



LES

Rencontres

DE L'ONEMA

Synthèse

Biodiversité aquatique : du diagnostic à la restauration

SYNTHÈSE DU SÉMINAIRE
«BIODIVERSITÉ AQUATIQUE :
QUELLES PISTES POUR LA GESTION
DES RIVIÈRES ET PLANS D'EAU ?» PARIS,
LES 14 ET 15 NOVEMBRE 2012.

Nicolas Poulet, Nirmala Séon-Massin et Laurent Basilico

Biodiversité aquatique : du diagnostic à la restauration

*SYNTHÈSE DU SÉMINAIRE
«BIODIVERSITÉ AQUATIQUE : QUELLES PISTES POUR
LA GESTION DES RIVIÈRES ET PLANS D'EAU ?» PARIS,
LES 14 ET 15 NOVEMBRE 2012*

Nicolas Poulet, Nirmala Séon-Massin et Laurent Basilico

Préambule



© N. Poulet - Onema

Le séminaire «Biodiversité aquatique : Quelles pistes pour la gestion des rivières et plans d'eau ?» a été organisé par l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (Onema) assisté de l'office international de l'eau (Oieau). Il s'est tenu à Paris, les 14 et 15 novembre 2012.

Cette synthèse est consultable sur le site de l'Onema (www.onema.fr rubrique Publications). Elle est référencée sur le portail national «Les documents techniques sur l'eau» (www.documentation.eaufrance.fr).

Contact

Nicolas Poulet,
Chargé de mission
Ecologie des organismes aquatiques
Direction de l'Action Scientifique et Technique
Pôle éco-hydraulique Onema-Irstea-IMFT
nicolas.poulet@onema.fr

Des torrents de montagne aux rivières de plaine, des lacs alpins aux étangs du littoral, les milieux aquatiques français sont riches d'une fantastique variété d'espèces animales et végétales. Cette biodiversité, faite d'équilibres complexes et fragiles entre les communautés vivantes et leurs habitats, est à la fois le reflet de la santé des milieux naturels et l'objet d'enjeux majeurs pour les sociétés humaines : enjeux patrimoniaux, touristiques, culturels, économiques. Alors que la nécessité de concilier développement humain et préservation des milieux naturels est désormais admise par tous, la biodiversité – notamment aquatique – apparaît aujourd'hui profondément menacée. En quelques décennies, l'aménagement accéléré des territoires et le développement de l'industrie et de l'agriculture intensive ont altéré les milieux : artificialisation des berges, diffusion de contaminants dans les écosystèmes, pression accrue sur la ressource en eau... L'avènement du changement climatique, qui se traduit déjà en France par des étiages plus sévères et un réchauffement sensible des masses d'eau, constitue un facteur d'incertitude croissant. La mondialisation des échanges et la création de nouvelles voies navigables s'accompagnent d'une mobilité sans précédent des espèces vivantes : l'arrivée rapide d'espèces exotiques, dont certaines se révèlent envahissantes, s'ajoute encore aux perturbations qui impactent les milieux aquatiques.

Dans ce contexte de changement global, quel est aujourd'hui l'état réel de la biodiversité aquatique en France ? Comment les évolutions présentes et à venir du climat affecteront-elles les peuplements piscicoles, la végétation, les communautés planctoniques ? Quels sont les impacts des invasions biologiques sur la biodiversité aquatique ? Quelles sont les conséquences des modifications des régimes de débit et de l'hydromorphologie ? Par quels moyens les gestionnaires des milieux aquatiques peuvent-ils évaluer ces impacts ? Et comment peuvent-ils œuvrer, aujourd'hui et demain, pour en limiter les effets et restaurer la biodiversité ?

Consacré à ces questions, le séminaire «Quelles pistes pour la gestion des rivières et plans d'eau ?», organisé par l'Onema les 14 et 15 novembre 2012, a rassemblé à Paris plus de 200 participants : unités de recherche, services de l'État, collectivités, entreprises, associations et ONG. Ces deux journées de dialogue entre science et gestion restituaient une trentaine d'actions de recherche partenariales autour de la biodiversité aquatique : après un état des lieux de la biodiversité de nos milieux aquatiques, les orateurs ont présenté un ensemble d'outils novateurs pour son suivi et sa restauration, dans le contexte du changement global. Le présent document constitue une synthèse des connaissances, méthodes et résultats livrés à cette occasion – ainsi que des nombreuses interrogations qui en découlent. ■

La rainette verte (Hyla arborea), espèce d'intérêt communautaire (annexe IV de la directive Habitats-Faune-Flore), est protégée ainsi que ses habitats au niveau national



© N. Poulet - Onema

Sommaire

**Menaces sur la biodiversité aquatique :
une prise en compte croissante par les politiques publiques..... 06**

I – La biodiversité aquatique : état des lieux en France

- 1.1 – De nombreuses espèces menacées 14
- 1.2 – Tendances temporelles : des signes positifs 16
- 1.3 – Suivis locaux : un éclairage précieux 20

Éclairage - Taxonomie : de quelles espèces parle-t-on ? 27

II – Des outils novateurs pour la connaissance et la gestion

- 2.1 – Inventaires *in situ* : l'apport de l'ADN environnemental 30
- 2.2 – Suivi et évaluation : vers une approche intégrée de la biodiversité 32
- 2.3 – Espèces aquatiques protégées : des fiches opérationnelles
pour les gestionnaires..... 36

Éclairage - Les mésocosmes : des outils pour comprendre la biodiversité aquatique .. 39

III – Le changement climatique : impacts et adaptation

- 3.1 – Peuplements piscicoles : des impacts déjà visibles ? 42
- 3.2 – Cas des poissons migrateurs amphihalins : modélisation et projections. 44
- 3.3 – Les processus microbiens : quelles réponses au réchauffement ? 47
- 3.4 – Zones humides, vulnérabilité et adaptabilité..... 49

Éclairage - Léman, Annecy : deux écosystèmes suivis à la loupe 52

IV – Dégradation des habitats : conséquences et solutions

- 4.1 – La qualité de l'eau, condition nécessaire à la biodiversité aquatique. 56
- 4.2 – Régime de débit et peuplements piscicoles 63
- 4.3 – Seuils, barrages et fractionnement des habitats :
l'apport de la génétique.....66
- 4.4 – Préservation de l'apron du Rhône : des résultats modestes mais
encourageants.....69
- 4.5 – Anguille européenne : 18 actions de R&D pour réduire l'impact des
ouvrages71

