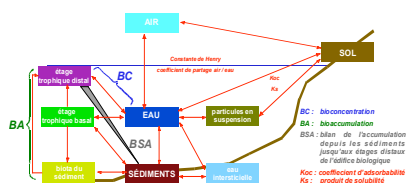
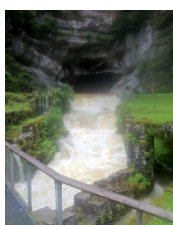


Étude de l'état de santé des rivières karstiques en relation avec les pressions anthropiques sur leurs bassins versants



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

Rapport de synthèse grand public

Pierre-Marie Badot, François Degiorgi (rédacteurs et coordinateurs)

Participants : Eric Lucot, Audrey Bolard, Etienne Chanez, Axelle Chiffre, Alexia Ducrot, Marc Steinmann, Nadia Crini, Caroline Amiot, Christophe Loup, Etienne Godard, Jean Claude Lambert, Jacques Mudry

Soutiens logistiques : Fédération de Pêche du Doubs, BE Sialis, Bi-Eau et Teleos

Laboratoires d'analyse : Chrono-environnement (CNRS-UFC) Qualio (Université de Franche-Comté), ABL Analytics (Porrentruy, CH), ISA (CNRS-Université de Lyon), Chimie Environnementale de l'EPFL (Lausanne, CH)

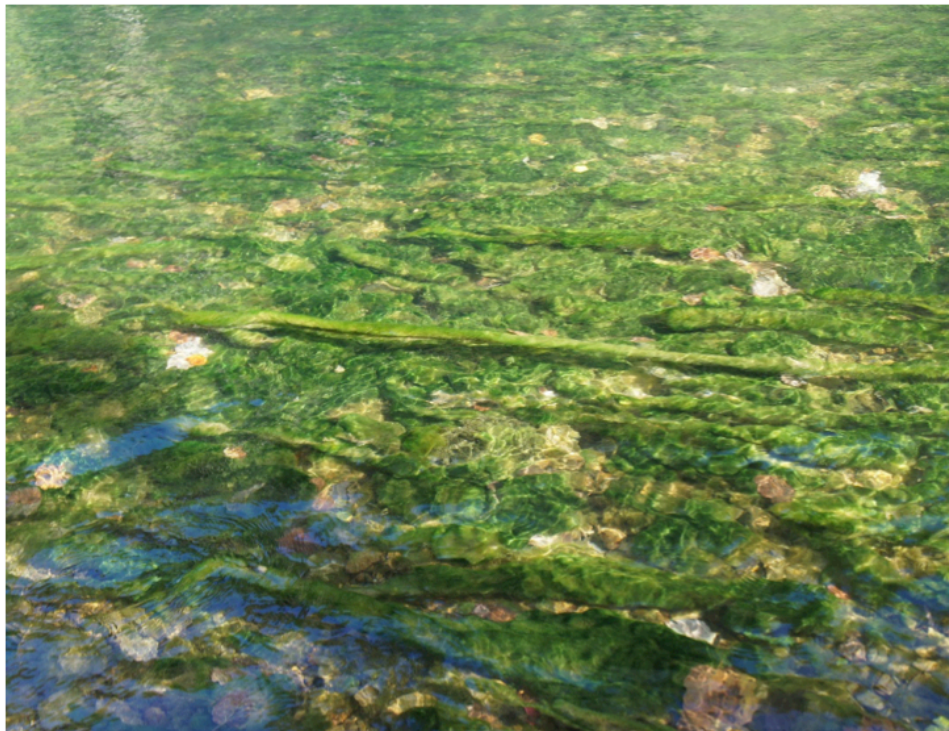
20 Février 2020

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 ;
- ...



