sur le plan quantitatif, la variation spatio-temporelle de la somme des cotes d'abondances des espèces d'EPT souligne l'intensité de l'altération des potentiels

entomologiques (figure 5). En effet, cet indicateur synthétique prend à la fois en compte l'abondance et la richesse spécifique et constitue un véritable indice de biodiversité. Il montre en outre que l'appauvrissement des capacités biogènes de la source de la Loue, déjà patent à la fin des années 1960, s'est aggravé.

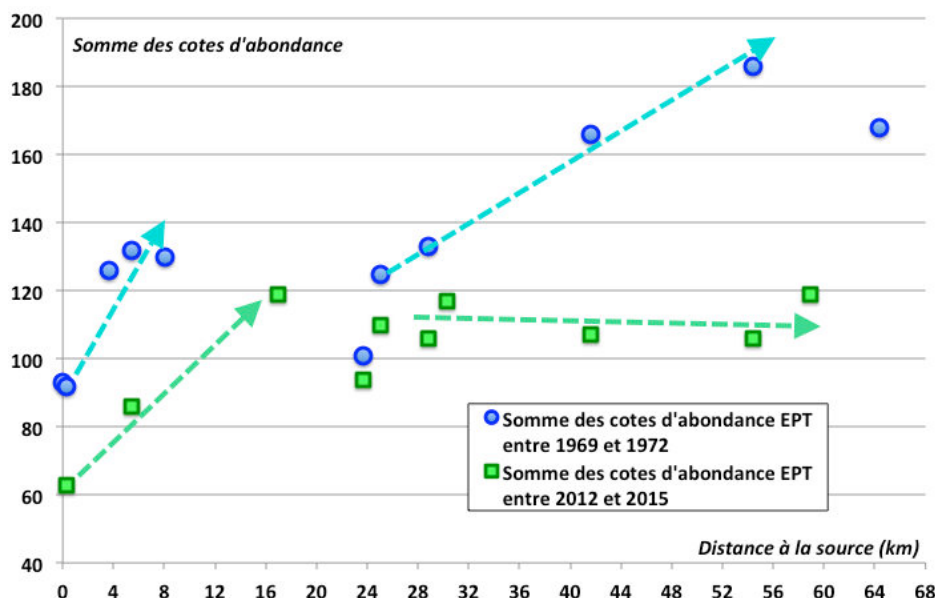


Figure 5. Comparaison des scores de biodiversité constitués par les sommes d'abondance spécifiques d'Ephéméroptères, de Plécoptères et de Trichoptères (EPT) peuplant la Loue entre la source et Quingey déterminées, avant 1973 dans 11 stations (carrés bleus) et entre 2012 et 2015 dans 10 stations (losanges verts).

Dans les premiers kilomètres du linéaire de la Loue, la biodiversité s'accroît lors des 2 époques, sous l'effet conjugué du gradient longitudinal et de l'autoépuration. La récupération de la biodiversité est cependant moins rapide en 2015 qu'en 1973, mais les capacités d'autoépuration de la Haute-Loue sont encore tangibles.

Parallèlement, la réduction des capacités biogènes mesurée à l'aval immédiat d'Ornans, déjà notoire à la fin des années 1960, est restée du même ordre. En revanche, à l'aval plus lointain, elle n'est vraisemblablement plus compensée par l'autoépuration, alors qu'elle l'était très nettement avant 1973.

Rappel méthodologique. Les densités ont été transformées en cotes d'abondance dont la progression suit une raison géométrique : cette échelle semi-quantitative a été centrée en fixant la limite supérieure de la cote 3 à la moyenne des densités mesurées sur au moins 60 sites, tandis que les limites des cotes supérieures (respectivement inférieures) s'en déduisent en multipliant (respectivement divisant) par un facteur 2 (Benzecri1982²). Ce codage, a donc été déduit de la répartition statistique des densités mesurées pour chacun des taxons dans un grand nombre de stations (Verneaux 1973). Il permet de donner à chaque taxon le même poids, sans préjuger de sa sensibilité. Il constitue en outre un filtre puissant des variabilités instrumentales. Il est aussi indispensable pour réaliser des comparaisons temporelles fiables et robustes, étant donnée la disparité des opérateurs dont on utilise les données récoltées à différentes époques. En revanche, graphiquement, cette transformation peut lisser ou minimiser l'importance de la réduction des densités.

² Benzecri J.P. 1982. - *Histoire et préhistoire de l'analyse des données*. Dunod éd., Paris, 159 p.

La somme des scores d'abondance des EPT, dont l'écologie est contrastée, reflète les variations annuelles de l'état de santé des cours d'eau (figure 6). Entre 2012 et 2014, les capacités biogènes de La Loue et du Lison sont nettement déficitaires par rapport à l'état de référence, et ce, en dépit de l'hydroclimat frais et arrosé de cette période.

En 2012 et 2013, la faiblesse de la remontée du score EPT entre la source et Ornans, et surtout à l'aval d'Ornans, indique la dégradation des capacités d'autoépuration. En effet, les déficits de richesse et de densité affectent l'ensemble des peuplements benthiques, y compris les groupes phytophages ou détritivores réputés pourtant peu sensibles aux contaminations organiques et nutritives.

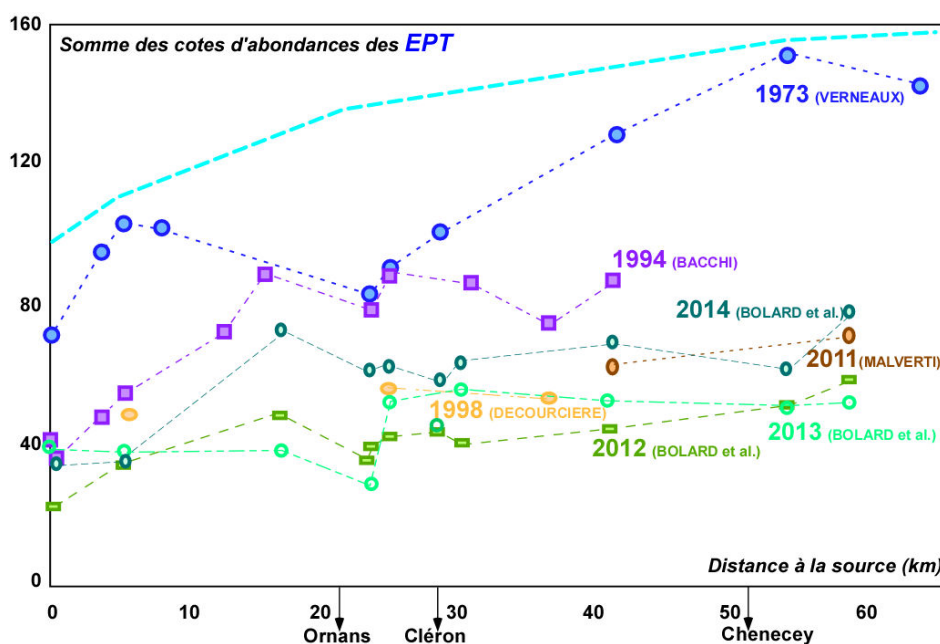


Figure 6. Variations des abondances génériques cumulées des larves d'éphéméroptères, de plécoptères et de trichoptères (EPT) échantillonnées le long de la Loue à différentes occasions. Les tiretés bleu turquoise figurent les valeurs référentielles, estimées d'après Verneaux (1973).

A contrario, les sommes de cotes d'abondance EPT mesurées en avril 2017 dans 4 stations indiquent une tendance à la remontée de la biodiversité benthique. En octobre 2017, ces indicateurs atteignent leurs plus fortes valeurs depuis 1994. Cette « embellie » n'est plus observée octobre 2018 sur les 4 stations étudiées.

Or, dans tous les cas, les prélèvements ont été réalisés après plus d'un mois d'étiage stabilisé. Par rapport à la campagne d'octobre 2017, les valeurs moyennes des débits rencontrés ont été plus importants en septembre 2014 et plus faibles en octobre 2018. Parallèlement, les périodes comprises entre mars et juillet ont été marquées, pour 2014 et 2018, par 2 crues qui ont rendu la Loue très turbide. *A contrario*, un tel épisode n'a pas été observé durant la même période en 2017.

Les scores d'abondance EPT obtenus en automne sont les plus discriminants en matière d'état fonctionnel du milieu (figure 7). Ils montrent que durant pour les années les plus "lessivées", les capacités biogènes sont réduites à moins du quart de leurs potentiels optimaux. Pour les années moins "lessivées", elles remontent entre le tiers et la moitié de leurs potentiels optimaux.

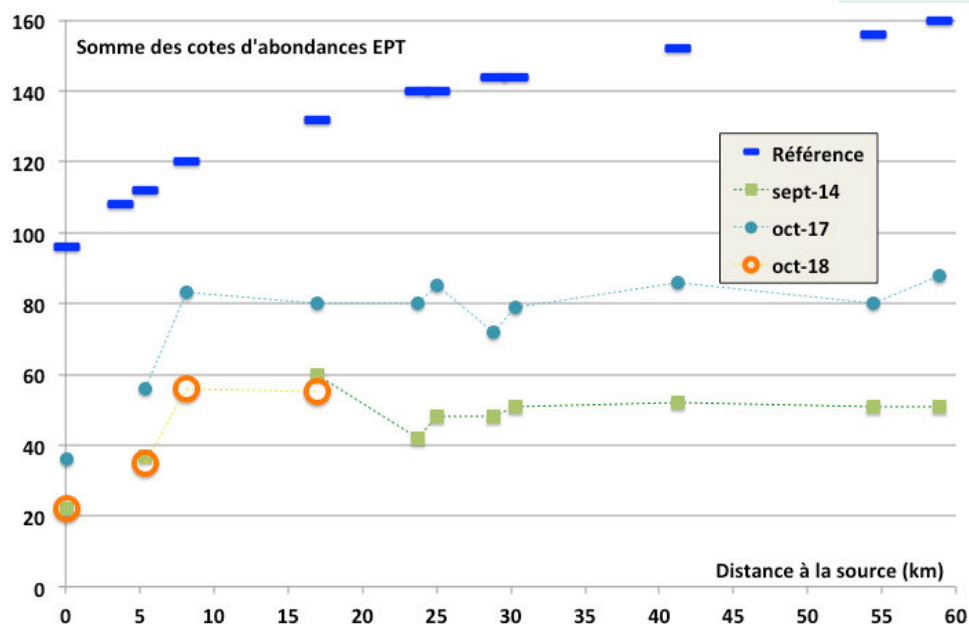


Figure 7. Variations de l'abondance cumulée des genres larvaires d'éphéméroptères, plécoptères et trichoptères (EPT) observée le long de la Loue en fin de saison estivale en 2014, 2017 et 2018. Les tiretés bleus figurent les scores référentiels, estimés d'après Verneaux 1973.

Ces observations sont corroborées et complétées par les mesures de variété et d'abondance de l'ensemble du benthos. Ainsi, une faible densité de macrophytophages et de détritivores s'observe alors même que de grosses quantités d'algues ou d'hydrophytes envahissent les fonds de la rivière comme lors des automnes 2016 ou 2018, ou comme à l'amont de Cléron, chaque année (figure 8). *A contrario* les valeurs optimales de densité ne sont observées, pour ces taxons, que durant les années les moins lessivées, et seulement sur une partie du linéaire.

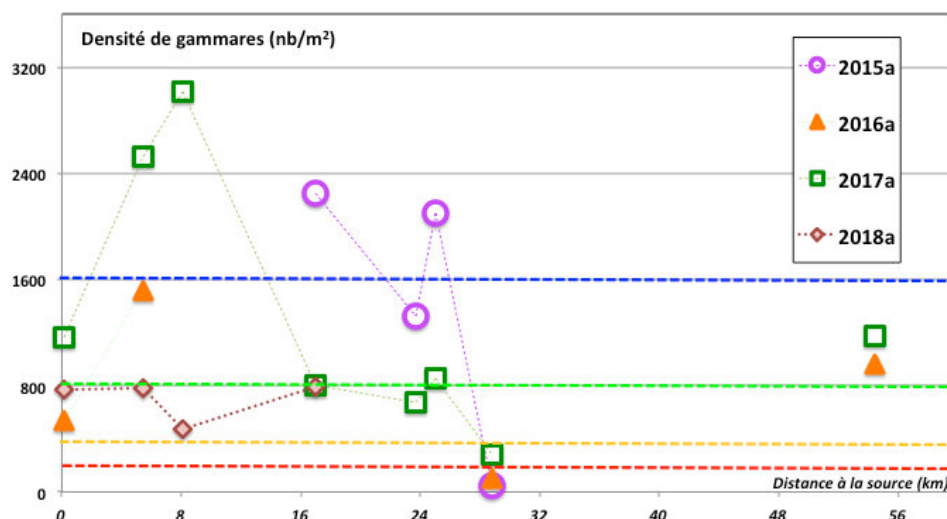


Figure 8. Variations spatio-temporelles de l'abondance de gammarès mesurées en fin de période estivale, en septembre ou en octobre, sur les stations jalonnant la Loue. Les lignes en pointillé signalent les seuils de densités très faible (rouge), faible (jaune), moyen (vert) et fort (bleu), établis à partir des moyennes de densités observées sur plusieurs centaines de stations prospectées à l'aide du même protocole (MAG20)

Structure et dynamique des peuplements végétaux

L'analyse de la structure et de la dynamique des formations végétales de la Loue montre que cette rivière subit un dérèglement trophique depuis plusieurs années. La structure des peuplements de macrophytes aquatiques reflète l'influence d'une surcharge trophique bénéficiant surtout aux espèces tolérantes. Lorsque l'hydroclimat est favorable, c'est à dire en période de débit stabilisé entrecoupé de crues lessivantes, les fonds de la Loue se couvrent d'algues filamenteuses (figure 9).

Si l'étiage perdure, le taux de recouvrement algal dépasse fréquemment 50 % et peut atteindre 100 %. L'épaisseur et la densité de ces colmatages varient en revanche fortement d'un site à l'autre, et sur un même site d'une saison et d'une année à l'autre.

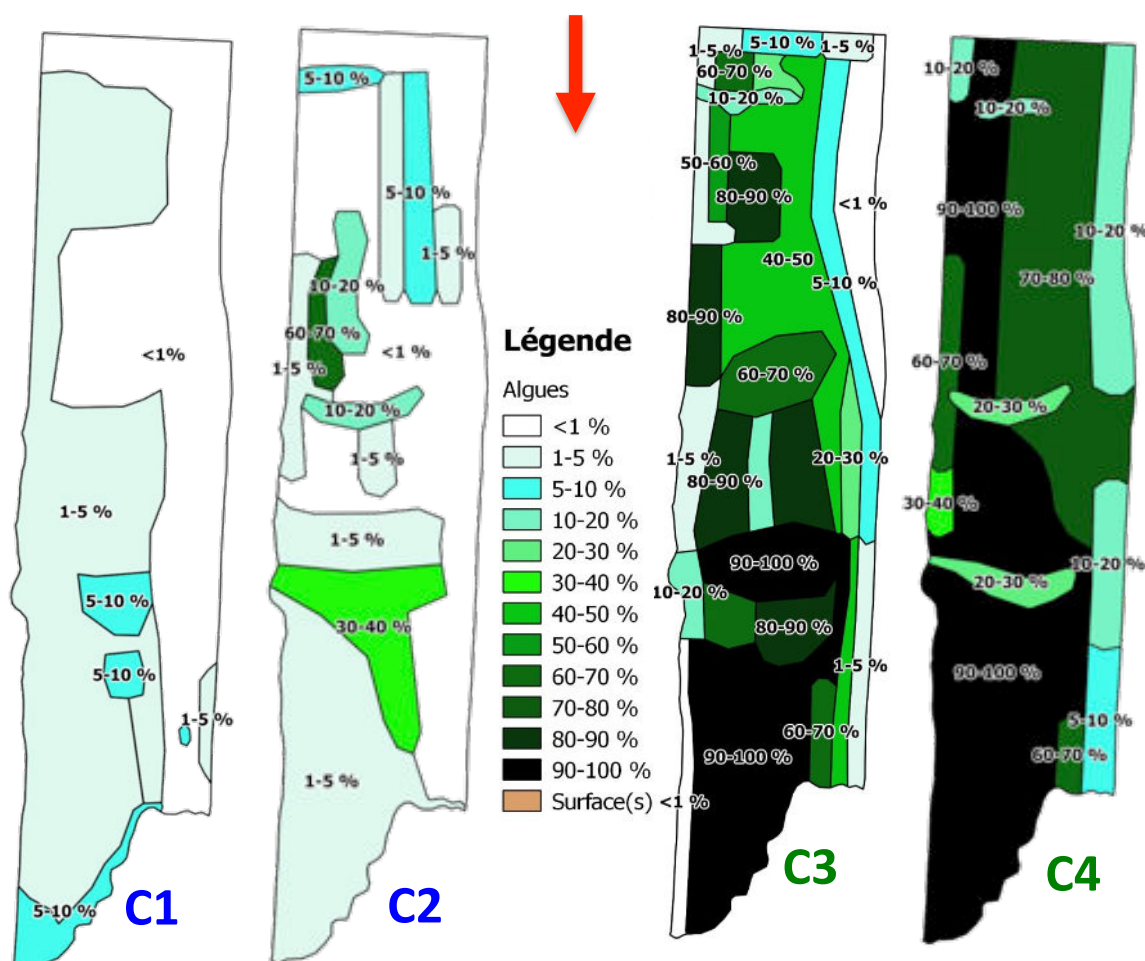


Figure 9. Exemple de l'évolution du taux de recouvrement surfacique de la station de la Piquette par des algues filamenteuses (C1) à C4)

Par rapport aux données anciennes des années 1970 et 1980, les valeurs ponctuelles maximales des biomasses fraîches mesurées entre 2006 et 2017 ont très nettement diminué dans la partie aval du domaine d'étude. Cette réduction des pics localisés d'accroissement des algues filamenteuses pourrait être liée à la réduction drastique des teneurs en phosphate dans l'eau.