Éclairage - L'apport des documents historiques pour comprendre la biodiversité... 74

V – Les espèces invasives : diagnostic et gestion

- 5.1 – Le GT-IBMA : un outil de concertation et d'action à l'échelle
nationale78
- 5.2 – Des altérations profondes des écosystèmes : le cas de l'Adour 80
- 5.3 – Vers des approches économiques 82

Conclusion 86

Références 88

Menaces sur la biodiversité aquatique : une prise en compte croissante par les politiques publiques

La biodiversité connaît aujourd'hui une régression mondiale, marquée au cours du XX^e siècle par la disparition d'un nombre croissant d'espèces animales et végétales. En 2012, sur environ 65 500 espèces évaluées par l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN), plus de 20 200 étaient menacées d'extinction. Une large part de la communauté scientifique considère désormais la

période actuelle comme la sixième grande crise de la biodiversité – la dernière en date ayant vu la fin des dinosaures à la fin du Crétacé, voici 65 millions d'années. Mais la situation présente ne résulte pas d'un bouleversement géophysique ou climatique naturel : elle est la conséquence directe du rapide développement des sociétés et des activités humaines à l'ère industrielle.



Le développement de la société se fait trop souvent au détriment des milieux aquatiques



Les pollutions ne sont pas toujours aussi évidentes à identifier (p. ex. les micropolluants)

En seulement quelques décennies, l'urbanisation et l'artificialisation des territoires, l'agriculture intensive et la surexploitation des ressources ont exercé des pressions sans précédent sur les équilibres naturels. À ces pressions viennent s'ajouter aujourd'hui – et plus encore demain – les dérèglements induits dans le système climatique par l'accroissement des concentrations en gaz à effet de serre, tandis que la globalisation des échanges favorise une mobilité artificielle et rapide d'espèces parfois envahissantes, dont l'importation constitue un facteur de déséquilibre supplémentaire pour les écosystèmes.

Face à ce changement global, la biodiversité aquatique est souvent en première ligne. Espaces géographiquement isolés, les cours d'eau, lacs et étangs concentrent une très grande variété d'écosystèmes et d'espèces : des oiseaux d'eau aux peuplements piscicoles, des végétaux rivulaires aux communautés planctoniques. Matrice de cette vie foisonnante, l'eau est également une ressource vitale pour les sociétés humaines et l'objet de prélèvements croissants, pour l'alimentation en eau potable des populations, l'irrigation ou l'industrie. Les milieux aquatiques reçoivent, par drainage ou par ruissellement, une part

© H. Carmié - Onema



© G. Czerw - Onema

Quelques exemples des pressions et des impacts qui s'exercent sur les milieux aquatiques



© M. Bramard - Onema



© D. Maynacker - Onema

importante des polluants présents dans leur bassin versant.

À la croisée des enjeux sociétaux et économiques, les rivières voient leurs cours et leur fonctionnement profondément altérés : seuils et écluses pour la navigation, endiguement et chenalisation, barrages hydroélectriques...

Objet d'une prise de conscience croissante par l'opinion publique, la nécessité de préserver et de restaurer la biodiversité s'est progressivement imposée dans les politiques publiques comme une condition essentielle du développement durable. À l'échelle mondiale, la Convention sur la diversité biologique, rédigée lors du sommet de la Terre, à Rio de Janeiro en 1992, a été ratifiée depuis par 176 pays. La France, signataire en 1994, a publié en 2004 une première Stratégie nationale pour la biodiversité (SNB), déclinant les engagements de la Convention de Rio en dix plans sectoriels : patrimoine naturel, agriculture, international, urbanisme, infrastructures de transports terrestres, mer, forêt, outre-mer, recherche, tourisme. Révisée en 2010, dans le sillage du Grenelle de l'environnement, cette nouvelle stratégie nationale développe notamment les concepts de corridors biologiques et de réseaux d'aires protégées. Elle s'articule avec les

directives européennes dédiées à la biodiversité, véritables outils opérationnels pour la gestion et la restauration. La première d'entre elles est la directive «Oiseaux», adoptée dès 1979 dans la foulée de la Convention de Berne sur la vie sauvage. Elle a été suivie en 1992 par la directive «Habitats – faune – flore» (DHFF), pierre angulaire de la protection de la biodiversité dans l'Union européenne, à l'origine de la mise en place du réseau européen des Zones spéciales de conservation (ZSC) Natura 2000 (voir l'encadré ci-après). Le second rapportage DHFF fournira fin 2013 une évaluation de l'état de conservation en France pour 93 espèces végétales, 199 espèces animales et 132 habitats d'intérêt communautaire. Dans le cas des milieux aquatiques, ces outils de gestion transverses sont complétés par la Directive cadre sur l'eau (DCE), qui structure depuis 2000 l'effort communautaire de reconquête du bon état chimique et écologique des masses d'eau. Si elle n'est pas directement centrée sur un objectif de biodiversité aquatique, cette directive volontariste fait de la restauration des communautés vivantes – à travers notamment le développement et la mise en œuvre systématique de bioindicateurs – une condition de l'atteinte de l'objectif de bon état écologique des masses d'eau.

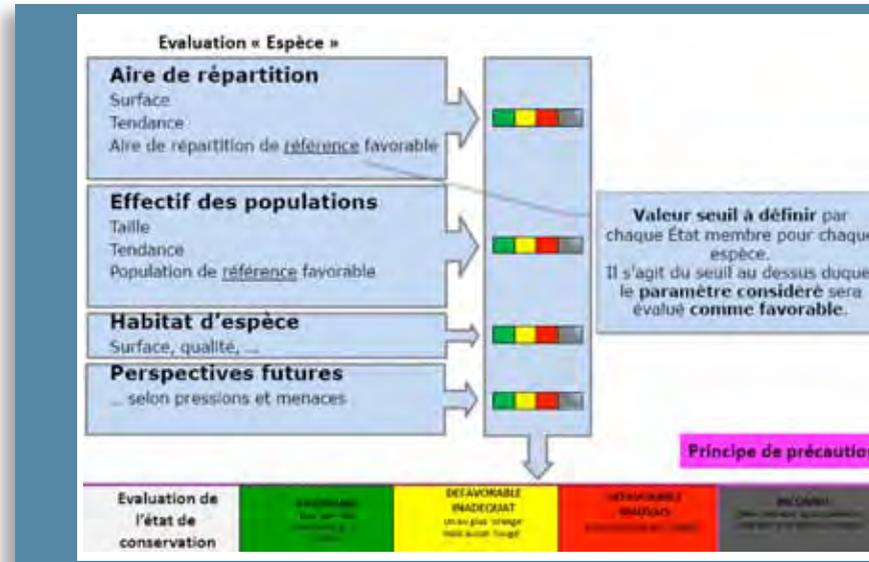
Directive Habitats faune flore : second rapportage en vue