Colmatage des fonds de la Loue par des algues filamenteuse (aval de Cléron, septembre 2014)

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 de ce fait un observatoire représentatif pour **rechercher les origines de l'appauvrissement général des ressources écologiques des rivières karstiques et pour proposer des actions opérationnelles de restauration de ces écosystèmes.**



Ombre mycosé dans le Doubs franco-suisse (2011, photo P. Malavaux)



Truite mycosée dans le Dessoubre (2014, photo Stéphane Regazzoni)

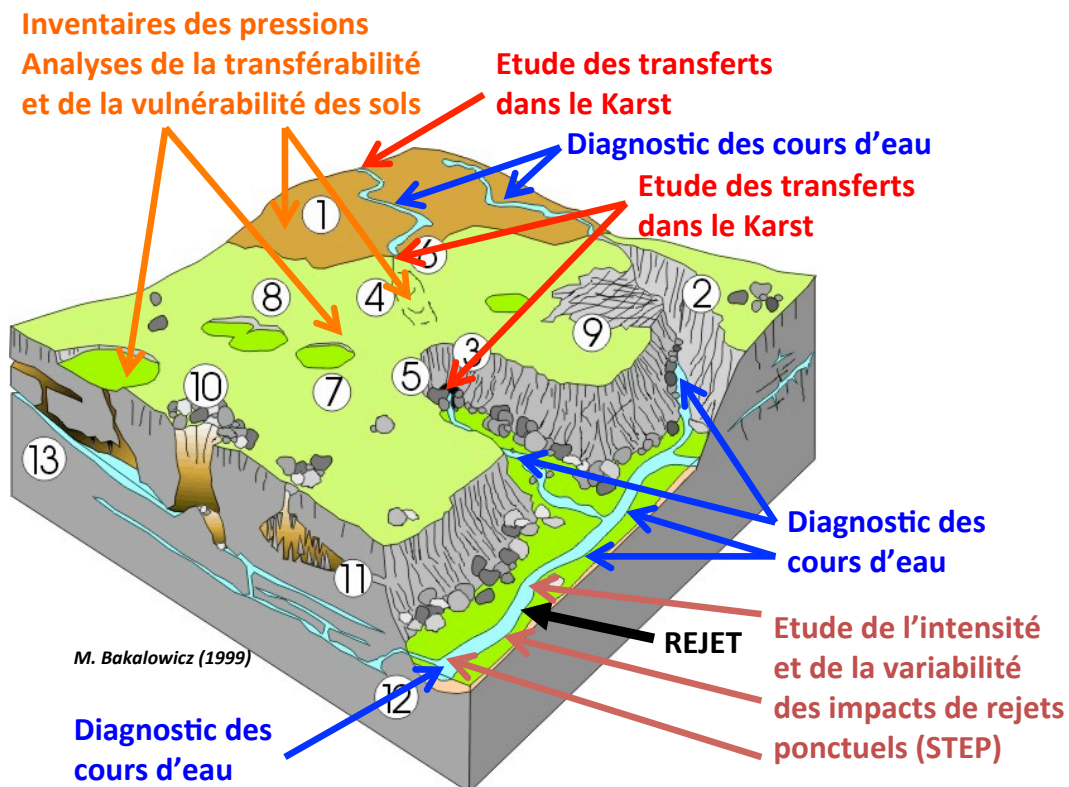


Truite de la haute Loue marquée d'un point de mycose sur fond d'algues filamenteuses (2016, photo SOS LRC)

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 déclinés ci-dessous.