En revanche, les valeurs de biomasses maximales ponctuelles restent du même ordre, voire ont fortement augmenté dans les parties apicales et médianes de la Loue, ainsi que dans le secteur d'Ornans. La réduction des concentrations en phosphore soluble ne suffit vraisemblablement pas à juguler les colmatages algaux sur l'intégralité du cours de la haute et moyenne Loue.

Dans les 3/4 des situations analysées, les taux de recouvrement surfacique stationnel dépassent fréquemment la valeur de 30 % considérée comme la limite de nuisance pour les cours d'eau à truite (Biggs, 2000). Parallèlement, 85 % des valeurs stationnelles de biomasse fraîche dépassent la valeur seuil de 50 g/m² qui indique un déséquilibre trophique net et celle de 100 g/m² qui signe le début des nuisances avérées sur la faune aquatique.

Dans le cas de la Loue en 2017, les mesures réalisées à 4 reprises sur 3 stations ont montré que le taux de colmatage y était anti-corrélé à la proportion de macroinvertébrés capable d'ingérer des algues filamenteuses (fig. 10). Ces macrophytophages regroupent en particulier les gastéropodes comme les lymnées ou les ancylopes, les crustacés comme les gammarus ou les écrevisses, les larves d'éphémères pétricoles ... Or, ces taxons sont dans la Loue en forte régression, quand ils n'ont pas disparu, à l'instar de l'écrevisse. A taux de nutriment égal, la faible pression de broutage pourrait donc contribuer à l'importance du développement des colmatages.

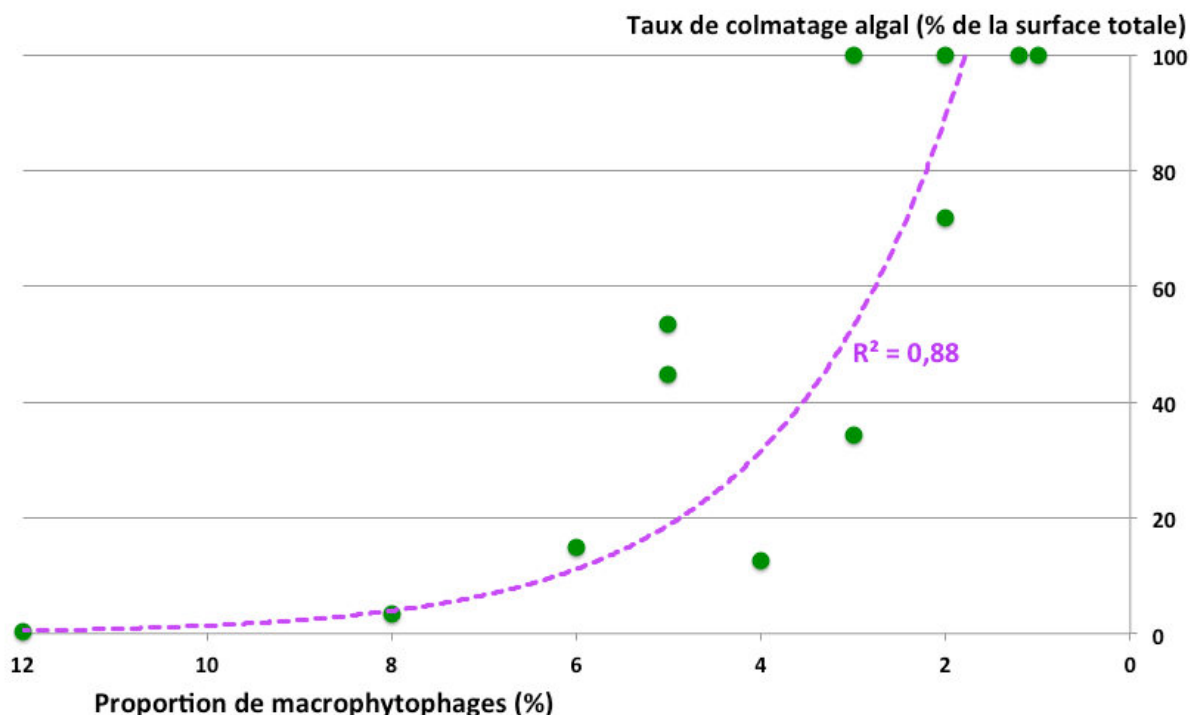


Figure 10. Variations du taux de colmatage en fonction de la proportion de macrophytophages (gastéropodes, crustacés, grandes éphémères). Les mesures ont été effectuées à 4 reprises dans 4 stations jalonnant la Loue (Mouthier, Vuillafans, Amont Cléron et Chenecey). L'anti-corrélation est très hautement significative ($p < 0,0004$, test de Spearman)

En ce qui concerne le rôle des nutriments, Townsend *et al.* (2008) indique que l'azote

est, dans la plupart des cas, limitant pour la production des algues filamenteuses benthiques. Dans le cas de la Loue, ce sont justement les algues filamenteuses appartenant aux genres les plus nitrophiles, comme *Vaucheria*, *Spirogyra* ou *Rhizoclonium* qui dominent les biomasses au moment des pics de colmatage estivaux.

Ces observations justifient la nécessité, soulignée par de nombreux auteurs, de réduire aussi bien l'azote que le phosphore pour juguler les proliférations végétales (Tank & Dodds 2003, Grizetti et al. 2011, Azevedo et al. 2015, Dalton et al. 2015). Selon ces auteurs, les seuils d'azote total en dessus desquels les biomasses d'algues benthiques augmente de façon intempestive – y compris pour des teneurs en phosphore inférieures à 0,050 mg/L – varient entre 0,5 et 1,0 mg/L.

Perturbations et altérations chimiques

Chimie de l'eau : matière organique et nutriments

De février 2013 à janvier 2015, des prélèvements d'eau et des mesures *in situ* ont été effectués à raison de 8 par an dans une vingtaine de stations de la Loue. Une douzaine de paramètres a été analysée à chaque fois, dont les différentes formes du carbone organique, de l'azote, du phosphore. Ce dispositif a été mis en place pour apprécier la charge trophique des eaux de la Loue ainsi que pour mettre en évidence l'existence éventuelle de rejets ou perturbations ponctuelles.

Parallèlement, les périodes de prélèvements ont été choisies pour obtenir des informations correspondant à plusieurs types de situation hydro-climatique, à savoir une crue et un étiage pour chacune des 4 saisons.

Ces analyses, alliées à celles effectuées par les réseaux de mesure qui opéraient avant 2016 à Chenecey (commune de Besançon, réseau RNB) et à Mouthier (réseau RNB) avec une fréquence plus faible, montrent que :

- *la conductivité augmente constamment depuis les années 1970, liée à une l'augmentation des teneurs en calcium et en bicarbonates dissous (Mudry et al. 2015)³ ;*
- *les concentrations en phosphore soluble ont fortement diminué depuis le début des années 2000 et sont désormais presque toujours inférieures au seuil supérieur de très bon état écologique défini par la DCE (figure 11) ; on observe toutefois des pics sporadiques de phosphore, majoritairement particulière, et le plus souvent pendant les crues ou parfois en période de décollement des algues benthiques ; au cours de nos campagnes de prélèvement, entre 2013 et 2015, ces pics ont essentiellement été observés à l'aval immédiat de la STEP d'Ornans.*

³ (2015) J. Mudry, F. Degiorgi, E. Lucot, E., P.M. Badot. Middle term evolution of water chemistry in a karst river : Example from the Loue River (Jura Mountains, Eastern France). In : Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems - Environmental Earth Sciences, Publisher : Springer, Editors : B. Andreo, F. Carrasco, J.J. Duran, P. Jimenez, J.W. LaMoreaux, pp.147-151. DOI : 10.1007/978-3-642-17435-3

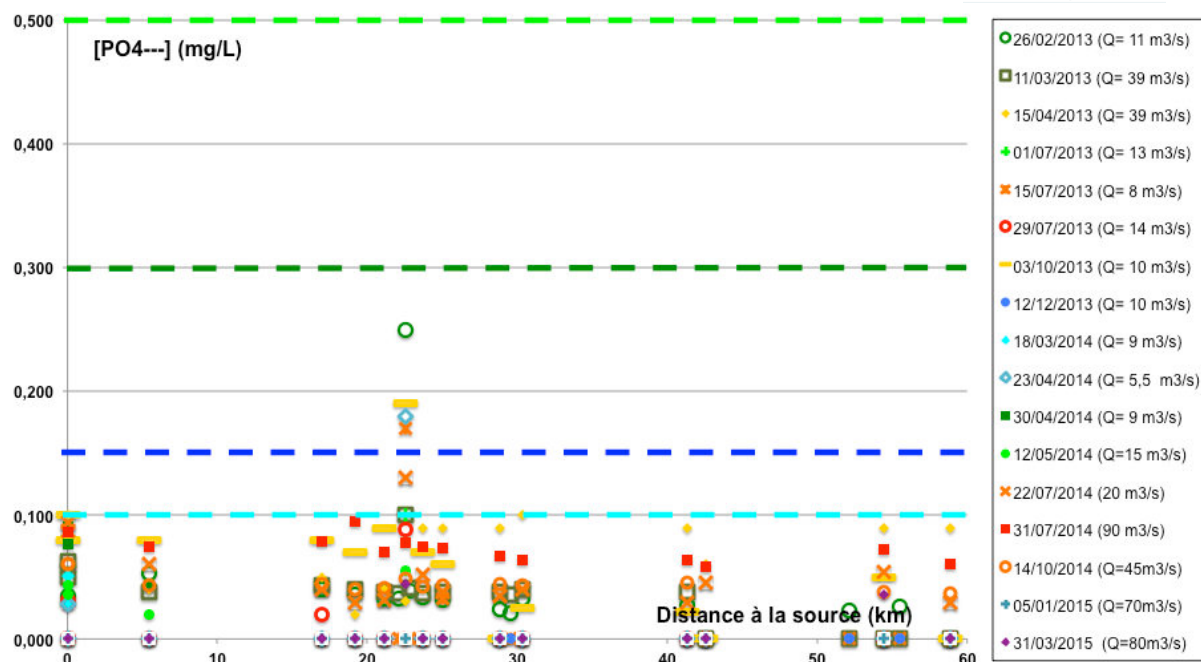


Figure 11. Variations spatio-temporelles des phosphates mesurés durant 17 campagnes entre février 2013 et mars 2015 le long de la Loue ; en bleu ciel et en vert clair limites supérieures du très bon état et du bon état écologiques pour la DCE ; en bleu foncé et en vert foncé, limites supérieures de classe pour les rivières moyennement productives à très productives non polluées selon Nisbet & Verneaux (1970) ; les débits indiqués pour les différentes campagnes sont mesurés à Vuillafans

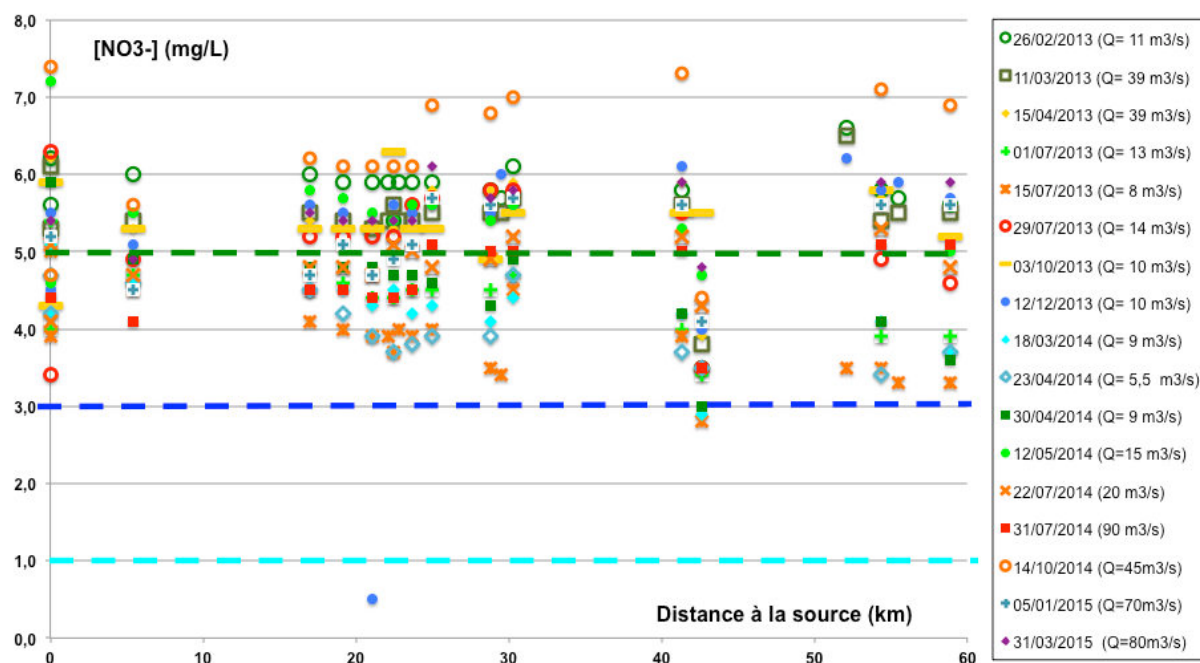


Figure 12 Variations spatio-temporelles des concentrations en nitrates mesurées à 17 reprises entre février 2013 et mars 2015 : en vert, limite supérieure de bonne qualité biologique pour des rivières à truites et à ombres, et en bleu limite pour la zone à truite supérieure (Nibet & Verneaux 1970 ; US EPA 1998, Grizetti et al. 2011) ; les débits indiqués pour les différentes campagnes sont mesurés à Vuillafans

- *les teneurs en nitrates sont elles aussi généralement inférieures au seuil de très bon état de la DCE, mais elles montrent une tendance à l'augmentation (figure 12) ; cependant, elles dépassent constamment les concentrations maximales optimales du point de vue biologique pour les zones à truites et à ombre (Nisbet & Verneaux 1970) ; ces valeurs, allant de 1 mg/L pour la zone à Truite supérieure à 3 mg/L pour la zone à Ombre sont très proches des normes guides établies par des auteurs tant nord-américains qu'europeens (US EPA 2000, Grizetti et al. 2011 Chambers et al. 2012, Evans-White et al. 2013).*
- *Parmi les affluents de la Loue (au sens large), seuls le Lison aval et le Doubs supérieur ont été régulièrement échantillonnés durant les 2 années d'étude au cours desquelles notre programme s'est attaché à suivre la chimie de l'eau du réseau hydrographique. Les caractéristiques des contaminations nutritives qui ont été observées sont restées très proches de celles caractérisées dans la Loue elle-même.*

En revanche, des mesures réalisées en dehors du présent programme dans des affluents de taille plus modeste (comme le Raffenot, ou la Mée,) ont montré que ces affluents pouvaient être affectés de pics de phosphore notoires. Cependant, de telles contaminations si elles sont advenues durant les 17 campagnes de prélèvements et de mesures réalisées entre 2013 et 2015 ne se sont jamais reflétées sur la chimie de l'eau de la Loue elle-même au cours.