Adoptée par l'Union européenne en 1992, la directive Habitats - faune - flore (DHFF) a pour objet de «contribuer à assurer la biodiversité par la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages sur le territoire européen.» (article 2). L'effort de conservation porte sur 132 types d'habitats (dont 11% d'habitats aquatiques), qui composent le réseau des Zones spéciales de conservation Natura 2000, ainsi que 292 espèces végétales et animales (dont notamment 8% de poissons et 9% d'amphibiens). En France, le réseau Natura 2000, établi en 2006, regroupe plus de 1600 sites, pour près de 12% du territoire métropolitain (en incluant les Zones de protection spéciales de la directive Oiseaux). Échéances majeures, les rapportages successifs prévus par la directive (article 17) exigent l'analyse de l'état de conservation des habitats et des espèces sur l'ensemble du territoire, via un formulaire d'évaluation incluant des données chiffrées pour les quatre critères retenus : aire de répartition, populations, habitats, perspectives futures (pour les espèces) ; aire de répartition, surface de l'habitat, structure et fonction, perspectives futures (pour les habitats).

Le premier rapportage français (2006-2007) a été réalisé dans l'urgence. L'exercice était nouveau et soulevait des questions complexes : les valeurs de référence, les notions de structure et de fonctionnement des habitats n'ont été que peu quantifiées et beaucoup de champs ont été renseignés à dire d'expert.

Pour le second exercice (2012-2013), les services en charge du rapportage peuvent désormais s'appuyer sur le premier bilan national sur la biodiversité dite remarquable, et sur de nombreuses sources de données à l'échelle française : base de données SIEau, nouveaux Atlas, synthèse des «Docob» (plans de gestion des sites Natura 2000)... La mise au point de la méthodologie de surveillance est un objectif majeur du premier semestre 2013. Elle doit permettre d'évaluer l'intérêt de ces différentes sources pour le rapportage ; de produire les protocoles de collectes complémentaires si nécessaire ; et de proposer les réseaux de surveillance et les indicateurs renseignant de manière comparable sur l'état, le poids des pressions, le fonctionnement... Dans le cas des habitats aquatiques du réseau Natura 2000, cette analyse est menée conjointement par l'Onema et le MNHN : sur la base d'une synthèse bibliographique complète, un groupe d'experts a bâti une méthodologie, testée sur le terrain avant d'éventuels ajustements. Objectif : disposer de méthodes standardisées, accessibles à tous les opérateurs, pour assurer une évaluation cohérente sur l'ensemble du territoire.

Figure 1. Principe de l'évaluation Directive Habitats - faune - flore pour les espèces animales et végétales.



L'instauration de ce cadre réglementaire donne aux gestionnaires de l'eau des objectifs opérationnels au service de la biodiversité aquatique. Ce faisant, il induit des besoins nouveaux en connaissances scientifiques et en outils dédiés : analyses temporelles, nouvelles méthodes pour les inventaires in situ, développement d'indicateurs de biodiversité, actions de restauration, études locales en lien avec une pression donnée, programmes de suivi spécifiques.... De nombreuses actions de recherche ont été menées en ce sens, dans l'Union européenne, au cours des dernières années. En France, l'Onema pilote ou soutient une part importante de ces travaux, souvent en lien avec la mise en œuvre de la DCE.

Le séminaire « Biodiversité aquatique : quelles pistes pour la gestion des rivières et plans d'eau », organisé à son initiative les 14 et 15 novembre 2012, a permis de faire le point sur les résultats récents et les orientations de recherche actuelles, au travers d'une trentaine de contributions suivies de débats. Après un état des lieux de la biodiversité aquatique en France, la présente synthèse expose un ensemble d'outils novateurs pour son suivi et sa restauration. Elle apporte ensuite des expériences et des éléments concrets sur les liens complexes entre biodiversité aquatique et changement global, selon trois parties thématiques : changement climatique, dégradation des habitats et espèces invasives. ■



Dans quel état la biodiversité de nos rivières et plans d'eau se trouve-t-elle ? La première session du séminaire a dressé un état des lieux à l'échelle nationale.

Chiffres à l'appui, le comité français de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) a rappelé en ouverture la situation inquiétante de nombreuses espèces aquatiques : il s'agit aussi bien d'espèces endémiques comme l'apron du Rhône (*Zingel asper*) ou le chabot du Lez (*Cottus petiti*) que d'espèces autrefois communes et abondantes comme l'anguille (*Anguilla anguilla*) ou l'écrevisse à pattes blanches (*Austropotamobius pallipes*).

Mais le constat peut être en partie nuancé par l'examen des tendances chronologiques positives observées en Métropole pour de nombreuses espèces piscicoles, parmi lesquelles de nombreuses exotiques... L'analyse de ces tendances peut être affinée localement, par l'exploitation des données de suivis au long cours. Fait notable : la découverte d'espèces - natives - qui se cachaient parmi des espèces que l'on pensait bien connaître comme les goujons (*Gobio* sp.) et les vairons (*Phoxinus* sp.). Pour autant, leur état de conservation reste à évaluer...

1.1 – De nombreuses espèces menacées

En France métropolitaine, quinze espèces de poissons d'eau douce sur 69 espèces natives – soit plus d'une sur cinq – sont aujourd'hui menacées, selon le comité français de l'UICN (Figure 2). Quatre d'entre elles sont en « danger critique » : l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*), l'esturgeon européen (*Acipenser sturio*), l'apron du Rhône (*Zingel asper*) et le chabot du Lez (*Cottus petiti*). La loche d'étang (*Misgurnus fossilis*) ou la truite corse sont quant à elles « en danger », tandis que des espèces emblématiques sont considérées comme « vulnérables », à l'image du brochet (*Esox lucius*), du saumon atlantique

(*Salmo salar*) ou de l'omble chevalier (*Salvelinus umbla*). Par ailleurs, pour près de 32% des espèces, l'évaluation n'a pas été menée en raison de données insuffisantes : cette proportion importante s'explique notamment par la description récente d'espèces cryptiques (voir Eclairage Révisions Taxonomique en fin de chapitre).