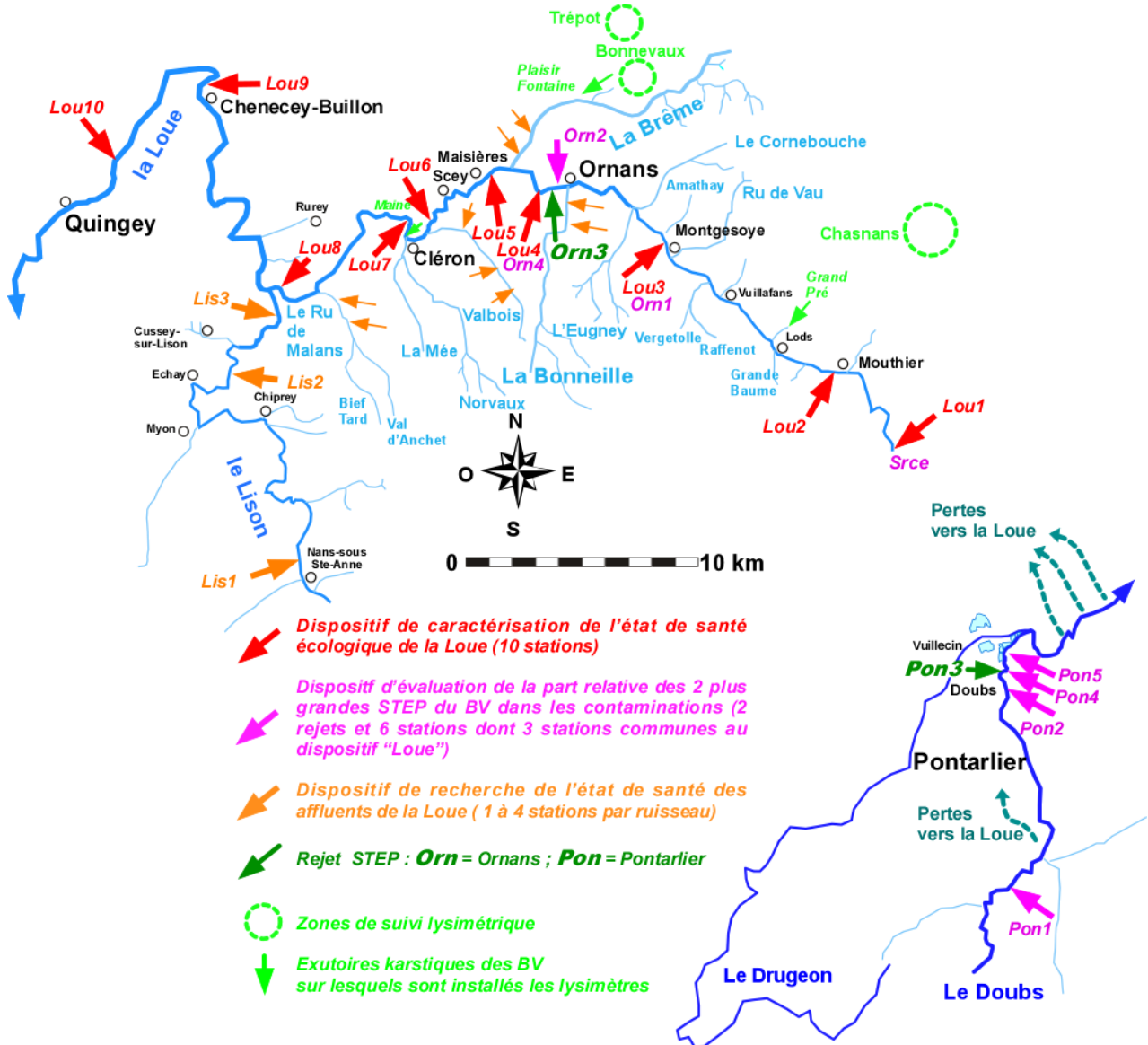
1. **Caractériser de manière approfondie l'état de santé actuel de la Loue et ses évolutions** avec des méthodes plus précises que celles qui sont couramment employées lors des suivis réglementaires de la qualité des eaux, dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau.
2. **Appréhender les mécanismes 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, d'une part, l'évolution des activités socio-économiques du bassin versant de la Loue et, d'autre part, la qualité des eaux ainsi que les capacités d'autoépuration de la rivière.**



Objectifs généraux du programme de recherches (bloc-diagramme d'après Bakalowicz 1999)

Récapitulatif des investigations réalisées

Pour atteindre ces objectifs, plusieurs types d'investigations ont été menées 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.