A ce sujet, il est important de noter que les analyses d'eau en semi-continu qui sont effectuées depuis 2016 dans le cadre du programme « Quarstic » mené par le BRGM et le CD 25 corroborent nos observations en les complétant sur 2 points (BRGM, 2018)⁴. Sur 2 des 5 stations étudiées (Arçon, sur le Doubs avant les pertes, et Vuillafans, sur la Loue), les teneurs en nitrates descendent régulièrement sous la barre des 1 mg/L au printemps et en automne. Des teneurs en carbone organique dépassant 5 ou 10 mg/L sont simultanément observées pour ces stations, à ces occasions, mais des teneurs du même ordre se retrouvent aussi dans certains prélèvements de la source de la Loue.

Ces plus faibles teneurs en nitrates, périodiques, pourraient résulter de phases de plus forte production algale, absorbant d'avantage d'azote. Corrélativement, la dégradation ou/et le détachement et le fractionnement des algues benthiques, lorsqu'elles sont plus abondantes, se traduirait par une augmentation des teneurs en carbone dissous et particulaire.

⁴ BRGM 2018. Projet QUARSTIC : QUALité des eaux et Réseau de Surveillance des rivières Comtoises Rapport final, 167 pages.

Contaminations nutritives des sédiments et des MES

Sur une grande partie de la Loue, les teneurs en phosphore des sédiments sont comprises entre 400 et 800 mg kg⁻¹ MS (figure 13). Ces valeurs indiquent des contaminations faibles (US EPA 1979, MOE 1993, Pavlowsky & Derek 2010).

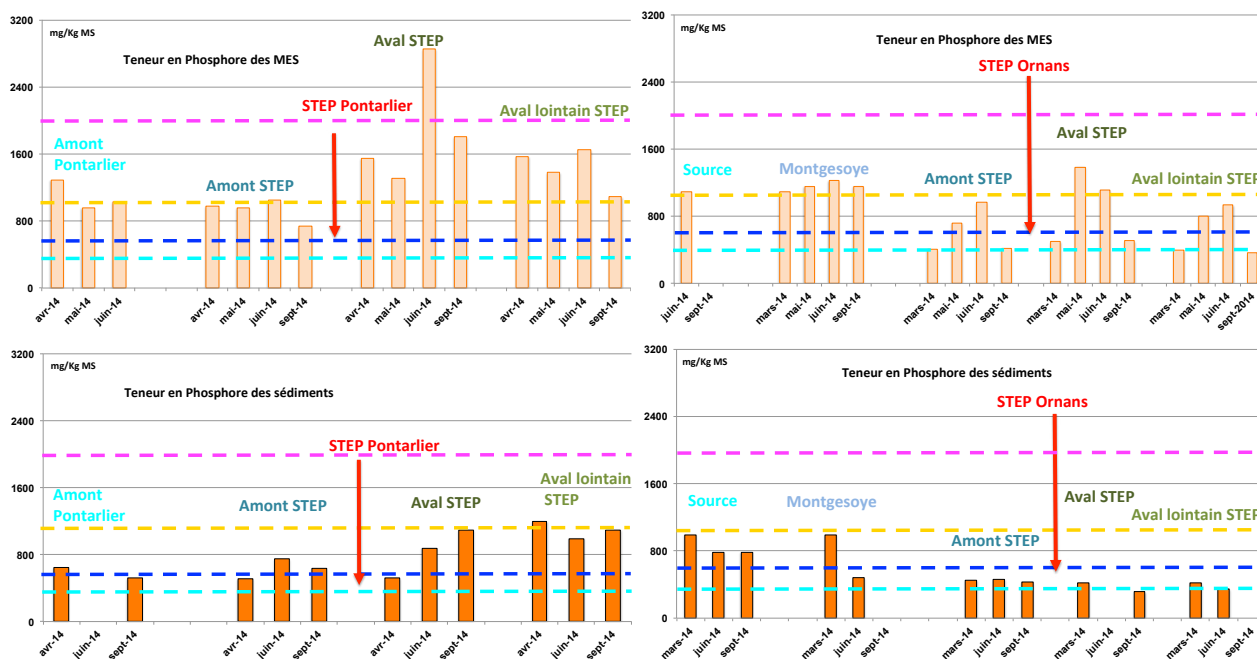


Figure 13. Comparaison des teneurs en phosphore des sédiments et des matières en suspension prélevées à plusieurs occasions dans le Doubs à l'amont et à l'aval de l'agglomération Pontisallienne (à gauche) et dans la source de la Loue ainsi qu'à l'amont et à l'aval de l'agglomération d'Ornans (à droite)

En magenta = seuil des concentrations provoquant d'important déséquilibres biologiques (MOE 1993) ;
En jaune = seuil de contamination anthropique nette (Pavlowsky & Derek 2000) ;
En bleu = seuil à de concentration maximale sans effet notable sur la production algale (MOE 1993) ;
En - cyan = seuil de non contamination (Pavlowsky & Derek 2000)

Toutefois, dans le Doubs à l'aval de la station d'épuration de Pontarlier, et dans, une moindre mesure, dans la Loue à l'amont d'Ornans, les teneurs en phosphore des MES peuvent atteindre des niveaux susceptibles de favoriser la production végétale voire de déclencher des proliférations algales (US EPA 1979, MOE 1993, MOE 2008, Pavlowsky & Derek 2010).

Malgré tout, à l'aval de la STEP d'Ornans, il n'y a pas d'augmentation significative des teneurs en phosphore dans les sédiments et les MES. En revanche, à l'aval de la STEP de Pontarlier, les sédiments et les MES montrent un enrichissement marqué en phosphore, qui semble trouver écho dans les parties apicales de la Loue (source).

L'influence des rejets urbains traités sur les teneurs en azote des MES est plus marquée : elles sont plus élevées à l'aval des STEP de Pontarlier et d'Ornans qu'à l'amont (figure 14). Cependant de fortes concentrations en cet élément sont aussi observées dans les MES issues des secteurs à l'amont des deux agglomérations.

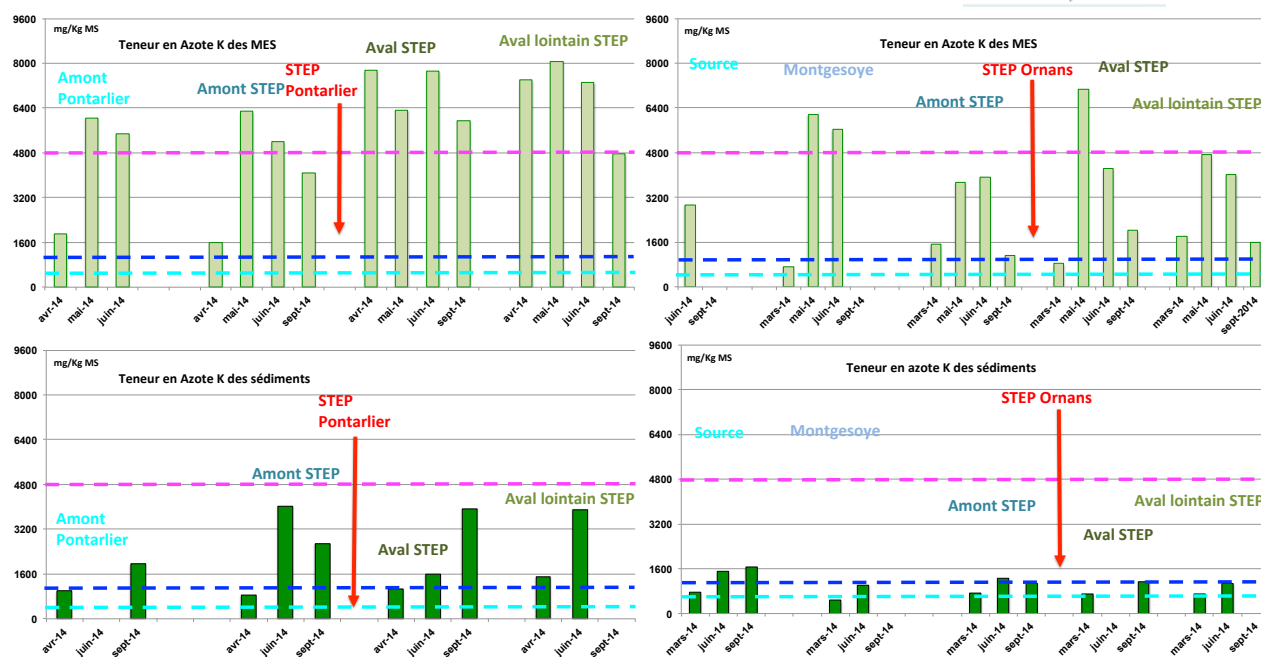


Figure 14. Comparaison des teneurs en azote des sédiments et des matières en suspension prélevées à plusieurs occasions dans le Doubs à l'amont et à l'aval de l'agglomération de Pontarlier (à gauche) et dans la source de la Loue ainsi qu'à l'amont et à l'aval de l'agglomération d'Ornans (à droite)

En magenta = seuil des concentrations provoquant d'important déséquilibres biologiques (MOE 1993) ;
 En bleu = seuil de concentration maximale sans effet notable sur la production algale (MOE 1993) ;
 En - cyan = seuil de non contamination (Pavlovsky & Derek 2000)

Contaminations par des polluants persistants : pesticides, HAP, ETM et résidus médicamenteux

L'appauvrissement des édifices biologiques consommateurs des rivières calcaires comtoises touchant aussi bien les taxons saprobiontes que les groupes oxyphiles nous a conduit très tôt à suspecter des effets néfastes de contaminants autres que les nutriments (TELEOS 2002⁵). Le déficit drastique de macroinvertébrés herbivores observé en dépit des accumulations de producteurs primaires sur les fonds de la Loue corroborait cette hypothèse dès le début de nos investigations.

Or, les suivis de type réseaux, surtout tournés vers la matrice eau, donc sur les contaminants présentant une certaine solubilité, ne décelait qu'en de très faibles occasions des contaminations. Parallèlement, les rares analyses disponibles sur des sédiments consistaient en des balayages multirésidus présentant des seuils de détection élevés.

Par conséquent, nous avons entrepris de prélever un grand nombre d'échantillons d'eau, de sédiments et MES, de masses algales et de poissons pour y analyser des éléments en traces métalliques ETM), des pesticides, des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et des résidus médicamenteux.

⁵ TELEOS 2002. Etude des potentiels écologiques aquatiques des sites Natura 2000 de la Loue et du Lison. Étude réalisée pour la DIREN Franche-Comté, 90 p. + ann. + atlas de 36 cartes.

Les investigations réalisées sur ces matrices chimiquement complexes (en dehors de l'eau) ont exigé de s'appuyer ou de développer des techniques de séparation (procédés dont la mise au point est longue et difficile) permettant d'atteindre des seuils de détection inférieurs d'un ou plusieurs ordres de grandeur à ceux des méthodes de routine utilisées dans les surveillances de routine de telle sorte d'atteindre les concentrations pertinentes au regard des repères écotoxicologiques disponibles.

Parallèlement, une approche écotoxicologique visant à cerner les effets d'une exposition conjointe à un insecticide (cyperméthrine) et un HAP (benzo-a-pyrène) a été conduite.

Pesticides

Les résultats obtenus montrent que des contaminations significatives par différents pesticides sont avérées dans la Loue dans les différentes matrices étudiées (eaux, biote, sédiments et MES). Ces contaminations sont variables dans le temps et l'espace, mais elles peuvent atteindre et dépasser les repères écotoxicologiques disponibles dans la littérature, c'est-à-dire qu'elles sont susceptibles à certaines occasions d'engendrer des effets adverses parmi les communautés biologiques exposées.

L'analyse des résultats montre qu'il existe une série de substances préoccupantes en ce qui concerne la qualité des eaux, des sédiments ou l'exposition des organismes aquatiques, si l'on considère à la fois la fréquence des contaminations et les valeurs maximales atteintes.

Ces substances sont le DDT et ses métabolites, la cyperméthrine, l'hexachlorobenzène, le lindane et le tébuconazole, auxquelles on peut ajouter à un degré moindre le chlorpyrifos, la deltaméthrine, la perméthrine, la pendiméthaline et le propiconazole (figure 15). Ces contaminations peuvent atteindre des teneurs élevées supérieures aux Valeurs Guides Environnementales pour plusieurs molécules.

La fréquence de la présence, dans la plupart des matrices analysées mais surtout dans les sédiments et dans les tissus de poissons, de molécules (ou de leurs métabolites) bannies de longue date laisse penser que les processus de minéralisation de la matière organique des sols jouent un rôle important dans les transferts de ces polluants vers les systèmes aquatiques.

A l'exception de la cyperméthrine, de la deltaméthrine, de la pendiméthaline et du tébuconazole qui sont encore autorisés et utilisés de nos jours, les autres molécules sont interdites et certaines le sont depuis longtemps. Il est peu vraisemblable que leur présence dans les cours d'eau traduise une utilisation actuelle illicite : même si des stocks anciens peuvent encore exister et être utilisés occasionnellement, il est beaucoup plus probable qu'il s'agisse ici d'héritages liés à des usages anciens. Une hypothèse réaliste est qu'une remobilisation de ces polluants anciens est en cours en raison de l'intensification des pratiques agricoles : des résidus de pesticides précédemment adsorbés sur la matière organique postérieurement à leur utilisation sont libérés en raison de la minéralisation des sols consécutive à l'accroissement des labours et autres travaux de la terre.

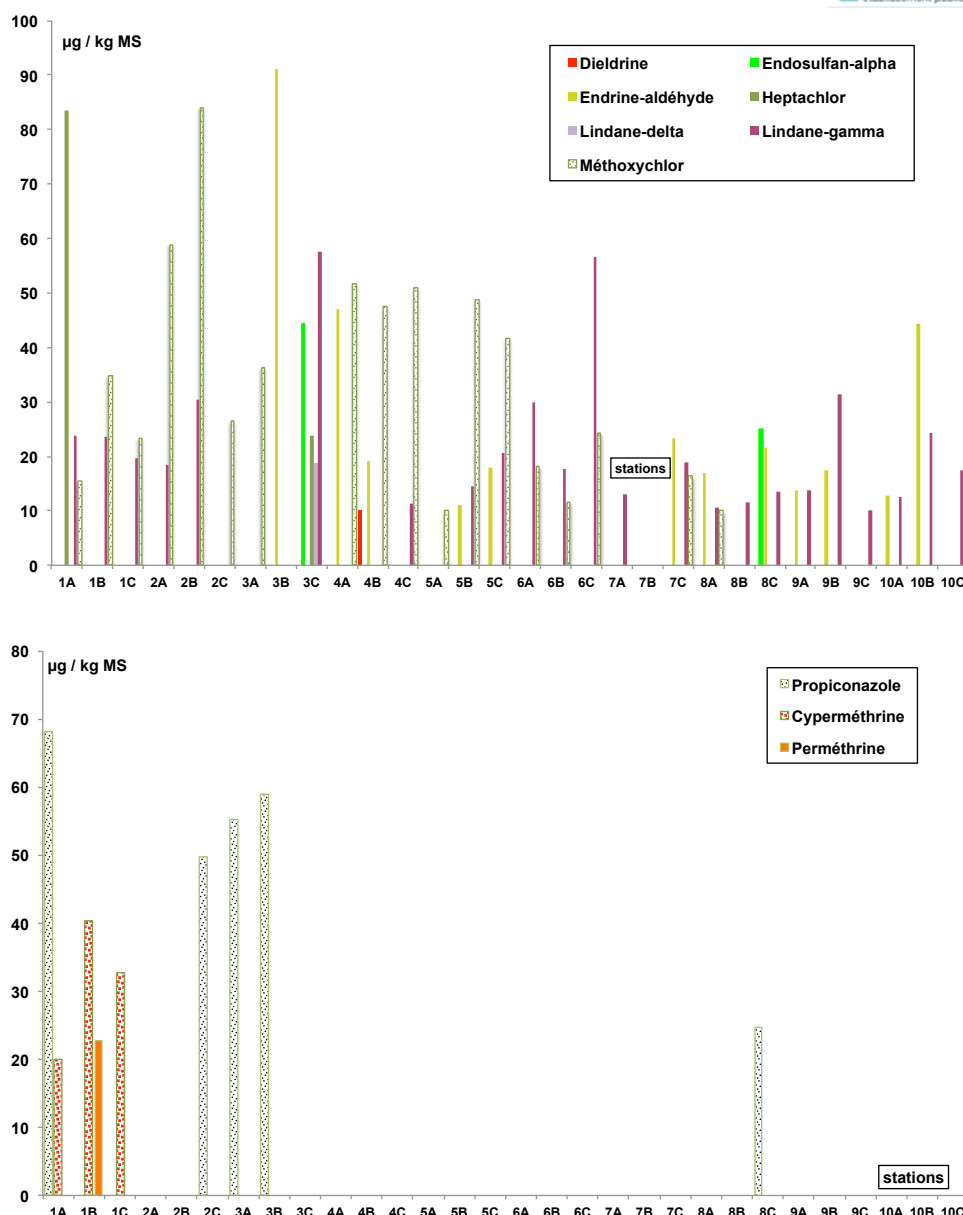


Figure 15 Concentrations en pesticides chlorés (en haut) et en pyréthrinoides et fongicides (en bas) quantifiées parmi 10 molécules recherchées dans les sédiments prélevés en septembre 2014 à raison de 3 échantillons (ABC) sur chacune de 10 stations la Loue (1 à 10) et sur une station sur le Lison aval, à Lizine (11).