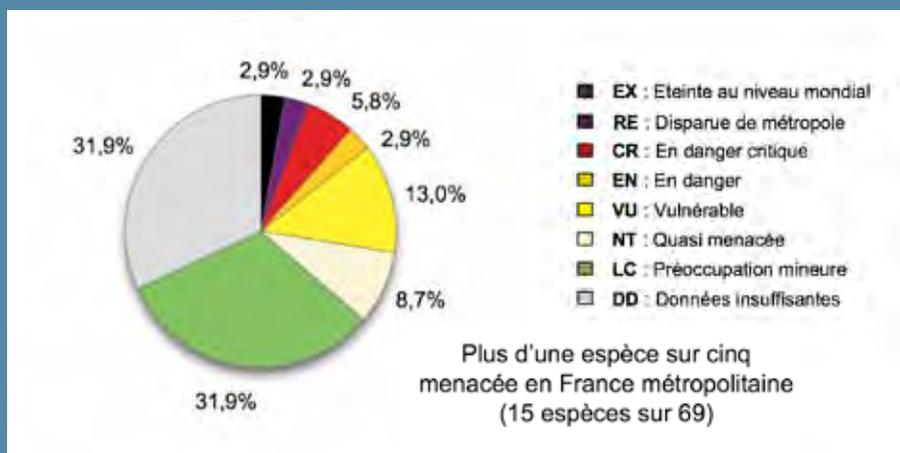
La situation est également inquiétante pour les crustacés d'eau douce, avec 161 espèces menacées sur 576. L'écrevisse des torrents (*Austropotamobius torrentium*) est parmi les espèces en danger critique d'extinc-

tion, tandis que l'écrevisse à pattes blanches (*Austropotamobius pallipes*) est classée vulnérable. Quant aux départements et territoires d'Outre-mer, riches de milieux aquatiques remarquables mais fragiles – d'autant plus en contexte insulaire – ils présentent un tableau tout aussi alarmant. Ainsi à la Réunion, huit espèces de poissons d'eau douce sur 24 sont considérées comme menacées.

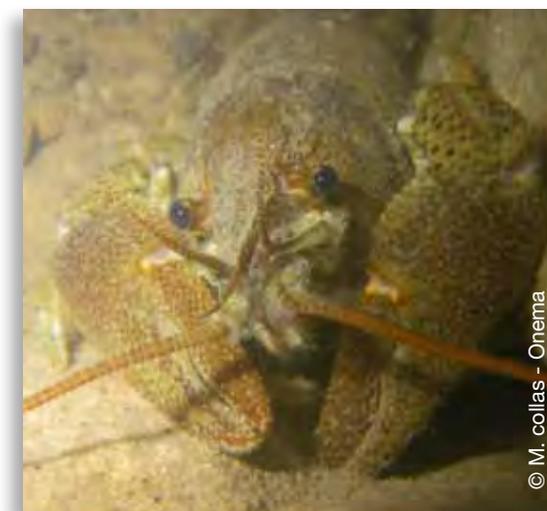
Ces données, présentées (F. Kirchner, UICN France) en introduction du séminaire, sont issues de la Liste rouge des espèces menacées publiée par le comité français de l'UICN. Réalisée selon la méthodologie déployée dans le monde entier par l'UICN, elle constitue un outil scientifique

et décisionnel de référence sur le risque d'extinction des espèces. Le processus d'évaluation fait intervenir des scientifiques possédant une connaissance experte des taxons, réunis lors d'ateliers dédiés. La classification des espèces dans les différentes catégories repose sur des critères biologiques précis, comme l'effectif des populations, leur taux de déclin, la superficie de l'aire de répartition et le degré de fragmentation de la répartition. En complément de cette approche centrée sur les espèces, l'UICN développe également depuis plusieurs années un système de classification des écosystèmes, pour fournir une vision plus intégrée de l'état la biodiversité (voir section 2.2).

Figure 2. Statut des 69 espèces de poissons d'eau douce de Métropole selon le comité France de l'UICN.



L'écrevisse à pattes blanches et le brochet, espèces autrefois abondantes, ont été classés comme espèces vulnérables par l'UICN



1.2 – Tendances temporelles : des signes positifs

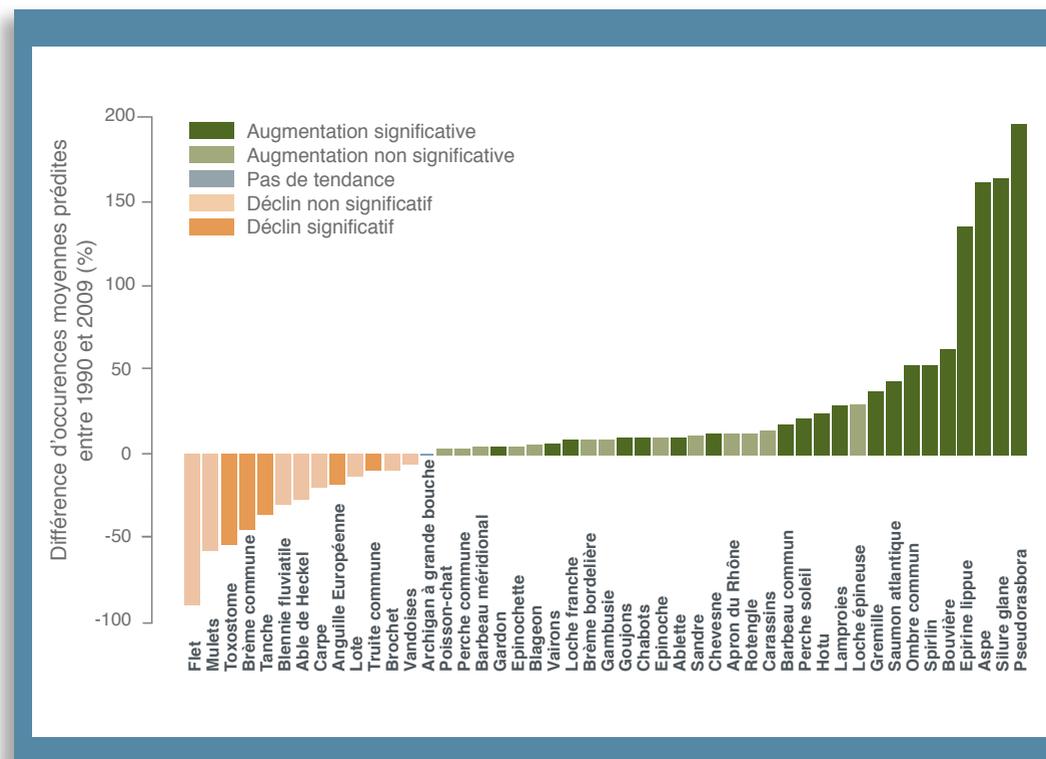
L'état de la biodiversité à un instant donné est la résultante d'un ensemble de processus complexes. Certaines pressions sont levées, d'autres s'aggravent, le contexte climatique change, des actions de restauration sont engagées. À ce titre, l'analyse des tendances temporelles observées pour une espèce – évolution de son aire de répartition ou de sa densité – revêt un intérêt majeur pour comprendre son statut dans une perspective dynamique.