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 caractérisés 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.

Le présent document résume brièvement les 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. Il propose également un certain nombre de pistes d'actions opérationnelles destinées à restaurer la qualité des rivières karstiques.

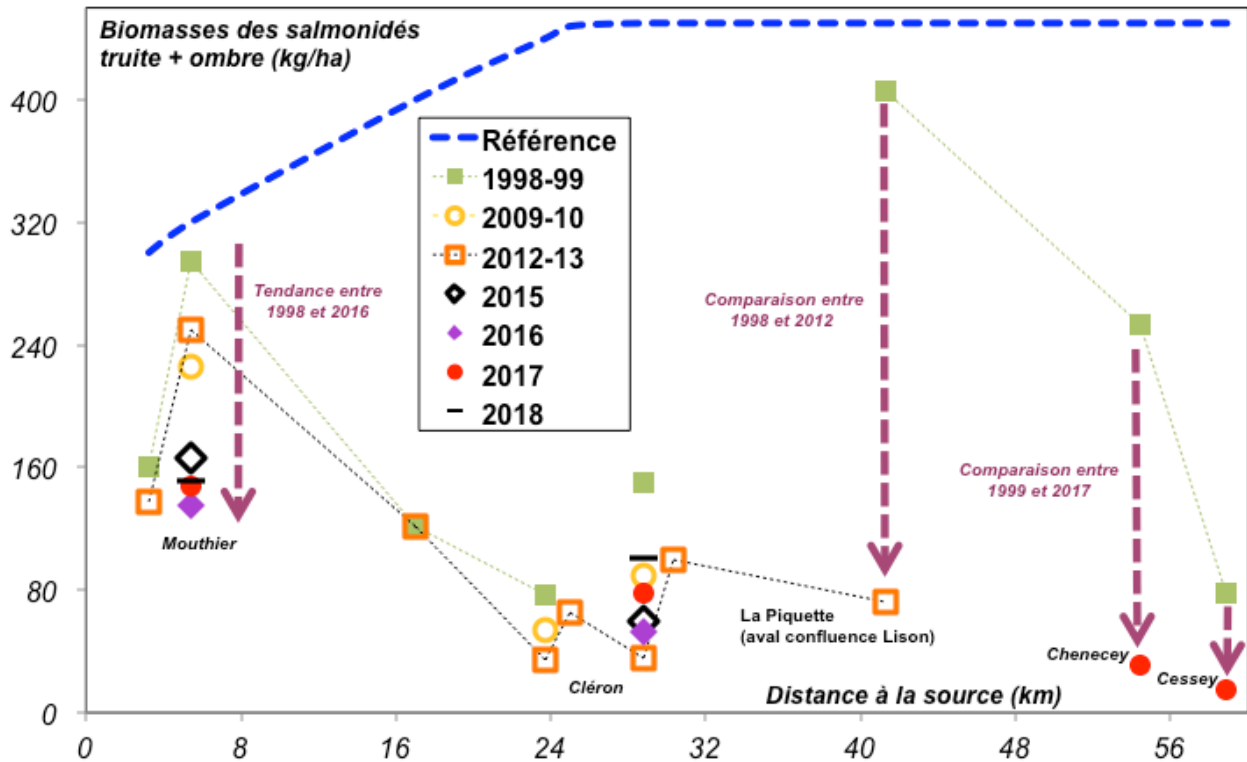
Le lecteur intéressé pourra utilement se reporter aux rapports complets (contacts : pierre-marie@univ-fcomte.fr ; francois.degiorgi@univ-fcomte.fr).