Parallèlement, les résultats obtenus en matière d'exposition d'un organisme aquatique (*G. pulex*) à des sédiments contaminés confirme que la toxicité de certaines molécules a pu être fortement sous-évaluée par le fait que seuls étaient considérés les concentrations de contaminants correspondant à la fraction solubilisée dans l'eau. Or nombre de ces substances sont lipophiles, ce qui leur confère d'une part des capacités de perméation au travers des membranes biologiques (accroissant ainsi leur potentiel toxique) et d'autre part la possibilité de s'adsorber à plus ou moins long terme sur les constituants organiques des sols, des MES et des sédiments.

Des concentrations non négligeables de substances organochlorées (notamment hexachlorobenzène, DDT, lindane, dieldrine) ont été trouvées dans la chair et le foie de salmonidés pêchés dans la Loue et la Bienne en 2010, 2015 et 2016 (figure 16).

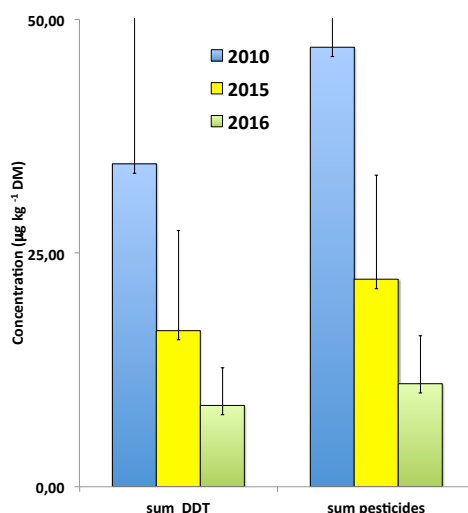


Figure 16. Somme des isomères de DDT et somme des pesticides présents dans la chair de truites et de ombres prélevés en 2010, 2015 et 2016.

Les analyses de pesticides réalisées dans les poissons montrent ainsi que même si les concentrations de contaminants présentes dans le milieu sont usuellement faibles et même si la présence de ces molécules n'y est pas constante, les poissons les bioaccumulent à des niveaux non négligeables.

Hydrocarbures aromatiques polycycliques

Par ailleurs, les concentrations en HAP dans les MES et les sédiments dépassent systématiquement le seuil $TEC_{\Sigma HAP}$ ($1610 \mu g kg^{-1} MS$), établi par MacDonald *et al.* (2000), ce qui est préoccupant. En outre, les résultats obtenus *in situ* montrent l'existence d'une grande variété saisonnière des niveaux de HAP avec des pics observés notamment en période hivernale.

Par ailleurs, les profils moléculaires et les variations temporelles des concentrations en HAP des différentes stations et des différentes campagnes d'échantillonnage sont très similaires. Ceci suggère que les phénomènes à l'origine de la contamination par les HAP opèrent à l'échelle du bassin versant.

Les signatures moléculaires de nos échantillons sont proches de celles de particules associées à diverses sources anthropiques, et en particulier à la pollution grise. Il semble en effet que les HAP proviennent essentiellement des poussières de combustion des moteurs Diesel ainsi que de l'usure d'anciens tapis routiers contenant des enrobés issus de goudron de houille.

L'ensemble des travaux réalisés depuis 2013 montre à l'évidence que les contaminations par les HAP des cours d'eau du massif jurassien sont prégnantes et qu'elles contribuent à la dégradation de ces écosystèmes.

Au regard du contexte réglementaire (INERIS, 2019) et des données de la littérature internationale, nos résultats montrent à l'évidence que les contaminations par les HAP

lourds des sédiments et MES des cours d'eau du massif jurassien sont fréquentes et atteignent des niveaux tels qu'ils peuvent impacter les communautés benthiques.

Ces contaminations par les HAP contribuent à l'érosion de la richesse biologique de la faune benthique et à la perte de qualité des rivières karstiques du massif jurassien. En l'état actuel des informations disponibles, il n'est cependant pas possible de quantifier la part de ces contaminations dans les dégradations observées.

Éléments en traces métalliques

Les ETM les plus couramment mesurés dans les programmes de surveillance de l'environnement (cadmium, plomb, mercure, nickel, chrome, cuivre et zinc) et d'autres ETM susceptibles d'affecter les organismes aquatiques (cobalt, manganèse, molybdène, antimoine, sélénium, étain, strontium, titane, thallium et vanadium) ont été analysés dans une série de matrices environnementales (eaux superficielles, eaux lysimétriques, eaux routières, rejets de STEP, sédiments, matières en suspension, et biote).

Les teneurs en ETM mesurées dans les différentes matrices analysées ont été confrontées à titre indicatif et lorsque cela était possible aux valeurs réglementaires et aux repères écotoxicologiques disponibles. Il faut rappeler que la conformité ou la non conformité aux valeurs réglementaires ne sont pas synonymes de présence ou absence d'effets délétères sur les communautés biologiques. Une non conformité peut ne pas correspondre à un effet néfaste alors qu'une conformité peut *a contrario* s'accompagner d'effets néfastes.

L'ensemble des investigations réalisées depuis 2013 en matière de teneurs en ETM dans les différentes matrices environnementales étudiées montrent que les rivières karstiques étudiées ne présentent usuellement pas de concentrations en cadmium, plomb, mercure, ou chrome dépassant les repères écotoxicologiques et n'induisent vraisemblablement pas d'effet néfaste majeur sur la faune et la flore. Ces contaminants ne semblent donc pas jouer un rôle déterminant dans la dégradation actuelle de ces écosystèmes.

A l'exception des abords de la ville d'Ornans et des rejets de sa STEP, les concentrations en nickel et en zinc mesurées de 2013 à 2018 ne sont pas de nature à provoquer des effets néfastes sur les systèmes aquatiques.

Les teneurs en cuivre mesurées dans les différentes matrices échantillonnées pendant le programme sont de nature à provoquer occasionnellement des effets négatifs parmi les organismes aquatiques exposés et notamment parmi les invertébrés et les poissons.

Parallèlement, les concentrations maximales en cobalt, manganèse, molybdène, antimoine, étain, titane, thallium et vanadium, sont en règle générale inférieures ou très inférieures aux repères écotoxicologiques. La probabilité d'effets délétères sur les communautés biologiques consécutivement à la présence de ces éléments dans les milieux aquatiques peut donc être considérée comme très faible ou nulle.

A contrario, les concentrations maximales en sélénium et strontium sont supérieures aux repères écotoxicologiques, notamment au voisinage de la STEP de Pontarlier. Il n'est ainsi pas possible d'écarter un risque associé à ces deux éléments pour les communautés biologiques exposées. Ces deux éléments sont utilisés séparément ou conjointement par de nombreux types d'industries (électronique, métallurgie, peintures, verres et céramiques, pharmacie, engrais ...).

En résumé, les concentrations environnementales de la majorité des ETM analysés sont faibles et se situent le plus souvent en deçà des repères écotoxicologiques marquant la possibilité d'observer des effets adverses dans les communautés biologiques. Le cuivre dans l'ensemble du bassin versant et dans une moindre mesure le nickel, le zinc, le sélénium et le strontium méritent toutefois une attention particulière car il semble exister localement des rejets non négligeables.

Résidus médicamenteux

Les résultats obtenus montrent que la Loue et le Doubs, sont contaminées de manière sensible par plusieurs résidus médicamenteux, et plus particulièrement par la carbamazépine, le diclofénac, l'ofloxacine et le sulfaméthoxazole, dont les teneurs dépassent parfois les valeurs seuils actuellement disponibles dans la littérature.

Selon nos résultats, les rejets des stations d'épuration constituent vraisemblablement une source majeure de contamination des cours d'eaux. En l'absence de cadre réglementaire clair, la littérature scientifique sur cette problématique, de plus en plus fournie, abonde d'évidences montrant la dangerosité et les risques liés à la présence de ces substances dans les environnements aquatiques (Ebele *et al.*, 2017⁶, Fent *et al.* 2006⁷, Kaczala et Blum, 2016⁸, Mohapatra *et al.* 2016⁹ et références citées).

En l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible d'évaluer la part prise par ces contaminants dans la dégradation de la qualité des eaux de la Loue et des rivières karstiques du massif jurassien, eu égard à leur activité biologique intrinsèque, il est certain que ces molécules, dont certaines sont couramment utilisées en médecine vétérinaire, participent à cette dégradation.

Toute mesure visant à limiter les usages non indispensables de ces molécules (tant en médecine humaine que vétérinaire) ou à mieux traiter les effluents (rejets de STEP, effluents d'élevage, aquaculture) contribuera à préserver les milieux récepteurs et à mieux préserver la santé publique.

Perturbations et altérations physiques

⁶ Anekwe Jennifer Ebele, Mohamed Abou-Elwafa Abdallah, Stuart Harrad, 2017. Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in the freshwater aquatic environment. *Emerging Contaminants* 3, 1-16

⁷ K Fent, AA. Weston, D Caminada. 2006 Ecotoxicology of human pharmaceuticals, *Aquatic Toxicology* 76, 122–159.

⁸ F Kaczala S Blum. 2016. The Occurrence of Veterinary Pharmaceuticals in the Environment: A Review. *Current Analytical Chemistry*, 2016, 12, 169-182

⁹ D. P. Mohapatra & M. Cledón & S. K. Brar & R. Y. Surampalli. 2016. Application of Wastewater and Biosolids in Soil: Occurrence and Fate of Emerging Contaminants. *Water Air Soil Pollut* (2016) 227: 77

Régime thermique

Des sondes thermiques à pas d'enregistrement horaire ont été installées entre juin 2013 et novembre 2017 sur les 10 stations jalonnant le domaine d'étude. Nos mesures montrent que les eaux de la Loue ont subi un réchauffement net par comparaison avec les températures rapportées dans la littérature entre 1968 et 1972 (figure 17). En revanche, durant le déroulement de notre programme de recherches, les températures maximales estivales sont restées constamment propices au développement optimal de la truite et de l'ombre sur les 40 premiers kilomètres de la Loue, y compris en 2017 et en 2015.

En 2017, les températures estivales de l'eau de la Loue à l'aval de la confluence du Lison ont dépassé le seuil de développement optimal pour la truite. Elles n'ont cependant pas atteint les gammes létales pour cette espèce, ni dépasser le seuil de confort pour l'ombre puisqu'elles sont restées en deçà de 22 °C.

En 2015, les températures de la Loue aval ont nettement dépassé la température optimale de développement de la truite. En revanche, elles restent favorables à l'ombre, sauf sur la station de Cessey pour laquelle un doute métrologique concernant l'immersion de la sonde demeure.

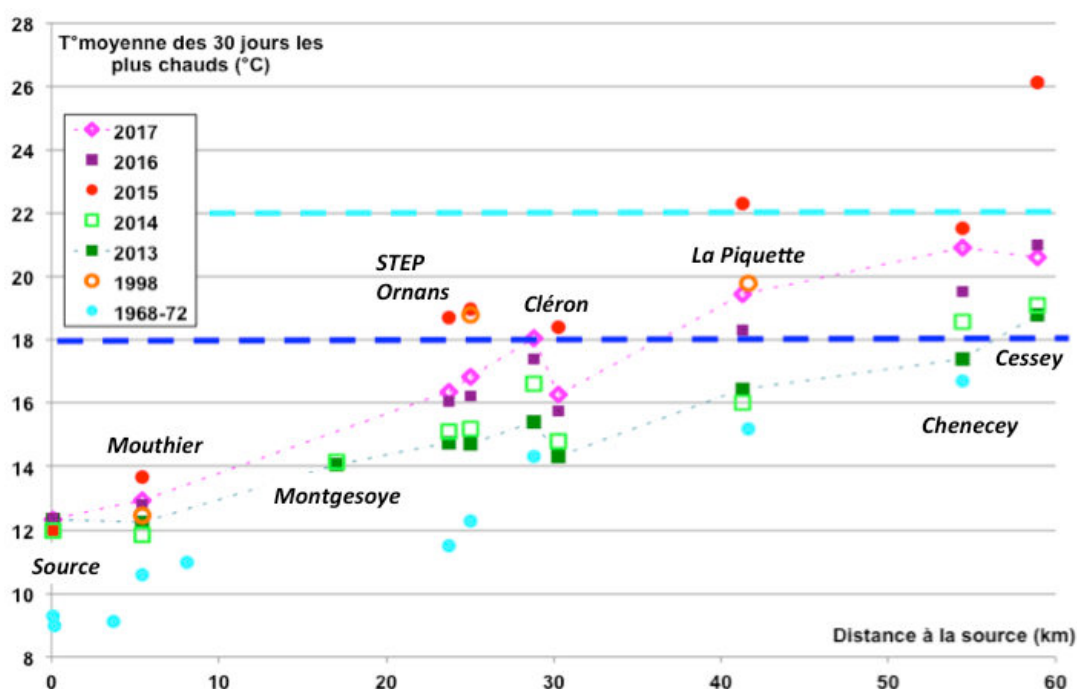


Figure 17. Evolution spatio-temporelle de la température maximale moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds enregistrées à l'aide de sonde à pas horaires entre 2013 et 2017 sur de 8 à 10 stations jalonnant la Loue ; comparaison avec le même indicateur mesuré entre 1968 et 1972 à l'aide de thermomètre mini-maxi ;
En bleu : limite supérieure de la température optimale de développement pour la truite
En cyan : limite supérieure de la température optimale de développement pour l'ombre

Par conséquent, même si les mesures effectuées à la fin des années 1960 sont issues d'un protocole et de matériels très différents, la tendance au réchauffement est avérée.

Sur les secteurs à l'aval d'Ornans, le réchauffement reste modéré lors des années arrosées (2013 et 2014), mais est plus net lors des années sèches (2015 et 2018).

Le réchauffement des eaux qui est observé ne peut expliquer à lui seul les déséquilibres biologiques observés. En effet, le régime thermique de la Loue demeure très favorable aux organismes électifs de la zone à truite, sur la totalité du linéaire étudié pour les années où les étés sont arrosés, et au moins sur ses quarante premiers kilomètres, y compris durant les années sèches et chaudes. Même durant ces périodes, les températures de la partie aval restent favorables à l'ombre de l'aval de la confluence avec le Lison jusqu'à l'amont de Quingey au moins.

Cependant, les causes de la forte augmentation de la température estivale observée à la source de la Loue depuis 1973 mériteraient d'être explorées plus avant. Si cette tendance n'est pas due au changement de matériel ni de protocole de mesure entre les deux périodes de mesures, elle pourrait être consécutive aux importantes modifications morphologiques subies par le Doubs à l'aval de Pontarlier et jusque bien en aval d'Arçon depuis les années 1980.

En effet, tout au long de ce linéaire, le cours d'eau a été sévèrement chenalisé et enfoncé, pour des raisons d'hydraulique urbaine et à la suite de la construction de la station d'épuration (comm. person. André Rousselet, ancien garde CSP du secteur). En outre, les extractions de graviers, qui se sont développées depuis cette époque dans la plaine de l'Arlier, dont la nappe alimente le Doubs, se sont probablement elles aussi traduites par une réduction des débits d'étiage, en raison de l'augmentation de l'évapotranspiration induite par la multiplication des gravières.