Un tel examen a été mené, à l'échelle de la France métropolitaine, pour les communautés piscicoles. L'étude (N. Poulet, Onema) s'est basée sur les données de la banque de données des milieux aquatiques et piscicoles de l'Onema (BDMAP), qui rassemble les résultats de plus de 11 000 inventaires piscicoles réalisés sur le territoire depuis les années 70. Après sélection des chroniques qui présentaient au moins huit années de suivi avec une même stratégie d'échantillonnage, le jeu de données final rassemble 7 748 opérations menées sur 590 stations pour la période 1990-2009, avec une bonne couverture nationale et une représentation équilibrée de toutes les tailles de cours d'eau.

Les résultats sont contrastés selon les espèces, mais témoignent d'évolutions significatives et plutôt positives. Ainsi la richesse spécifique moyenne (le nombre moyen d'espèces de poissons recensés par station) est-elle passée de 8,1 à 9,5 entre 1990 et 2009. Dans 58% des stations étudiées, on rencontre davantage d'espèces aujourd'hui qu'il y a vingt ans. Cette tendance n'est cependant pas répartie uniformément sur le territoire. Ainsi les cours d'eau du Nord-Est de la France affichent-ils des gains marqués en richesse spécifique, tandis que d'autres zones, dans l'Ouest et le Sud-Ouest notamment, connaissent une situation en demi-teinte.

Les orientations divergent bien sûr selon l'espèce considérée. Pour 42% des espèces, l'occurrence moyenne (présence du taxon sur une station), a significativement augmenté depuis 1990. Elle s'est réduite pour seulement 11% des espèces (Figure 3). Dans le même temps, la densité moyenne sur l'ensemble des stations s'est significativement accrue pour 74% des espèces, tandis qu'elle est en repli pour 17% d'entre elles.

Figure 3. Différence d'occurrences moyennes entre 1990 et 2009 (%), pour 47 espèces de poissons d'eau douce de France métropolitaine.



Les poissons qui connaissent le plus fort développement, en densité comme en occurrence, sont les espèces introduites : silure (*Silurus glanis*) (Figure 4a), pseudorasbora (*Pseudorasbora parva*), gambusie (*Gambusia holbrooki*), aspe (*Aspius aspius...*), et les petites espèces spirin (*Alburnoides bipunctatus*), bouvière (*Rhodeus amarus*), grémille (*Gymnocephalus cernuus...*).

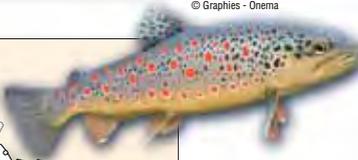
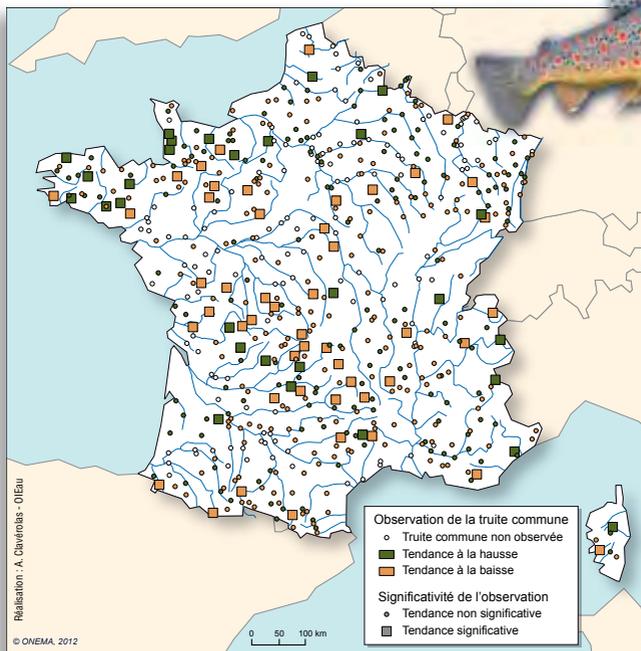
Parmi les espèces qui apparaissent en déclin figurent des poissons natifs comme la tanche (*Tinca tinca*), la brème (*Abramis brama*), l'anguille et la truite commune (*Salmo trutta*) (Figure 4b). Là encore, ces tendances globales ne sont en général pas réparties de manière uniforme sur le territoire.

a



Figure 4a et 4b. Exemples de cartographies d'évolution des densités spécifiques pour (a) le silure glane et (b) la truite commune.

b



Quels facteurs explicatifs ?

L'interprétation de ces tendances reste complexe. L'étude a par exemple cherché à relier les évolutions constatées au changement climatique, dont certains travaux antérieurs ont montré qu'il favorisait globalement, aux latitudes tempérées, une augmentation de la densité totale avec un avantage aux petites espèces (Daufresne *et al.*, 2009) et une augmentation de la richesse spécifique avec un avantage aux espèces d'eau tempérées sur les espèces d'eau froide.