PROCESSUS D'ALTERATION AFFECTANT LES RIVIERES KARSTIQUES DU MASSIF JURASSIEN

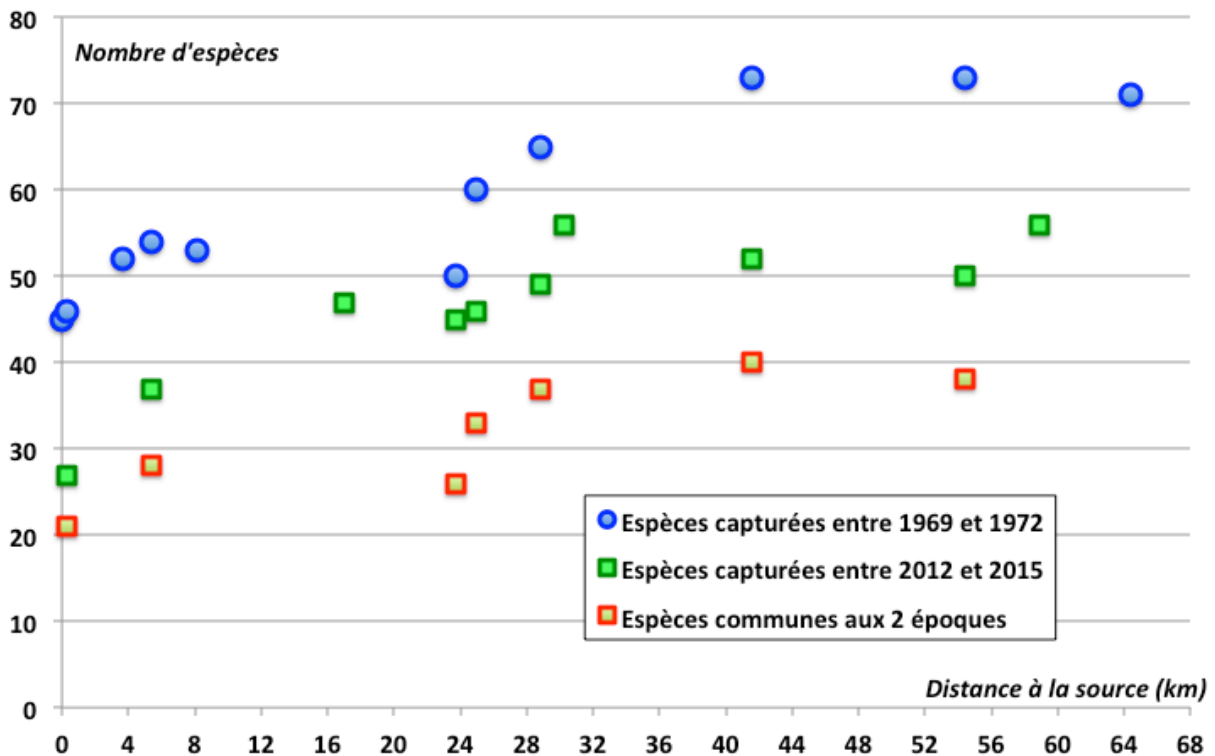
L'altération des potentiels biologiques et de la fonctionnalité écologique de la Loue remarquée depuis plusieurs années par les observateurs de terrain (pêcheurs, riverains, scientifiques...) a été vérifiée et objectivée quantitativement par les travaux réalisés depuis juillet 2012 dans le cadre du présent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

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.