Ces pressions conjointes ont pu induire à leur tour l'étalement des lames d'eau d'étiage et son réchauffement juste avant les pertes qui nourrissent la source de la Loue. Les mesures réalisées par la fédération de pêche du Doubs et par le SMMAH D confirment le réchauffement important des eaux du Doubs depuis 1973, à l'aval mais aussi à l'amont de Pontarlier. En revanche, les processus thermiques advenant dans les conduits karstiques ne sont pas connus.

Parallèlement, à l'aval de la confluence avec le Lison, le réchauffement des eaux de la Loue est notable durant les années sèches et chaudes, même si la rivière continue à bénéficier ponctuellement d'arrivées d'eau froide subaquatiques. Cette tendance au réchauffement affecte donc une grande partie de la zone à ombre de la Loue, qui s'étendait originellement jusqu'à sa confluence avec le Doubs.

A l'aval d'Arc-et-Senans, les fortes tendances au réchauffement sont liées aux travaux de chenalisation qui ont incisé et simplifié le chenal, désormais corseté et jalonné de seuils. Entre la confluence du Lison et Arc-et-Senans, la rectification de la totalité des petits affluents et l'assèchement conjoint des zones humides sont aussi susceptibles d'expliquer une partie du phénomène. Enfin, la Loue et le Lison ayant été longtemps utilisés pour le flottage du bois, ces rivières ont aussi subi des enfoncements et une chenalisation. Or ce processus s'accompagne généralement d'une réduction et d'un réchauffement des débits d'étiage.

Qualité physique

Les capacités biogènes d'un cours d'eau dépendent de sa qualité chimique et physico-chimique, mais aussi de la nature et de la diversité des mosaïques des biotopes, des faciès et des habitats qui le composent. Au cours du programme de recherches, la qualité physique de la Loue a été mesurée aux deux échelles emboîtées qui la structurent.

Dans un premier temps, une analyse cartographique standard de l'attractivité et de l'hétérogénéité des mosaïques d'habitats aquatiques a été effectuée sur chacune des 12 stations étudiées sur la Loue et le Lison selon le protocole IAM (Indice d'Attractivité Morphodynamique, Degiorgi *et al.* 2002). Cette approche montre que la quasi totalité du linéaire des deux cours d'eau souffre de déséquilibres ou altérations morphologiques (figure 18).

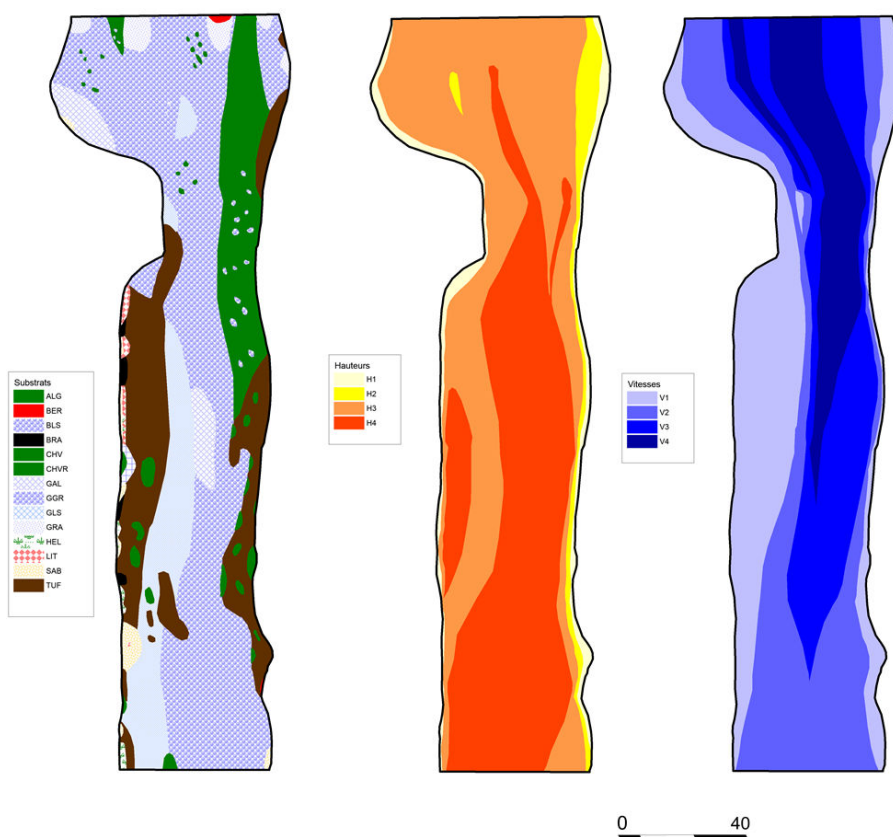


Figure 18. Cartographie des mosaïques de substrats-soutres, de profondeurs et de vitesses de courant de la station LOU 5 (Maisière Notre-Dame)

En effet, sur la haute et moyenne Loue comme sur le Lison, les capacités habitationnelles des stations étudiées ne sont comprises qu'entre 34 et 75 % du potentiel optimum (tableau 3). Ces analyses indiquent en particulier un déficit accentué des branchages immergés et des sous-berges.

Or, ces 2 composantes jouent un rôle biogène prépondérant dans le cas des rivières calcaires fraîche à fonds de galets et de graviers (« *chalk stream* »). En effet, ces éléments ligneux fournissent des caches et des abris irremplaçables. Ils témoignent aussi de la connectivité de la rivière avec ses franges humides.

Stations	LOU1	LOU2	LOU3	LOU4	LOU5	LOU6	LOU7	LOU8	LOU9	LOU10	LIS1	LIS2
Var. substrats	4	6	8	9	11	9	11	10	9	11	6	10
Var. prof.	4	4	4	4	4	5	5	4	5	5	4	4
Var. vitesses	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5	4	4
Attractivité	43	34	33	36	22	41	36	34	35	38,6	46	39
IAM	3438	4037	5328	6472	3845	9117	10016	6814	7763	10608	4419	6243
Capacité H.	34%	34%	42%	53%	30%	72%	75%	47%	50%	69%	44%	56%

Tableau 4. Indicateurs de l'hétérogénéité et de l'attractivité des mosaïques d'habitats de 10 stations de la Loue et de 2 stations du lison (var = variété ; prof. = profondeur ; IAM = indice d'attractivité Morphodynamique ; H. = habitationnelle)

Ainsi, dans une rivière calcaire en équilibre avec ses berges et sa zone inondable, les abris et caches fournies par les branches ou les racines immergées, ainsi que par les débris ligneux grossiers peuvent recouvrir couramment de 5 à 30% des fonds. Or, les surfaces relatives des bois morts immergés sont, sur la totalité des 10 stations cartographiées, nettement inférieure à 1 %.

Parallèlement, lors des étiages accentués faisant suite à des épisodes de lessivages, les colmatages induits par les algues filamenteuses réduisent encore la qualité habitationnelle des radiers et des plats. En effet, ces accumulations végétales obturent les interstices très biogènes ménagés par les substrats pierreux, et participent à la densification et à la fermeture des herbiers d'hydrophytes. En outre, après chaque crue, le dépôt de matières en suspension organo-minérales fines accentue ou amorce ce colmatage. Enfin, des précipitations calcitiques de plus en plus intenses formant un tuf de plus en plus compact comblent elles aussi les anfractuosités de toutes tailles, transformant les nassiss en bande bétonnée.

Dans un deuxième temps, une analyse de la qualité physique à l'échelle globale a été effectuée sur la Loue et ses principaux affluents à l'aide de la méthode « tronçon (Teleos 2002). Ce diagnostic confirme que le défaut d'éléments ligneux immergés résulte essentiellement de la pauvreté de la ripisylve connective.

Pourtant, le linéaire des berges de la Loue émaillée d'arbres ou d'arbustes varie, selon les secteurs, de 50 à 100 % avec une valeur moyenne de 71 %. Cependant, d'une part, une tendance insidieuse à l'enfoncement ou et à l'incision active des fonds de la Loue, également patente dans le cas du Lison, déconnecte la ripisylve qui se retrouve souvent perchée et dépérissante. D'autre part, la largeur moyenne des franges arbustives et arborescentes ne dépasse pas 3,5 m par berge pour la Loue.

La ripisylve, perchée, est donc presque toujours réduite à un simple cordon, séparant mal les pâtures de la rivière. La banalisation des franges arborescentes étiées est souvent accentuée par des plantations de peupliers, ou par l'expansion de plantes invasives (buddleia, balsamine des marais, érables Negundo...) concurrençant les essences autochtones plus biogènes (frênes, aulnes, saules...).

Le petit nombre d'embâcles observés dans l'eau pourrait aussi être dû à l'entretien et à l'enlèvement systématiques des bois morts, ou des arbres penchés. La simplification et la banalisation de la ripisylve ainsi que des zones humides et des franges tampons qui lui sont associées, étaient déjà signalées il y a une douzaine d'années lors de l'étude Natural 2000 « Loue-Lison » (TELEOS 2002).

En termes de causalité, la déconnexion des franges humides et des lits d'étiage de la Loue et du Lison semble avoir été amorcée par les pressions de chenalisation accompagnant le flottage du bois pratiqué au XVIII^{ème} siècle sur la Loue à partir de Mouthier et sur le Lison à partir de Nans-sous-Se-Anne. L'enfoncement du chenal des 2 cours d'eau a ensuite été accentué par des curages et des extractions de graviers.

L'incision de la Loue et du Lison pourrait aussi avoir été amplifiée par l'éboulement de quelques seuils très anciens, tombés en désuétude. En effet, en l'absence d'un transport solide suffisamment consistant, et devant le blocage de toute mobilité latérale, l'effacement de ces ouvrages s'est accompagné d'un abaissement notoire de l'altitude des lignes d'eau d'étiage (voir par exemple l'aval de Notre Dame de Scey).

Enfin, il est possible que les modifications hydrologiques susceptibles d'être induites par le dérèglement climatique accentuent encore ces désordres. En particulier, des crues plus subites ou plus fortes, en aggravant la force du lessivage des bassins versants, entraînent des turbidités plus importantes, et donc des colmatages plus intenses. Parallèlement, si les débits d'étiage de la Loue, soutenus par les apports karstiques, ne suivent pas de tendance à la baisse, il semble que l'étalement des lames d'eau d'étiage induite par les tendances à l'incision et favorisent le réchauffement et la production algale.

Sources potentielles de contamination par l'azote et le phosphore

De 2013 à 2014, nous avons réalisé un premier inventaire des pressions anthropiques exercées sur le bassin versant en nous intéressant d'abord aux sources de contamination organique et nutritive (Chanez *et al.* 2014)¹⁰. Cette démarche avait pour but de comparer l'importance relative des flux incidents d'origine domestique, industrielle ou agricole, sans préjuger de leur transférabilité, de façon à orienter la recherche des sources de pollution les plus impactantes sur les cours d'eau calcaires.

¹⁰ CHANEZ E., DEGIORGI F., LUCOT E., BADOT P.M. 2014. Les flux d'azote et de phosphore dans le bassin versant de la haute et moyenne Loue. Rapport rédigé dans le cadre du programme « ARK » de recherche des causes d'altération des rivières comtoises pour l'Agence de l'Eau RMC, la Région Franche-Comté, le Conseil Général du Doubs, 114p.

Dans cette optique, plusieurs hypothèses ont dû être formulées pour estimer les flux nutritifs incidents théoriques :

- des taux d'épuration théoriques minimum et maximum ont été calculés ou estimés à partir de la littérature, pour chacun des types de rejets considérés ;
- l'influence relative du sous bassin versant du Doubs apical a été prise en compte en pondérant les rejets qui en proviennent par des ratios d'un tiers à un septième correspondant à la proportion des pertes de ce cours d'eau dans le secteur de Pontarlier qui nourrissent la source de la Loue.

Les flux nutritifs incidents théoriques ainsi évalués ont été comparés à ceux – objectifs – mesurés dans les eaux de la Loue, à partir des analyses journalières de nitrates et de phosphates effectuées depuis 2003 par la commune de Besançon à Chenecey, pour sa prise d'eau AEP. L'ordre de grandeur des flux ainsi calculés dans le cours d'eau a été corroboré et validé par les mesures en semi-continu effectuées dans le cadre du programme QUARSTIC (Charlier *et al.*, 2018). Les gammes de flux d'azote et de phosphore mesurés par ces 2 approches confirment que la charge nutritive de la Loue est importante (tableau 5, figure 19).

Type de BV et d'occupation des sols	N (kg km ⁻²)	P (kg km ⁻²)	Source
Finlande forêt extensive	140	6	Rankinen et al 2016
USA BV agricole Bonne qualité de l'eau à l'aval	432	19	Sheeder et Evan 2004
USA BV agricole Qualité de l'eau altérée à l'aval	1477	49	Sheeder et Evan 2004
Finlande agriculture intensive	1500	110	Rankinen et al 2016
BV Loue à Chenecey - azote	2000 à 2500		Chanez et al. 2014 Charlier et al. 2018
BV Loue à Chenecey - phosphore		50 à 100	Chanez et al. 2014 Charlier et al. 2018

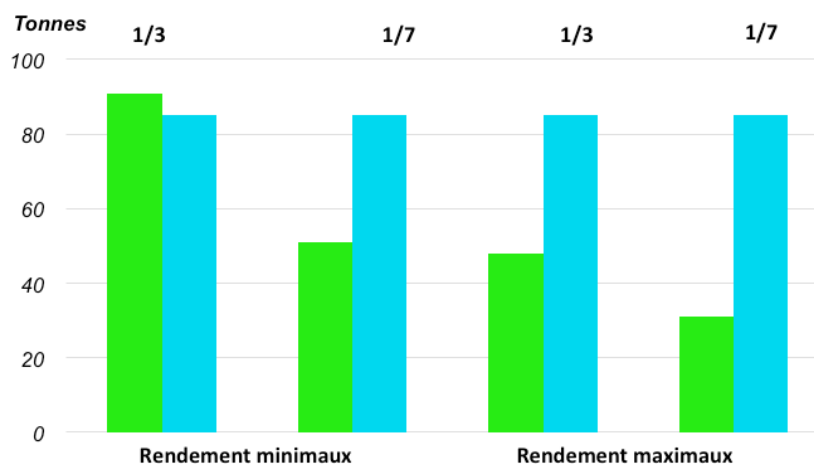
Tableau 5. Comparaison des flux de phosphore et d'azote évalués pour la Loue à Chenecey avec ceux estimés dans des bassins versants à fonctionnalité connue

Notre analyse des données disponibles (Chanez *et al.* 2014) a aussi montré que les STEP dont la capacité est comprise entre 200 et 2000 équivalents-habitants et qui ne traitent que 15 % des effluents domestiques du bassin versant, rejettent 30 à 45 % des flux de phosphore et d'azote domestiques. Corollairement, les stations d'épuration les plus importantes, comme celle d'Ornans et de Pontarlier, grâce à leurs meilleurs rendements d'épuration, collectent plus de 50 % des effluents et rejettent, elles, 25 à 40 % des flux azotés et phosphorés totaux.

La part des effluents, non traités ou peu traités, rejetés dans les cours d'eau lors des épisodes orageux n'a pu être quantifiée en raison de l'insuffisance des données relatives aux volumes concernés.

Phosphore total

■ Flux Loue ■ Flux domestique



Azote total

■ Flux domestique ■ Flux Loue

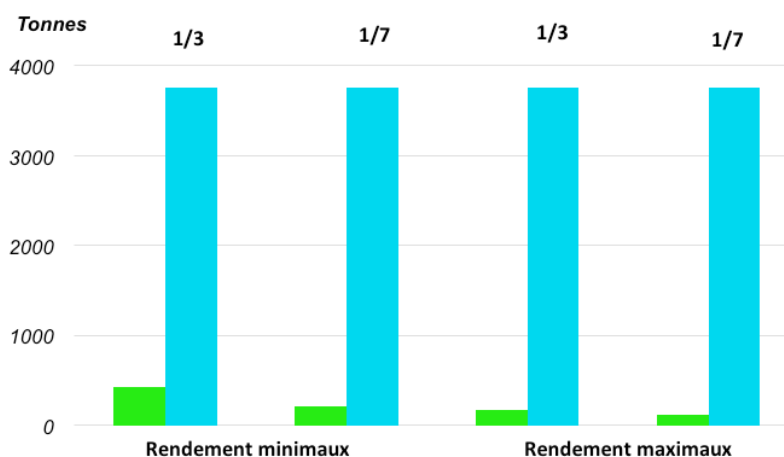


Figure 19. Comparaison entre les flux annuels moyens en N et P mesurés dans la Loue et les flux des rejets d'origine domestiques estimés en fonction du rendement d'épuration (minimum ou maximum) et de la contribution du Doubs apical (1/3 ou 1/7^{ème} du débit du Doubs apical)

Les flux émis par les industries agro-alimentaires raccordées aux réseaux collectifs d'épuration ont également été évalués. Selon les hypothèses retenues, ils sont compris entre 3 et 12 tonnes par an pour le phosphore et entre 8 et 40 tonnes par an pour l'azote. Il faut cependant noter que malgré nos efforts, nous n'avons pu obtenir les flux et des rendements d'épuration que de 40 établissements sur les 57 qui sont raccordés sur le territoire du SAGE Haut Doubs - Haute Loue. En outre, il n'a pas été possible d'obtenir les informations concernant les 13 établissements – parmi lesquels figurent plusieurs ICPE – de ce périmètre qui ne sont pas raccordés.