Mais dans le cadre de l'étude présente, aucune corrélation nette n'a pu être mise en évidence entre les tendances observées pour chaque espèce et leur température de reproduction. Des mécanismes d'adaptation pourraient expliquer certaines évolutions locales. Le signal est de surcroît brouillé par les repeuplements, dans le cas par exemple de l'ombre (*Thymallus thymallus*), du brochet ou de la truite commune. Mais les efforts entrepris depuis trente ans pour maîtriser et améliorer la qualité de l'eau – notamment par la réduction des pollutions organiques et des rejets de phosphate – constituent très probablement un facteur-clé des signes d'embellie perçus au niveau

national. Pour les espèces qui apparaissent en déclin, différentes hypothèses explicatives peuvent être émises. Le cas de l'anguille est le mieux documenté (voir section 4.3) : cette espèce migratrice subit simultanément l'impact des ouvrages qui entravent ses déplacements, la surpêche et l'altération de ses habitats. Dans le cas de la brème, le repli observé pourrait être relié à la baisse concomitante de l'eutrophisation des cours d'eau. La tanche subit vraisemblablement la régression des bras morts et annexes fluviales, qui sont parmi ses habitats préférés. Les résultats ont été publiés dans une revue internationale (Poulet *et al.*, 2011) et sont accessibles en français dans la collection « Les synthèses eau-france » (<http://www.onema.fr/collection-les-syntheses-eaufrance>).

Cette étude, objet d'un vif intérêt lors du séminaire, pâtit bien sûr à ce stade de certaines limites. En particulier, elle ne permet pas de dégager de tendances significatives pour les espèces les plus rares et souvent les plus menacées comme le révèle l'UICN (voir section 1.1) – à l'image de la loche d'étang ou de l'esturgeon européen, pour lesquels très peu de données sont disponibles. Dans d'autres cas, comme celui du saumon atlantique, les données ne permettent

pas de caractériser le déclin d'une espèce car celui-ci est antérieur à la période étudiée (voir Éclairage - L'apport des documents historiques pour comprendre la biodiversité). Des perspectives de recherche sont proposées pour poursuivre l'analyse

: les tendances devront notamment être étudiées à différentes échelles spatiales (cours d'eau, bassin versant...), et complétées lorsque c'est possible par l'apport de données historiques et une meilleure prise en compte des effets du repeuplement.

1.3 - Suivis locaux : un éclairage précieux



L'existence de suivis approfondis, menés parfois depuis plusieurs décennies sur un écosystème ou une population piscicole particuliers, constitue un apport précieux pour appuyer l'évaluation globale et relier les évolutions constatées dans les peuplements à des pressions ou à des facteurs environnementaux. Deux de ces études au long cours ont été présentées lors du séminaire, et font l'objet de cette section.

Truites de mer et saumons de la Bresle : deux populations suivies à la loupe depuis 30 ans

Les populations de truites de mer et de saumons atlantiques de la Bresle, fleuve côtier picard, font l'objet depuis 1982 d'un suivi systématique de l'Onema (et auparavant du Conseil supérieur de la pêche) : effectifs, taille, poids, taux de survie en mer et en rivière – en lien avec les

paramètres climatiques et hydrologiques. Les résultats, présentés lors du séminaire (Gilles Euzenat, Françoise Fournel, Onema), fournissent un tableau très précis de la démographie locale de ces salmonidés migrateurs. Sur la Bresle, les deux espèces sont assez voisines : cycle biologique court de 3-4 ans, gabarits adultes similaires : 55 cm - 2,4 kg pour la truite, 66 cm - 2,9 kg pour le saumon. Les effectifs de truite (adultes) sont onze fois supérieurs à ceux du saumon : 1 640 contre 148 en moyenne sur la période. Dans les deux cas, les suivis révèlent des évolutions marquées : les effectifs de truite sont significativement plus élevés depuis 1997 qu'ils ne l'étaient dans la période précédente ; quant à ceux du saumon, ils sont revenus aux niveaux initiaux après une nette dépression entre 1993 et 2004, liée à une surmortalité marine.

La taille moyenne des adultes connaît une diminution continue pour les deux espèces. En trente ans, la longueur des truites est passée de 57 à 53 cm, tandis que celle des saumons baissait de 68 à 63 cm. Les raisons divergent : chez la truite, cette diminution de la taille est essentiellement liée à un rajeunissement de la structure d'âge, la taille restant stable pour un même «âge de mer». A contrario,

chez le saumon, la diminution de la taille moyenne est liée à la diminution intrinsèque de la taille à un «âge de mer» donné. Cette baisse de la taille, et du poids, représente une perte de 18 % de la biomasse des reproducteurs à effectif constant. D'autres évolutions, mises en évidence par les suivis scientifiques, confirment une perturbation de la dynamique des deux populations sur la période étudiée : croissance accélérée en rivière, décélérée en mer, maturation précoce, surmortalité juvénile en mer pour le saumon, surmortalité post-fraie pour la truite, décalage marqué des périodes de migration... Ces signaux forts témoignent d'un dérèglement/ajustement de l'écologie des espèces en réaction aux modifications de l'environnement.

Le suivi année par année des taux de survie des deux espèces, en rivière et en mer, montre lui aussi des évolutions temporelles marquées, et des divergences entre les deux espèces. L'analyse de ces résultats à l'aune des facteurs climatiques livre quelques constats. En particulier, chez le saumon, on peut établir une corrélation négative entre le taux de survie en rivière et la pluviométrie à l'émergence des alevins en mars, les valeurs de survie les plus élevées correspondant toutes à des cumuls mensuels inférieurs à

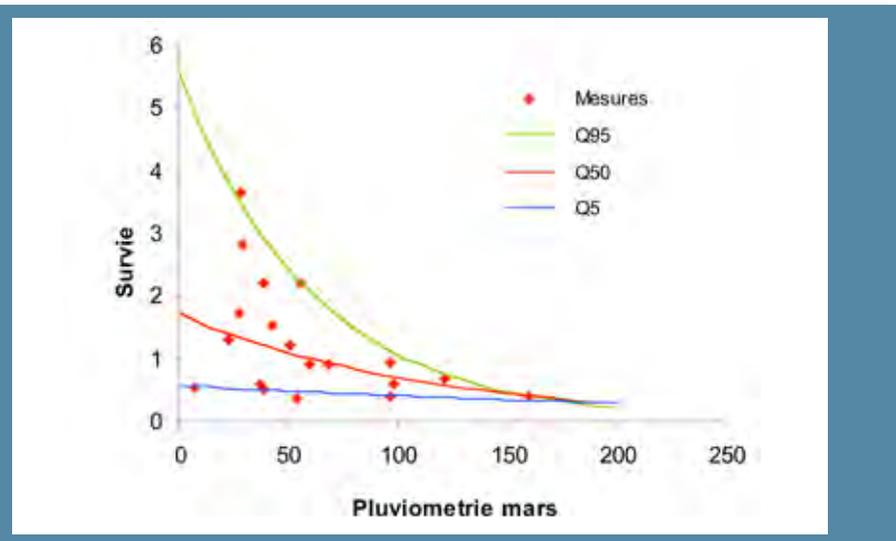
Prélèvement d'écaillés sur un saumon atlantique dans le cadre du suivi à long terme des salmonidés migrateurs sur la Bresle