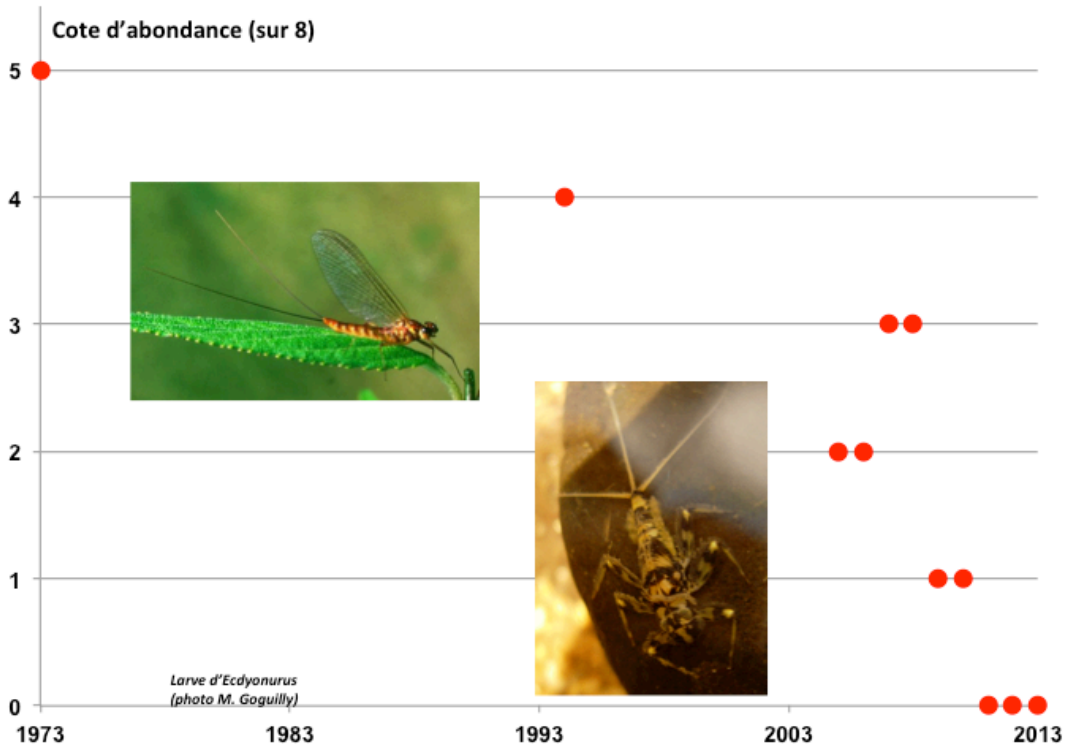
- **Les potentiels piscicoles et en particulier salmonicoles sont réduits de 50 à 80 % selon les secteurs.** Les années sans crues lessivantes semblent favoriser l'efficacité de la reproduction de l'ombre et de la truite mais, même dans ces conditions, la survie est faible dès la deuxième année pour ces 2 espèces. Cette forte mortalité avant la maturation sexuelle s'étend aussi aux nombreuses truitelles nées dans les affluents, qu'elles dévalent ou non dans la Loue.
- **La biodiversité de plusieurs groupes d'insectes indicateurs (éphémères, plécoptères, et trichoptères, EPT) est diminuée en moyenne de 25 % par rapport aux années 1960, durant lesquelles une partie de la Loue était pourtant déjà affectée par des pollutions surtout organiques, et de 50 % par rapport à la situation référentielle, c'est-à-dire en considérant les diversités les plus élevées obtenues à la fin des années 1960.**
- **L'abondance de ces insectes réputés sensibles (EPT) mais aussi d'autres organismes aquatiques consommateurs de végétaux souffre également de déficit allant de 50 à 80 % selon les secteurs et les années.**
- **D'importants développements algaux, combinés, à l'aval d'Ornans, avec une forte densification des herbiers de renoncules, colmatent tous les ans les fonds de la Loue. Ils sont plus intenses lors d'étiages succédant à de forts lessivages (crues turbides).**



Evolution spatio-temporelle le long de la haute et moyenne-Loue, des biomasses de truites et d'ombres cumulées mesurées par pêches électriques à plusieurs passages



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



Variation temporelle de l'abondance des grandes éphémères pétricoles des genres *Heptagenia* et *Ecdyonurus* dans la Loue à Mouthier-Haute-Pierre entre 1973 (d'après Verneaux) et 2013 (présente étude) ; les larves (aquatiques, sous les pierres) et les adultes (aériens, émergeant de la rivière puis retournant y pondre) font partie des proies favorites des truites et des ombres. Les larves sont des brouteurs d'algues filamenteuses : en forte abondance, elles consomment les algues au fur et à mesure de leur croissance.