Malgré ces lacunes, l'analyse des données accessibles nous a conduit à considérer que les excès d'azote contaminant la Loue avait essentiellement une origine agricole. En effet, les exploitations de type bovins laitiers sont majoritaires sur le bassin versant hydrogéologique de la Loue, qui comporte plus de 860 exploitations élevant environ 90 000 Unités Gros Bétail (UGB, figure 20). Or la production de lait s'est fortement accrue dans les dernières décennies ce qui a provoqué l'augmentation des déjections animales à épandre.

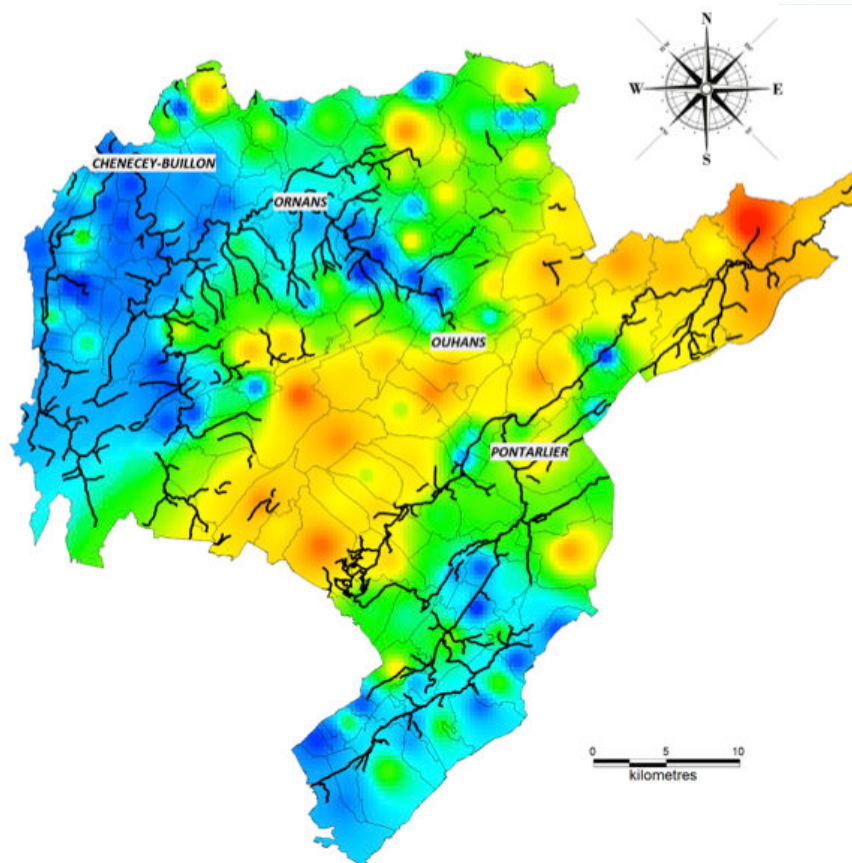


Figure 20. Représentation intrapolée de la densité d'UGB par commune sur le bassin versant SAGE Haut-Doubs / Haute-Loue (données CA25, 2010) ; plus les couleurs sont chaudes plus le nombre d'UGB est important (bleu foncé = 0 à 270, vert = 270 à 380, jaune = 380 à 600 et orange/rouge = 600 à 1860).

Les quantités de nutriments épandues sur les sols puis transférées ont été estimées suivant plusieurs modèles et hypothèses tirés de la littérature. Les quantités totales d'azote produites par les UGB bovins sont d'environ 4000 tonnes par an pour le bassin versant de la Loue et de 1900 tonnes par an pour le bassin versant du Haut-Doubs avant les pertes. Pour le phosphore, les charges pour les bassins versants de la Loue et du Haut-Doubs sont respectivement de 1900 et de 900 tonnes. Parallèlement, les apports de fertilisants minéraux par ha de SAU représente une quantité d'azote d'environ 1 800 tonnes par an et une quantité de phosphore d'un peu plus que 400 tonnes par an pour l'ensemble des deux bassins.

Il est beaucoup plus difficile d'évaluer la proportion de ces nutriments qui est transférée à travers les sols jusqu'à la rivière.

Les bilans apparents (solde en azote et en phosphore) sont extrêmement variables d'une exploitation à l'autre. Pour les exploitations laitières de Franche-Comté dont les données ont pu être obtenues via des rapports officiels, les bilans d'azote sont compris entre -1 et 78 unités N ha⁻¹ (32 en moyenne), soit une très forte plage de variations, vraisemblablement liée au degré d'intensification (choix sur les fourrages et le troupeau) des exploitations.

Ces considérations montrent donc l'intérêt et la nécessité d'obtenir des informations concernant les flux d'azote et de phosphore ainsi que de contaminants non nutritifs susceptibles d'être transférés à partir des sols agricoles, en tenant compte à la fois de leurs propriétés intrinsèques et des différences de conduites des exploitations agricoles.

Transferts à partir des sols agricoles

Le fonctionnement des sols agricoles de deux sous-bassins versants (et notamment les transferts possibles de formes azotées, carbonées et phosphorées vers les cours d'eau) a été appréhendé par une approche lysimétrique couplée à des analyses des eaux des cours d'eaux récepteurs. Le dispositif distingue 4 modalités définies en croisant les deux critères que sont la profondeur du sol (moyennement profond/superficiel) et la mise en valeur agricole (culture/prairie).

Des plaques lysimétriques au nombre 24 (correspondant à 2 sites, 4 modalités par site, 3 réplicats par modalités) ont été installées dans les bassins versants du Grand Bief (installation été 2015, premiers résultats novembre 2015) et de Plaisir Fontaine (installation été 2016, premiers résultats automne 2016). Les données analysées concernent les années 2016 et 2017 pour le Grand Bief et 2017 pour Plaisir Fontaine. Les premiers mois de fonctionnement des lysimètres n'ont pas été considérés dans les bilans, afin d'éviter les éventuels artefacts liés à l'installation et notamment au remaniement des sols induits par le creusement des fosses.

En pratique, quelques plaques lysimétriques ont montré des dysfonctionnements (4/24). En outre, les parcelles cultivées à Chasnans (bassin du Grand Bief, affluent de la Loue), ont été reconverties en prairies fin 2017, tandis qu'à Plaisir Fontaine (bassin du Ruisseau de Plaisir Fontaine, affluent de la Brême), les 2 parcelles initialement cultivées au début de l'expérimentation ont été converties en prairies fin 2016, puis à nouveau cultivées fin 2017 (figure 21). Ces changements de pratiques ont introduit une complexité supplémentaire dans l'analyse des résultats, mais ont en revanche permis de mettre en évidence l'importance capitale des travaux de la terre dans les transferts de nutriments du sol vers les eaux.

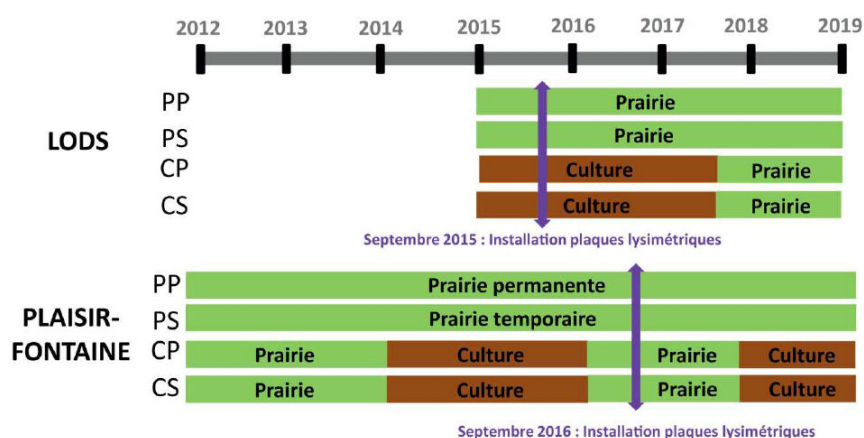


Figure 21 Chronologie des modifications de la mise en valeur agricole des parcelles utilisées dans le dispositif de collecte et d'analyse des eaux lysimétriques.

Les eaux recueillies par les plaques lysimétriques ont été récoltées et analysées après chaque épisode pluvieux ou neigeux (dans ce cas après la fonte), quand les précipitations étaient suffisantes pour permettre la percolation dans les sols.

A titre exploratoire et en conservant à l'esprit que ces estimations ont une valeur relative (les comparaisons entre modalités ont un sens), et qu'elles sont assorties d'incertitudes méthodologiques¹¹ qui empêchent de les considérer comme des mesures absolues, nous avons évalué en utilisant les volumes récoltés et les concentrations mesurées après chaque précipitation, les quantités théoriques de nitrates potentiellement transférées (en kg d'azote par ha) pour chaque modalité retenue (figure 21).

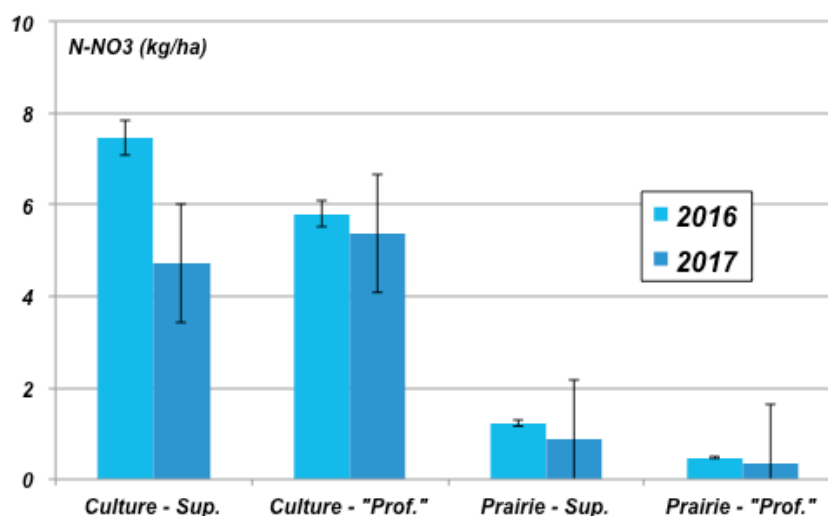


Figure 21. Quantités théoriques de nitrates potentiellement transférées (en kg d'azote par ha) dans le bassin versant du « Grand Bief » en fonction de chaque modalité (culture/prairie ; sols profonds/sols superficiels)

Toutes choses étant égales par ailleurs, les concentrations des nutriments azotés mesurés dans les eaux lysimétriques recueillies sous sol profond sont en règle générale égales ou inférieures à celles trouvées sous sol superficiel. De manière similaire, les concentrations mesurées sous prairie sont plus faibles que celles trouvées sous culture.

Ces résultats sont en parfaite cohérence avec ce qui est attendu et avec la littérature disponible. Les sols superficiels sont par exemple moins aptes à retenir les formes réactives solubles de l'azote, dont les nitrates, que les sols profonds. Les cultures, de par le travail du sol et les fertilisations plus importantes qu'elles impliquent, sont plus susceptibles de transférer ces formes solubles de l'azote réactif vers le karst et les milieux aquatiques.

Différents facteurs peuvent se conjuguer pour rendre inopérants les processus qui limitent naturellement les transferts d'azote réactif vers les milieux aquatiques, à savoir des apports azotés trop élevés, de fortes précipitations et une couverture végétale

¹¹ Les biais météorologiques peuvent être nombreux tant au niveau de la mesure des volumes récoltés (non prise en compte des écoulements latéraux, flacons de récolte de capacité limitée...) qu'au niveau des concentrations mesurées qui peuvent ne représenter qu'imparfaitement les importantes variations susceptibles de se produire lors d'un cycle de dessiccation-réhydratation-percolation dans le sol. Cependant, ces biais étant en grande partie systématiques – les mêmes événements météorologiques se produisent en même temps dans un même site –, les comparaisons entre modalités conservent leur validité.

inexistante ou faiblement active (pas ou peu d'interception et de prélèvements racinaires par la végétation). Pour ces deux derniers facteurs, de telles conditions sont souvent réunies au printemps avant le démarrage de la végétation et à partir de l'automne lorsqu'elle rentre en vie ralentie.

Parallèlement, les exportations de phosphore à travers les sols agricoles étudiés sont proportionnellement beaucoup plus modérés : les concentrations mesurées en cet élément sont généralement inférieures à 0,1 mg/L. Toutefois, elles peuvent atteindre sporadiquement 1 à 2 mg/L, en particulier après le retournement des parcelles, et dans une moindre mesure après les pâtures automnales.

Ces départs de phosphore à travers les sols coïncident partiellement avec les concentrations maximales mesurées en cours d'eau qui restent cependant très modestes. Les teneurs en phosphore total mesurées à plus de 40 reprises dans le Grand Bief et dans le Ruisseau de Plaisir Fontaine sont presque toujours inférieures à 0,1 mg/L et n'ont jamais dépassé 0,2 mg/L.

Les résultats obtenus en matière de conductivité électrique et de concentrations en bicarbonates dans les eaux lysimétriques forment un tout cohérent. La conductivité des eaux lysimétriques est élevée et rend compte de ceux mesurés dans la rivière, niveaux qui sont en constante augmentation depuis plusieurs décennies. La conductivité étant liée aux concentrations en bicarbonates, ces résultats indiquent que des modifications de l'équilibre calco-carbonique sont à l'oeuvre et traduisent vraisemblablement une minéralisation accrue de la matière organique des sols.

Cette augmentation de la minéralisation de la matière organique des sols trouve son origine dans les changements de pratiques agricoles (Sainju et al. 2008¹², Perrin et al. 2008¹³, Muller et al. 2018¹⁴, Zamanian et al. 2018¹⁵). Elle provoque la libération de dioxyde de carbone, qui favorise la dissolution du carbonate de calcium contenu dans la phase solide du sol et dans le substratum géologique.

Ces processus sont cohérents avec les dysfonctionnements constatés dans la rivière : la conjonction d'un apport accru de nutriments et de bicarbonates crée des conditions favorables à la prolifération des végétaux aquatiques. Les apports de nutriments azotés, normalement limitants, favorisent la croissance des végétaux, dont l'activité photosynthétique consomme le dioxyde de carbone. Corrélativement, ce processus favorise la précipitation des carbonates et provoque les encroûtements calcaires dont les observateurs de terrain rapportent l'intensification et le changement d'habitus depuis une vingtaine d'années dans la Loue (Teleos 2000).

Nos résultats indiquent que les mutations de l'agriculture du bassin versant de la Loue, en l'occurrence son intensification, ont des conséquences tangibles sur les transferts vers les cours d'eaux, participent aux modifications de la physico-chimie des eaux, et *in fine* altèrent les édifices biologiques.

¹² J. Environ. Qual. 37:98–106 (2008).

¹³ Geochimica et Cosmochimica Acta 72(13):3105-3123

¹⁴ Biogéoscience discussion 2018

¹⁵ Glob Change Biol. 2018;24:2810–2817.

Les investigations, qui ont été effectuées parallèlement en matière de contaminations chimiques par différents groupes de polluants persistants (cf. p. 21 à 27) montrent que ces substances chimiques – essentiellement transférées sous forme particulaire et présentes de manière non anecdotique dans les MES et les sédiments fins – contribuent

Les investigations, qui ont été effectuées en matière de contaminations chimiques pour différents groupes de polluants persistants (cf. p. 21 à 27) montrent que les transferts à partir du bassin versant ne se limitent pas aux nutriments : de nombreux contaminants – notamment pesticides et HAP – sont transférés sous forme particulaire et sont présentes de manière non anecdotique dans les MES et les sédiments fins, confirmant ainsi l'origine multifactorielle des dysfonctionnements de la Loue.