60 mm (Figure 5). Ce ne sont bien sûr pas les précipitations qui interviennent en tant que telles, mais le ruissellement agricole et urbain qu'elles induisent, associé à la charge solide, néfaste à la survie précoce. Aucune relation de ce type n'est mise en évidence chez la truite de mer, le très faible taux de survie biologique – intrinsèque ou dû à un potentiel reproducteur très en excès par rapport à l'habitat disponible – écrasant l'éventuel impact environnemental.

Ces faits et chiffres sur la démographie de la truite de mer et du saumon, sont rares et uniques pour certains. Contribution importante à la connaissance des deux espèces,

ils sont très précieux pour fonder les mesures de leur gestion et restauration, *in situ* et par transfert sur d'autres bassins. Ils sont le fruit d'un travail au long cours, à la fois quotidien et sur la durée, qui seul, donne le recul nécessaire à l'expertise et l'évaluation, faisant le lien entre le biologique et l'environnemental, essayant de distinguer l'interne de l'externe, le naturel de l'anthropique. La Bresle, avec la Station Onema de Eu, joue ainsi pleinement son rôle de rivière-index au plan national et international.

Figure 5. Survie du saumon en rivière et pluie à l'émergence.



Le lac Léman : une mer intérieure

© D. Gerdeaux - INRA

Léman, Annecy : deux écosystèmes suivis à la loupe

Un dispositif de suivi intensif est déployé sans interruption depuis 1974 sur le lac Léman, et étendu depuis 1986 au lac d'Annecy. La Commission Internationale de Protection des Eaux du Léman (CIPEL) réalise des échantillonnages une ou deux fois par mois : relevé des paramètres physico-chimiques (température, pH, concentrations en nitrate et phosphate...) à différentes profondeurs, du fond à la surface ;

prélèvements de phytoplancton jusque 50 m de profondeur et mesure de chlorophylle a ; échantillonnage du zooplancton au filet jusque 50 m, identification des espèces et comptage. Les peuplements piscicoles sont également suivis systématiquement depuis 1986 par bancarisation des statistiques journalières de la pêche professionnelle, ce qui permet le suivi de la dynamique des populations à intérêt halieutique.

Cet ensemble de données sans équivalent en France alimente des

analyses intégrées de la dynamique actuelle de ces deux écosystèmes, de leur biodiversité et de leurs réponses respectives au changement global, qui ont fait l'objet de nombreuses publications. Ces deux lacs périalpins, situés sur un substrat calcaire, connaissent des évolutions distinctes du fait notamment de leurs tailles très différentes : 582 km² et une profondeur moyenne de 152,7 m pour le Léman, contre 27 km² et 41,5 m en moyenne pour le lac d'Annecy. Tous deux présentent une stratification thermique estivale stable et ne gèlent jamais en hiver ; le milieu lémanique est de type mésotrophe (moyennement riche en éléments nutritifs), tandis que son voisin savoyard est plutôt oligotrophe (plus pauvre en éléments nutritifs). Outre le réchauffement, le facteur de changement le plus important pour

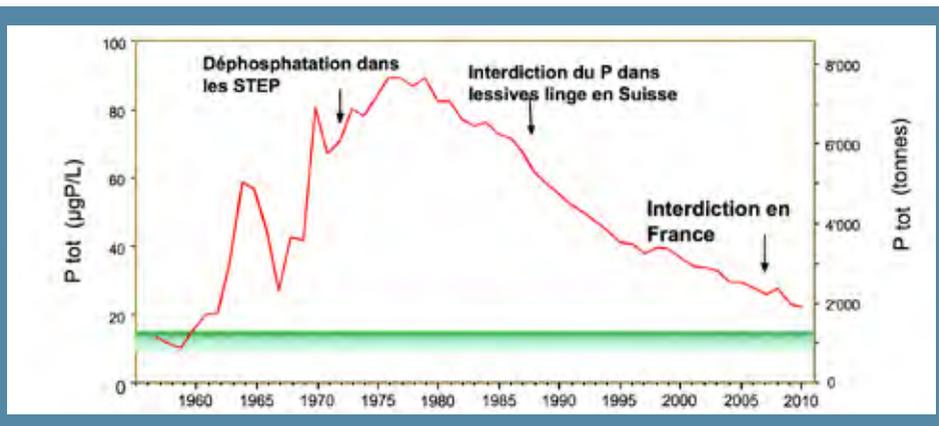
le Léman ces dernières décennies a été la concentration en phosphore des eaux du lac. Celui-ci a subi une forte eutrophisation, le phosphore total passant de 20 µgP/L au début des années 1960 à 90 µgP/L au début des années 1980 (Figure 6). Depuis, il connaît une réoligotrophisation marquée, sous l'effet de décisions politiques : déphosphatation dans les stations d'épuration à partir de 1973, interdiction du phosphate dans les lessives en 1987 en Suisse, puis en 2007 en France. Au lac d'Annecy, la concentration totale en phosphore n'a jamais dépassé 20 µgP/L depuis 1988, dans un contexte de protection précoce du plan d'eau.

Le suivi sur le long terme mené sur les deux lacs a permis d'étudier les relations entre la concentration en

phosphate et les évolutions dans leurs communautés biologiques respectives, des assemblages de phytoplancton aux populations piscicoles. L'autre facteur essentiel qui concourt à ces évolutions est l'élévation de la température, avec là encore des situations distinctes d'un plan d'eau à l'autre. Le lac d'Annecy ne possède pas l'inertie thermique suffisante pour enregistrer l'accroissement de la température induit par le changement climatique : un hiver froid suffit à « réinitialiser » sa température hivernale la plus basse aux alentours de 4°C. A contrario, la grande profondeur du lac Léman lui permet d'enre-

gistrer le signal faible du changement climatique. La température moyenne cinq mètres sous la surface a connu une élévation d'environ 1,5° C depuis 40 ans. Cet échauffement se traduit par des évolutions importantes pour l'écosystème : stratification thermique plus précoce dans l'année et moindre oxygénation des couches profondes. Ces phénomènes impactent en cascade toutes les composantes de l'écosystème lémanique. L'analyse de ces évolutions (D. Gerdeaux, INRA), objet d'un exposé détaillé lors du séminaire, est présentée dans «Eclairage sur le lac Léman» en fin de chapitre 3.