Colmatage total des fonds de la Loue à l'aval de la confluence du Lison par des algues filamenteuses nitrophiles (juillet 2015, photo Johan Benoist)

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

- **L'excès modéré mais continu d'azote total, accompagné parfois d'une surabondance de phosphore, favorisent la croissance de masses végétales excédentaires. L'augmentation de la quantité des carbonates transférés depuis les sols vers la rivière, via le karst, amplifie encore cette tendance puisqu'ils sont utilisés comme source de carbone par les végétaux aquatiques. L'ensemble de ces apports de nutriments (azote, phosphore, carbonates) issus du bassin versant se comporte à la manière des fertilisants utilisés en agriculture et dope la croissance algale.**
- **Des contaminations discontinues, diffuses et hétérogènes par diverses substances chimiques actives, notamment des molécules insecticides et inverticides, limitent la consommation des végétaux aquatiques en réduisant la densité et l'activité des macroinvertébrés (insectes, crustacés, etc.) qui s'en nourrissent. Selon les périodes et les sites, ces apports déclenchent ou amplifient la fréquence et l'intensité des colmatages végétaux. De telles perturbations affectent directement la fraie et le bon développement des différentes espèces de poissons, et en particulier des salmonidés.**

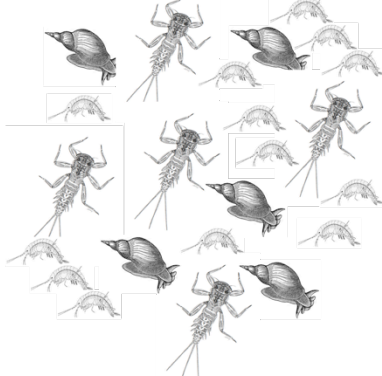
Nos résultats montrent en effet que les concentrations en pesticides retrouvées dans les sédiments et les matières en suspension atteignent des niveaux susceptibles de provoquer des effets nocifs sur une grande partie de la faune aquatique. Des accumulations non négligeables de pesticides "anciens" (DDT, lindane, etc.) ont aussi été décelées dans la chair et le foie des salmonidés. La conjonction des excès de nutriments et de la présence de polluants organiques persistants (insecticides, fongicides, résidus de médicaments humains et vétérinaires, etc.) favorise la croissance, pendant les phases d'étiage prolongé, d'algues nitrophiles — c'est-à-dire d'algues dont la croissance est favorisée par l'azote —, 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.

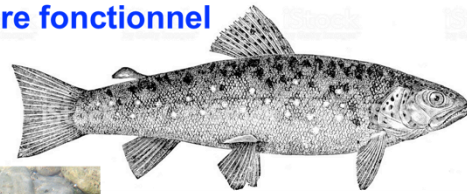
Les contaminants chimiques décelés dans la Loue et ses affluents ainsi que dans le Doubs supérieur, et une partie du phosphore, n'étant que très faiblement solubles, le rôle des matières en suspension et des sédiments fins dans les transferts et l'exposition des organismes est prédominant. En effet, une grande partie des particules fines est transférée des sols au karst, duquel elles sont évacuées durant les crues. Dans la rivière, elles entrent en contact avec la faune aquatique en hautes eaux, puis se répartissent et colmatent les espaces interstitiels qui sont nécessaires au développement et à la vie de la faune aquatique.

Cours d'eau karstiques à truite et ombre fonctionnel

Production végétale modérée ET contrôlée par de fortes densités de macroinvertébrés phytophages : fonds clairs !



Forte densité de proies pour les poissons



Forte production et fortes abondances de salmonidés

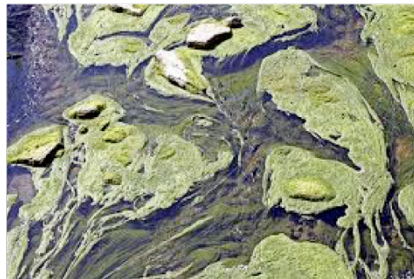


Cours d'eau à truite et ombre poly-contaminé : excès de nutriments + augmentation des bicarbonates OU/ ET pesticides, métaux, hydrocarbures ...