Spatialisation et évolution des pressions anthropiques

De façon à préciser les enseignements tirés des résultats précédents, un inventaire spatialisé des pressions anthropiques s'exerçant sur le bassin versant de la Loue, et leur évolution récente a été dressé. Les principales sources de pollutions ou de perturbations potentielles y compris non nutritives ont été passées en revue, en les analysant à la lumière des dysfonctionnements observés.

Pressions d'origine agricole

Ainsi l'évolution des pratiques agricoles a été considérée à partir des données spatialisées issues du RGA (recensement général agricole) et du RPG (registre parcellaire graphique). Cette approche montre trois évolutions importantes des pratiques agricoles sur le bassin versant.

- *La productivité de la vache montbéliarde a fortement augmenté, passant d'environ 4 000 kg/an en 1960 (Delage 1984) à 7 000 kg/an au début des années 2000 (RGA 2010) : si le nombre d'UGB n'a pratiquement pas évolué en 30 ans, cette intensification de la vache laitière s'est traduite par un fort accroissement des intrants (fertilisants, amendements, produits phytosanitaires, semences...) ainsi que des quantités d'effluents d'élevage épandus.*
- *Plus récemment, les besoins en céréales d'hiver et le souci de les produire localement ont provoqué une augmentation de la fréquence des labours et de la surface des terres fréquemment retournées (figure 22).*
- *Cette pratique culturale montre aussi dans l'ensemble du massif jurassien, une expansion géographique en s'étendant des premiers aux seconds plateaux.*

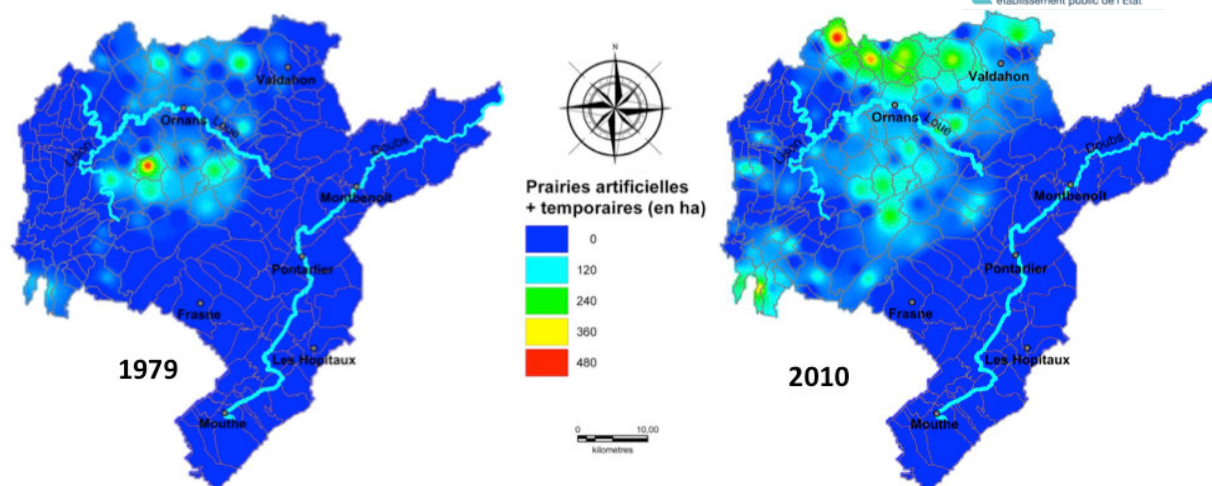


Figure 22. Evolution de la surface totale et de la répartition géographique des terres fréquemment retournées (prairies artificielles et temporaires, hors cultures) entre les années 1970 (à gauche) et les années 2000 (à droite) d'après les RGA 1979 et 2010

Compte tenu des biais liés au secret statistique occultant en partie les données issues du RGA, la surface totale des terrains fréquemment retournés serait passée d'environ 9 000 ha dans les années 1970 à plus de 18 000 ha dans les années 2010 et les suivantes. D'après le RGP, il semblerait qu'elle soit redescendue à environ 16 000 ha entre 2015 et 2016.

Toutefois, il faut rappeler que les prairies dites permanentes peuvent aussi être retournées si les labours sont pratiqués avec un délai supérieur à 5 ans. L'évolution de cette pratique de retournement à moyen terme n'a pas pu être quantifiée, de même que l'impact des désherbages chimiques parfois employés sur les plateaux.

Parallèlement, l'extension des terres labourées et l'intensification de la « culture d'herbe » semble s'être traduite par une augmentation des quantités d'herbicides et d'autres substances actives utilisés sur le bassin versant de la Loue et du Doubs apical (figure. 23).

La masse de substances actives vendues annuellement dans ce périmètre est ainsi passée de 15 tonnes en 2014 à un peu plus de 21 tonnes en 2016. Cependant, il semble que la variabilité interannuelle des quantités utilisées dépend surtout de l'hydroclimat et des risques d'attaque des cultures par des ravageurs. Pondéralement dominée par des herbicides, ces produits sont essentiellement utilisés par des professionnels.

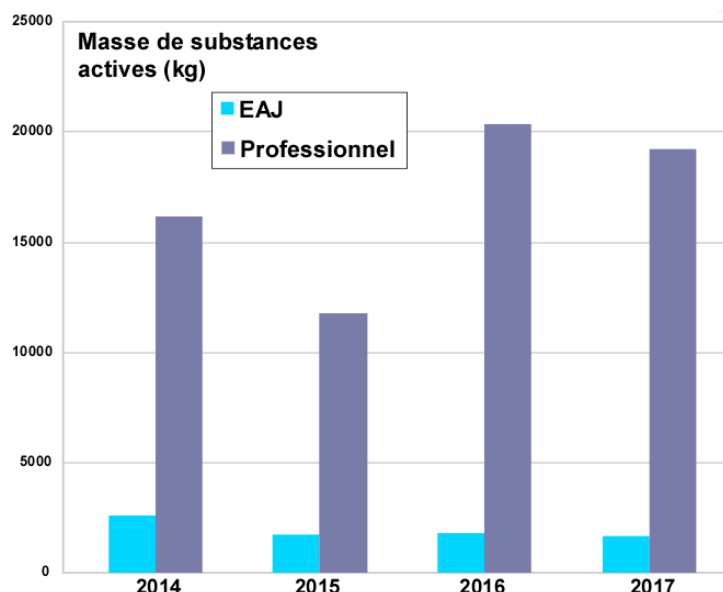


Figure 23 Quantités de substances actives achetées dans le bassin versant Haut-Doubs Haute-Loue (périmètre du SAGE) à des fins de protection des végétaux par des privés et des collectivités (EAJ) ou par des professionnels (données extraites de la BNV-d en 2019)

Les pesticides chimiquement très actifs comme les pyréthrinoïdes participent à cette augmentation. Même si les quantités utilisées ici restent modestes par rapport à celles qui sont épandues dans les plaines céréalières, elles sont suffisantes pour provoquer des déséquilibres biologiques pour peu qu'une partie même infime soit transférée dans les cours d'eau. Les données issues de la BNV-d (Banque Nationale des Ventes par les distributeurs des produits « phytopharmaceutiques »), déclarées par les acheteurs donc localisables depuis 2014, indiquent que l'utilisation de ces substances suit une expansion des premiers aux deuxièmes plateaux (figure 24).

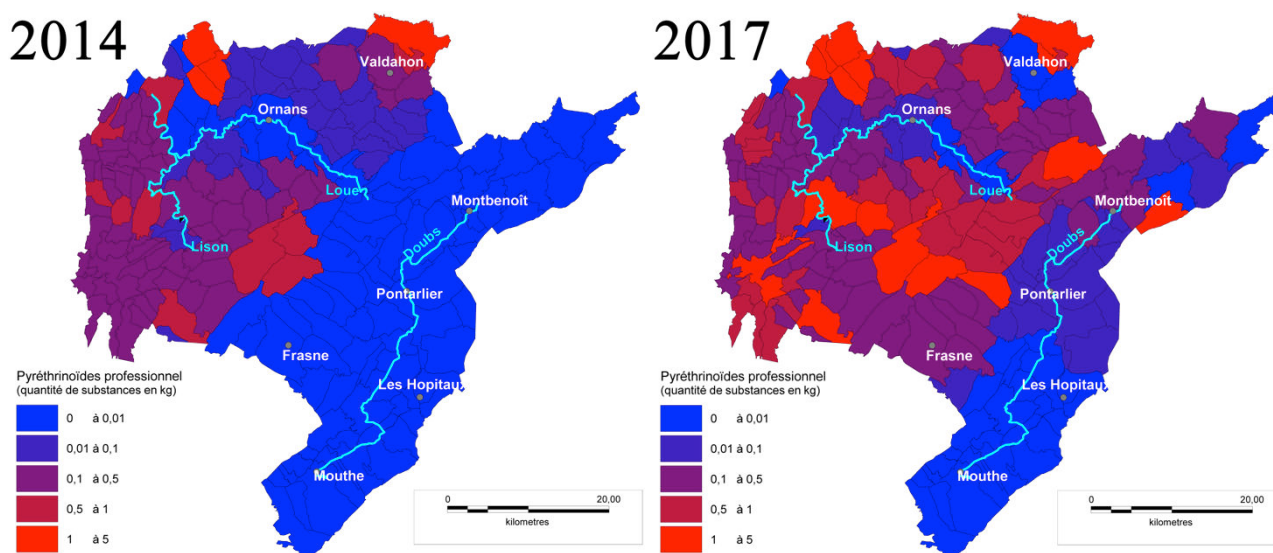


Figure 24. Evolution de la quantité de pyréthrinoïdes achetés et potentiellement utilisés dans les différents cantons composant le bassin versant Haut-Doubs Haute-Loue (périmètre du SAGE)

Des substances typiquement utilisées pour les cultures de plein champ, comme les néonicotinoïdes ou le glyphosate suivent également cette tendance. Toutefois, le plus vendu des pyréthrinoïdes, la cyperméthrine, est aussi largement utilisée par la filière bois pour protéger les grumes en attente de débardage de la piqûre des scolytes. L'il est également à noter que les années chaudes sont souvent favorables à cet insecte xylophage.

Les pyréthrinoïdes, qui sont régulièrement retrouvés dans les sédiments des cours d'eau calcaires du massif ont de nombreux usages autres qu'agricoles : utilisations domestiques (insecticides, inverticides, protection des bois d'oeuvre...), scierie, médicaments vétérinaires, désinsectisation des bâtiments d'élevage...

En ce qui concerne les produits vétérinaires, il n'existe pas de base de données inventoriant les quantités vendues et utilisées par région ni secteur. Cependant, des enquêtes limitées menées par nos soins et par l'Ecole Vétérinaire de Lyon nous ont permis d'estimer que la quantité de pyréthrinoïdes utilisée comme antiparasitaire interne et externe des bovins du bassin versant dépassait celle employée pour la protection des végétaux (cultures de plein champ et bois coupés).

En revanche, la nature, les modalités et surtout les quantités de substances utilisées pour désinsectiser les locaux et le matériel d'élevage demeurent mal connues. Il semble qu'une utilisation massive de cyperméthrine a été effectuée pour traiter les bêtes et les moyens de transports lors de l'épizootie de fièvre catarrhale ovine qui a frappé l'Est de la France, dont la Franche-Comté, entre 2006 et 2008.

Pressions d'origines autres qu'agricoles

En ce qui concerne les scieries, les bains de trempages utilisés et les bois traités à l'égouttage ainsi qu'au stockage doivent réglementairement être totalement isolés du milieu naturel. De réel progrès ont été réalisés à partir des années 2005 et 2006 après une prise de conscience de la profession. Toutefois, nous avons démontré que l'écotoxicité réelle de produits de traitement du bois (Adam *et al.* 2009¹⁶, Adam *et al.* 2010¹⁷) est très supérieure à celles rapportées dans la littérature et que de très petites quantités suffisent à provoquer un appauvrissement drastique de la faune aquatique. Il ne nous a pas été possible d'accéder aux résultats récents des suivis « lysimétriques » instaurés à proximité des scieries dans les années 2000.

Les ICPE sont au nombre d'une centaine sur le bassin versant (figure 25). D'une manière générale, il n'a pas été possible jusqu'ici d'obtenir les données relatives aux rejets de ces installations, alors que les résultats relatifs à la contamination chimique des cours d'eau montrent qu'il serait important de pouvoir évaluer leur impact cumulé à l'échelle du bassin versant.

Parallèlement, les risques inhérents aux installations de traitement et de stockage des déchets sont loin d'être totalement connus (figure 26).

¹⁶ (2009) O. Adam, P.M. Badot, F. Degiorgi, G. Crini. Mixture toxicity assessment of wood preservative pesticides in the freshwater amphipod *Gammarus pulex* (L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 72, 441-449.

¹⁷ (2010) O. Adam, F. Degiorgi, G. Crini, P.M. Badot. High sensitivity of *Gammarus* sp. juveniles to deltamethrin: outcomes for risk assessment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 13, 1402-1407.

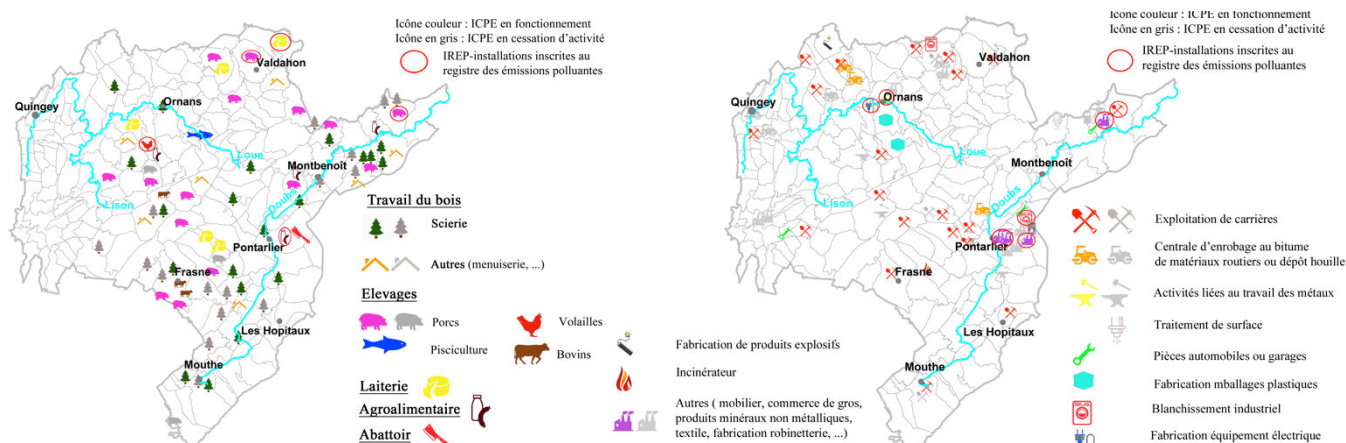


Figure 25. Inventaire spatialisé des ICPE agroalimentaires et industrielles installées dans le bassin versant du Haut-Doubs et de la Haute-Loue, périmètre du SAGE (source : installationsclassées.developpement-durable.gouv.fr)

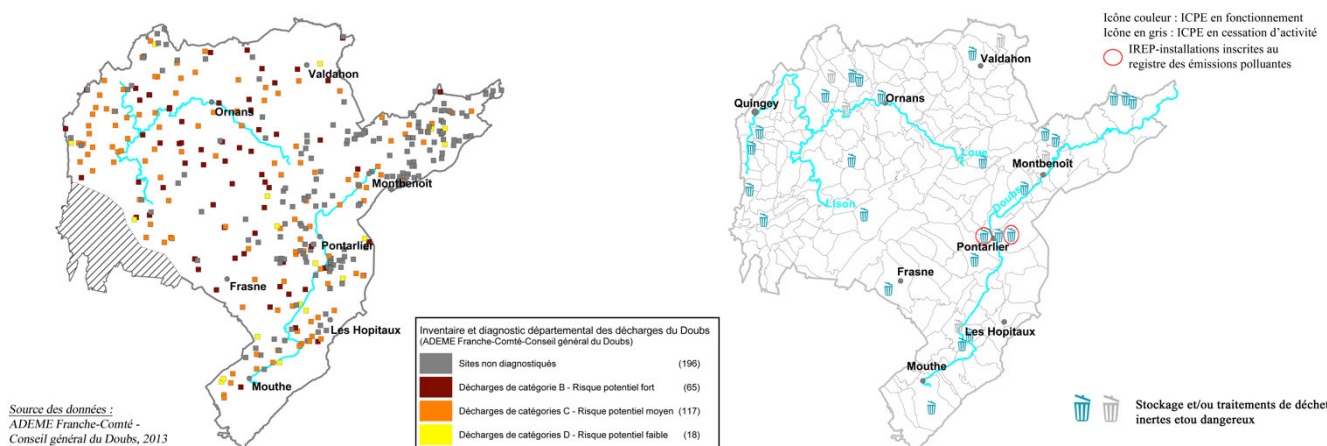


Figure 26. Inventaire spatialisé des décharges et des sites de traitement des déchets inventoriés dans le bassin versant du Haut-Doubs et de la Haute-Loue, périmètre du SAGE.

En ce qui concerne la pollution dite grise, les principaux résultats obtenus montrent que les teneurs en HAP lourds sont anormalement élevées dans les sédiments et les MES des cours d'eau calcaires du massif jurassien et correspondent pour partie à des pressions anthropiques locales sur les milieux aquatiques :

- Des goudrons de houille (très riches en HAP) ont été utilisés avant 2005 pour réaliser des enrobés routiers, en particulier dans les sous couches de roulement ; ces matériaux continuent à être utilisés pour certaines réparations partielles des tapis routiers.
- Ces enrobés une fois dégradés doivent désormais, quand ils sont démantelés, être exportés en centre d'enfouissement technique de deuxième catégorie. Cependant, il n'existe pas d'inventaire ni de données enregistrées quant à leur destination finale ou leur réutilisation.
- Les teneurs en HAP des enrobés bitumineux utilisés actuellement et leur évolution avec le vieillissement des tapis routiers ne sont pas connus.

- L'évolution du trafic routier montre une très forte augmentation de sa densité sur les axes qui traversent le bassin versant. Cependant, ces flux restent encore très inférieurs à celui des tissus urbains.

Une partie des HAP présents dans les milieux aquatiques a vraisemblablement une origine exogène.

Ces considérations ne sont pas exhaustives et d'autres activités anthropiques peuvent exercer localement des effets adverses sur les milieux aquatiques : activités sportives et de loisir, jardinage amateur, activités de services, activités commerciales, activités artisanales, , tourisme...

Processus d'altération affectant la Loue et les rivières karstiques du massif jurassien

L'altération des potentiels biologiques et de la fonctionnalité écologique de la Loue remarquée depuis plusieurs années par les observateurs de terrain (pêcheurs, riverains, scientifiques...) a pu être vérifiée et objectivée quantitativement par les travaux réalisés dans le cadre du programme de recherches réalisé depuis juillet 2012.

Après plusieurs années d'investigations et en concaténant les nombreuses informations recueillies au cours du présent programme de recherches, il ressort les points saillants listés ci-après.

- *Les potentiels piscicoles et en particulier salmonicoles sont réduits, selon les secteurs, de 50 à 80% par rapport aux meilleures rivières à truite et à ombre du bassin rhodanien comme par rapport aux références historiques locales. Les années hydrologiques peu lessivées semblent favoriser l'efficacité de la fraie et le recrutement des juvéniles « 0+ » pour l'ombre et la truite mais un étranglement manifeste apparaît lors de la deuxième année pour ces 2 espèces, quelles que soient les années. Cette faible survie avant la maturation sexuelle s'étend aussi aux nombreuses truitelles nées dans les affluents, qu'elles dévalent ou non dans la Loue.*
- *La biodiversité des éphémères, plécoptères, et trichoptères (EPT) est diminuée de 25 % par rapport aux années 1960, durant lesquelles une partie de la Loue était affectée par des pollutions surtout organiques, et de 50 % par rapport à une situation référentielle.*
- *L'abondance des macroinvertébrés aquatiques réputés sensibles (EPT) mais aussi des consommateurs phytophages souffre également de déficit allant de 50 à 80 % selon les secteurs et les années.*
- *D'importants colmatages algaux combinés à la densification des herbiers d'hydrophytes de la partie aval apparaissent tous les ans. Ils sont plus intenses lors d'étiages succédant à de forts lessivages (crues turbides).*

Les analyses et mesures chimiques, physico-chimiques et physiques effectuées pour élucider les processus impliqués dans ces dysfonctionnements indiquent que les dérèglements fonctionnels observés dans la Loue et dans ses affluents sont essentiellement liés à deux facteurs agissant conjointement.

- *La surcharge modérée mais continue en azote total, probablement accrue et accompagnée de "bouffées" de phosphore en excès, majoritairement particulaire, favorisent la croissance de masses végétales surdensitaires.*
- *Des contaminations discontinues, diffuses et hétérogènes par diverses substances chimiques, dont plusieurs insecticides, brident la consommation des végétaux aquatiques en réduisant la densité et l'activité des macroinvertébrés macrophytophages. Selon les périodes et les sites, ces pollutions déclenchent ou amplifient la fréquence et l'intensité des colmatages végétaux.*

Ces perturbations conjointes pourraient affecter directement la fraie et le bon développement des différentes espèces de poissons, et en particulier des salmonidés.

Parallèlement, les concentrations en pesticides retrouvées dans les sédiments et les matières en suspension atteignent des niveaux susceptibles de provoquer des effets nocifs sur une grande partie des macroinvertébrés. Des bioaccumulations non négligeables de pesticides "anciens" (DDT, lindane, etc.) ont aussi été décelées dans la chair et le foie des salmonidés.

Notre conjecture est que la conjonction des deux types de contamination (excès de nutriments et de polluants persistants) favorise la croissance, pendant les phases d'étiage prolongé, d'algues nitrophiles, ainsi que la densification des herbiers de renoncules sur la partie aval. Il est probable que l'augmentation du taux de bicarbonates dissous mesurés dans la Loue depuis une trentaine d'années amplifie ce phénomène d'accumulation de biomasse végétale conduisant aux colmatages. Ce processus contribue à son tour à l'altération des conditions de vie et de reproduction des poissons et des macroinvertébrés aquatiques.

Les contaminants non nutritifs décelés dans la Loue et ses affluents ainsi que dans le Doubs apical, et une partie du phosphore, n'étant que très faiblement solubles, le rôle des matières en suspension et des sédiments fins dans les transferts et l'exposition des organismes est prédominant. En effet, une grande partie de ces fines est issue du karst, dont elles surgissent durant les crues. Dans la rivière, elles entrent en contact avec la faune aquatique en hautes eaux, puis se répartissent et colmatent les interstices biogènes. La résilience de la Loue est soutenue par des arrivées karstiques fraîches, par sa pente et par ses fonds de galets et graviers naturellement biogènes. En revanche, elle est grevée par une ancienne incision provoquée par le transport du bois, ainsi que par l'amointrissement, la déconnexion et la banalisation de sa ripisylve et l'enlèvement systématique des débris ligneux immergés.

Le tableau 6 synthétise les dysfonctionnements et altérations observés, les processus à l'oeuvre et les facteurs de résilience ou de récupération mis en évidence à ce jour par nos travaux.

Compartiment écosystémique	Altérations et dysfonctionnements	Causes ou moteurs d'altération	Facteur de résilience ou de récupération
Poissons	Réduction des potentiels salmonicoles: 50 % à l'amont et 80 % à l'aval	Baisse de la ressource alimentaire (benthos proies) Mortalités (anciennes ?) Déficit de recrutement : colmatage des frayères mais aussi faible survie à la maturité Contaminations (anciennes) de la chair et du foie	Bon recrutement de truite et ombre "0+" lors des années faiblement lessivée, y compris dans le chenal principal
Benthos	Perte de 25 % de la richesse spécifique Régression des taxons typiques ou/et "sensibles" Régression des macrophytophages Baisse de l'abondance des EPT (50 à 80 %)	Surcharge azotée modérée permanente et généralisée Contaminations répétées par des HAP et pesticides Colmatages algaux et minéraux des habitats aquatiques	Remontée rapide de la biodiversité lors d'années à faible lessivage
Végétation	Prédominance des espèces nitrophiles ou/et euryèces Accumulation des biomasses d'algues filamenteuses Episodes de prolifération de cyanobactéries nitrophiles Densification des herbiers (partie aval)	Engraissement par surcharge azotée modérée mais quasi-permanente et généralisée Déficit de macrophytophages (et de tous les brouteurs)	Biomasses contrôlées en l'absence de lessivages (retour des brouteurs ou/et baisse des taux de nutriments) Episodes de prédominance d'algues peu tolérantes aux excès de matière organique et de phosphore
Chimie de l'eau et des sédiments Nutriments	Augmentation de la conductivité (bicarbonates) Surcharge azotée modérée quasi permanente et généralisée spatialement Surcharge modérée et intermittente en phosphore particulière lors des crues Surcharge azotée nette et permanente des sédiments et MES	Charge azotée excessive sur certains sols Déstabilisation et dissolution des sols calcaires Déstockage probable de substances jusque là séquestrées dans les sols maintenant déstabilisés Accélération des transferts depuis le bassin versant	Précipitation de tuf et d'apatite (réduction des concentrations en phosphore bio-disponible) Autoépuration parfois active (transferts des algues aux poissons) : baisse locale et temporaire des taux de nitrates. Bonne oxygénation, en particulier sur la partie amont Faible teneur en carbone organique et phosphore des sédiments fins mobilisables
Contaminations chimiques. Effets sur le biote	Contaminations discontinues à forte variabilité spatio-temporelles par des ETM, des HAP, des pesticides et des résidus médicamenteux. Niveaux de contamination dépassant occasionnellement les NQE et les repères écotoxicologiques d'effets adverses sur les communautés biologiques	Origine locale : usages domestiques, industrie et services, transport, agriculture et foresterie... Origine externe : à l'échelle du massif, concentration par les phénomènes atmosphériques de polluants allochtones et transferts vers les milieux aquatiques (massif jurassien "puits" à polluants) Mobilisation de la matière organique des sols et désorption de contaminants anciens fixés suite à l'intensification des pratiques agricoles ? Usages illicites de stocks de produits interdits ? Désinsectisation des bâtiments d'élevage, traitements vétérinaires préventifs ? Traitements curatifs lors d'épizootie Techniques d'épuration non adaptées vis à vis de certains résidus médicamenteux (problématique globale)	Fonctionnement général du cycle de l'eau : transferts vers l'aval... Réduction des intrants Prise de conscience sociétale Prise de conscience de la profession agricole Politiques publiques : ex. plan "Zéro phyto" ; recherche et réduction des rejets de substances dangereuses, renforcement des réglementations Mesures agrienvironnementales.
Température de l'eau	Réchauffement net à l'aval de la confluence avec le Lison durant les années chaudes	Drainage des sols agricoles et des zones humides du bassin versant : réduction des réserves en eau utile de sols et donc des nappes d'accompagnement du cheveu hydrographique Incision de la Loue et de tous ses affluents Rectification curage de la totalité des petits affluents Réduction ou déconnexion de la ripisylve	Partie amont de la confluence avec le Lison toujours fraîche (gamme thermique salmonicole) Existence de froidières dans la partie aval : "abri" thermique
Habitats aquatiques Qualité physique	Tendances à l'uniformisation et incision. Déficit en bois mort immergés, en ripisylve connective, en sous berges... Colmatage algal ou/et par des fines ou du tuf Densification et fermeture des herbiers Bétonnage des tufs Déconnexion ou et banalisation des confluences	Ancienne chenalisation pratiquée pour le flottage du bois Enlèvement systématique des bois morts Réduction ou éradication de la ripisylve Plantations résineux et peupliers en bordure de cours d'eau	Formation de tuf expansé (nassis) Par endroit mosaïque d'herbiers équilibrés Persistence d'un transport solide de gravier galet et sables

Tableau 6. Principaux processus à l'oeuvre dans les altérations et dysfonctionnements de la Loue et des rivières karstiques. Facteurs de résilience.

Les dysfonctionnements écologiques mis en évidence sont induits principalement par les causes suivantes.

1. *Les excès d'azote dans les milieux aquatiques et l'accroissement des teneurs en bicarbonates sont essentiellement la conséquence de l'intensification des pratiques agricoles et plus particulièrement de :*
 - *l'augmentation des surfaces mises en culture et la diminution simultanée des prairies réellement permanentes qui accroissent les labours et les retournements des sols et qui corrélativement induisent la minéralisation rapide de la matière organique, provoquant une modification des équilibres calco-carboniques ;*
 - *l'amélioration de la productivité laitière qui exige un accroissement des intrants ,ce qui en retour augmente les quantités d'effluents d'élevage qui doivent être épandus ;*
 - *l'augmentation en volume des effluents qui doivent de ce fait être épandus en dehors de la saison de végétation (lorsque les capacités de stockage sont devenues inadaptées, ce qui est fréquent) ;*
 - *l'insuffisante prise en considération de la vulnérabilité des sols et notamment de la faible aptitude à l'épandage des sols superficiels.*
2. *Les contaminations multiples par des pesticides, des biocides et les substances actives issues des médicaments vétérinaires sont elles aussi en partie liées à l'intensification de l'agriculture au travers de :*
 - *la nécessité d'utiliser plus de produits phytosanitaires pour favoriser et protéger les cultures ;*
 - *la nécessité de traiter plus fréquemment les bâtiments d'élevage (désinfection, désinsectisation) et de procurer aux animaux de rente des traitements préventifs ou curatifs destinés à éviter la propagation de pathologies transmises par des insectes vecteurs.*
3. *Une part sans doute non négligeable de ces contaminations trouve aussi son origine au sein de la filière bois (traitement des grumes en forêt et en scierie), mais aussi dans les utilisations domestiques (insecticides en poudre, en aérosol, biocides en tout genre, produits de traitement des bois d'oeuvre...).*
4. *La collecte et le traitement des eaux usées ne sont pas impliqués au premier chef dans les contaminations azotées mais présentent des marges de progression pour réduire leurs contributions aux apports de substances toxiques et de bouffées de phosphore dans les cours d'eau en travaillant à*
 - *une meilleure gestion des flux transitant par les déversoirs d'orage,*
 - *une meilleure collecte des eaux pluviales et domestiques,*
 - *un meilleur fonctionnement des STEP de petite taille,*
 - *une meilleure épuration vis à vis de certains polluants persistants (résidus médicamenteux, certains ETM...),*
 - *une meilleure identification des contributeurs potentiels (cf. composition en ETM des rejets à Ornans et Pontarlier).*

5. *La pollution grise se manifeste dans le bassin versant ; elle se traduit par des concentrations anormalement élevées et néfastes de HAP lourds non solubles parmi les différentes matrices étudiées et notamment dans les fines (sédiments et MES).*

Ceci est vraisemblablement lié à la fois à la dégradation d'enrobés anciens riches en goudron de houille (coal tar), au trafic automobile local et à des retombées atmosphériques favorisées par le contexte géomorphologique et climatique local (le massif jurassien tend à fonctionner comme un puits à poussières et particules atmosphériques).

Le rôle des anciennes décharges et des sites industriels anciens ou actuels qui parsèment le bassin versant dans cette dynamique de contamination, ne peut être écarté, mais les données sont parcellaires ou très peu accessibles.

6. *La nature karstique du substratum et le positionnement en tête de bassin accroît la vulnérabilité des cours d'eau, vis à vis des contaminants chimiques qui peuvent être transférés (des sols vers les eaux) et transportés (au sein des masses d'eau) très rapidement.*
7. *Les modifications physiques des cours d'eau et les altérations de la ripisylve – réduite et artificialisée – dégradent les habitats des communautés benthiques et piscicoles et constituent des facteurs aggravants.*

Les informations issues de ce programme de recherches et les constats effectués en matière de diagnostic et de causalité peuvent être transposés aux autres cours d'eau karstiques du massif jurassien, puisqu'ils subissent des évolutions similaires en étant exposés à des pressions analogues.

Plus généralement, ces résultats dépassent le simple cadre régional et pourront vraisemblablement nourrir les réflexions et recherches en cours dans d'autres régions d'Europe et du monde où des rivières karstiques de mêmes caractéristiques chimiques et thermiques présentent des altérations similaires à celles observées dans la Loue : colmatages végétaux, appauvrissements des étages consommateurs de l'édifice biologique et mortalités intempestives de salmonidés.