Déficit de consommateurs



Production végétale dopée ou non consommée



Mortalités et déficits de salmonidés



Fonds colmatés et pollutions différées

Schéma explicatif des mécanismes d'altération des rivières karstiques polycontaminées

La résilience de la Loue et de ses affluents — c'est-à-dire sa capacité à résister aux agents stressants — est soutenue par des arrivées d'eaux karstiques fraîches, par leur pente et leurs fonds de galets et graviers naturellement biogènes.

En revanche, dans le cas de la Loue et du Lison, elle est grevée par l'enfoncement provoqué lors des siècles précédents pour favoriser le transport du bois par flottage. En effet, cette pratique requiert le curage des lits et le corsetage des berges pour éviter la perte ou l'altération des bois.

Cette incision s'auto-entretient par le maintien de débit important dans le chenal avant débordement. Elle provoque à son tour la déconnexion de la végétation arbustive et arborescente en relation avec la rivière, appelée ripisylve, qui est également affaiblie par son implantation trop éparse et banalisée par des plantations monospécifiques. L'enlèvement systématique des débris ligneux immergés contribue également à la réduction des capacités biogènes des cours d'eau.

Le tableau ci-dessous synthétise les dysfonctionnements et altérations observés, les processus à l'œuvre 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 des sols et donc des nappes d'accompagnement du chevelu 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 et 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

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

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

- 1. Les excès d'azote dans les milieux aquatiques et l'accroissement des teneurs en bicarbonates sont 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 intensifient les labours et les retournements des sols et qui induisent la minéralisation rapide de la matière organique, provoquant une modification des équilibres chimiques entre le calcium et les carbonates ;
 - l'amélioration de la productivité laitière qui implique souvent un accroissement des apports extérieurs, 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 n'est pas rare) ;
 - 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 produits phytosanitaires, 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 par le biais des traitements 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'œuvre...).**
- 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 stations d'épuration de petite taille,
 - une meilleure épuration vis à vis de certains polluants persistants (résidus médicamenteux, certains éléments traces métalliques...),
 - une meilleure identification des contributeurs potentiels (cf. composition en éléments traces métalliques des rejets à Ornans et Pontarlier).



- 5. Une contamination par des concentrations parfois très élevées d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) lourds non solubles existe à l'échelle du bassin versant dans les différents types de prélèvements analysés et notamment dans les particules fines (sédiments et matières en suspension).**
- Cette contamination est vraisemblablement liée à la fois à la dégradation d'enrobés routiers riches en goudron de houille (coal tar), au trafic automobile local et à des retombées atmosphériques favorisées par le contexte géomorphologique et climatique local, puisque le massif jurassien tend à fonctionner comme un puits à retombées atmosphériques¹.
 - Le rôle, dans cette dynamique de contamination, des anciennes décharges et des sites industriels anciens ou actuels qui parsèment le bassin versant, 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 très rapidement au sein des masses d'eau.**
- 7. Les modifications physiques des cours d'eau et les altérations de la végétation de bordure – réduite et artificialisée – dégradent les habitats des poissons et des communautés vivant au fond 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 où des rivières karstiques de mêmes caractéristiques chimiques et thermiques présentent des altérations similaires à celles observées dans la Loue : colmatages végétaux, réduction des populations d'organismes consommateurs (brouleurs, prédateurs...) et mortalités intempestives de salmonidés.

¹ Badot et al. 2004. Pollution de l'air et retombées atmosphériques en Franche-Comté. Contamination des sols et de la végétation par le césium 137. Observatoire régional de l'Environnement, Conseil régional de Franche-Comté éditeur, pp.1-30.