Figure 6. Évolution de la concentration en phosphore (P) des eaux du Léman depuis 1955 (STEP : station d'épuration).



Protection de roselière dans le port de Sévrier sur le lac d'Annecy



Au Léman, sur la Bresle et ailleurs, ces (trop rares) programmes de suivi au long cours constituent de véritables observatoires locaux de la biodiversité aquatique : ils livrent des connaissances précieuses pour éclairer l'état des lieux national, appréhender ses évolutions dans le contexte du changement global, et identifier les mesures de gestion qui permettent la restauration des équilibres éco-

logiques. Leur maintien dans la durée n'est pourtant pas assuré : des financements peuvent être interrompus ou réaffectés, et le départ de quelques chercheurs moteurs suffit parfois à fragiliser toute la démarche. La nécessité de pérenniser ces programmes a fait l'objet d'un large consensus lors du séminaire, chez les scientifiques comme chez les gestionnaires. ■

Les suivis piscicoles sur le long terme sont un outil précieux tant pour les chercheurs que pour les gestionnaires



© C. Roussel - Onema

Eclairage

Taxonomie : de quelles espèces parle-t-on ?

Pour comprendre la biodiversité, il faut d'abord savoir identifier, classer et nommer les différents organismes vivants qui composent les écosystèmes. C'est l'objet de la taxonomie : depuis 250 ans cette discipline a permis de décrire plus de 1,7 millions d'espèces, en utilisant essentiellement des critères morphologiques, anatomiques et éthologiques. Mais la taxonomie n'est pas une science figée, et de nouveaux outils ont été mis en œuvre dans les dernières décennies : microscopie électronique, morphométrie, génétique moléculaire. Ainsi une nouvelle approche de la taxonomie dite «intégrative» vise à délimiter les taxons en examinant cinq perspectives complémentaires – ADN, géographie, morphologie, écologie, reproduction. Une espèce est «validée» lorsqu'elle présente une congruence pour au moins deux de ces perspectives.

Cette méthode peut conduire à des révisions significatives de la classification, comme l'ont montré les travaux menés sur différents poissons d'eau douce présents en France : le chevesne, la vandoise, le goujon, le chabot et le vairon (Gaël Denys, MNHN ; Vincent Dubut, Université d'Aix-Marseille). Dans le cas du goujon, par exemple, seule l'espèce *Gobio gobio* était identifiée en France (Keith & Allardi, 2001). Mais une étude sur critères morphologiques (Kottelat & Persat, 2005) a suggéré qu'il existait en réalité quatre espèces distinctes. Dans une approche de taxonomie intégrative, le MNHN a confronté ces résultats avec l'analyse du marqueur mitochondrial COI des spécimens. Cette approche moléculaire a permis de confirmer trois des espèces proposées : la taxonomie distingue désormais, en France, les goujons *Gobio gobio*, *Gobio lozanoi* et *Gobio occitaniae*. La même méthode a validé l'existence de deux espèces de vandoise et deux espèces de chevesne (contre une auparavant), tandis que huit espèces de chabot (contre deux auparavant) sont en cours de validation (voir Keith *et al.*, 2011).

Le cas du vairon est également étonnant. Alors qu'une espèce (Keith & Allardi 2001) puis deux autres avaient été décrites en France (Kottelat, 2007), une étude génétique utilisant différents marqueurs moléculaires a été menée avec l'appui de l'Onema sur 600 individus issus de 28 populations dans neuf régions hydrogéographiques. Les résultats montrent une très forte structuration génétique des populations par bassin géographique, et un faible impact des translocations. Au final, l'étude a entériné les trois espèces nominales de Kottelat 2007, mais aussi identifié six espèces complémentaires qui restent à valider par un autre critère.



Goujon de l'Adour



Goujon occitan



Goujon commun

pour la connaissance et la gestion



À la faveur de la mise en œuvre des politiques européennes, DCE et Directive Habitats – Faune - Flore en tête, un ensemble de méthodes opérationnelles sont développées en France pour mieux comprendre les évolutions de la biodiversité aquatique et appuyer les actions de gestion.

De nouveaux outils apparaissent à la faveur des (r)évolutions technologiques alors que d'autres émergent grâce à l'accumulation de données et de connaissances issues de décennies de recherche en écologie et d'inventaires naturalistes.

De la méthode de l'ADN environnemental pour les inventaires en rivière aux nouvelles approches d'évaluation intégrée de la biodiversité, cette seconde partie présente quelques outils innovants qui permettront demain aux gestionnaires d'œuvrer plus efficacement au service de la préservation et de la restauration des milieux aquatiques.

2.1 – Inventaires *in situ* : l'apport de l'ADN environnemental

Pour réaliser des inventaires faunistiques ou floristiques dans les milieux aquatiques, les gestionnaires de l'eau utilisent aujourd'hui des méthodes éprouvées : prélèvements au filet ou à la bouteille pour les communautés planctoniques, échantillonnages dans les sédiments pour les invertébrés benthiques, pêche électrique pour les communautés piscicoles... Mais ces techniques impliquent souvent des coûts importants en temps et en personnel, et toutes présentent des limites. L'identification des taxons en laboratoire, dans le cas des invertébrés ou des diatomées, est également longue et coûteuse.

Avec l'essor de la bioinformatique, les approches basées sur l'identification de l'ADN ouvrent des pistes prometteuses, en complément ou en substitution aux techniques actuelles. La méthode de l'ADN environnemental (ADNe), présentée lors du séminaire (C. Miaud, École pratique des hautes études), suscite un intérêt croissant parmi les scientifiques et gestionnaires de l'eau.

Le principe est simple : après prélèvement d'un échantillon environnemental dans le milieu (un certain volume d'eau de la rivière par exemple), les fragments d'ADN qui s'y trouvent sont «amplifiés» au moyen d'amorces universelles (plantes, mammifères, poissons...). Ils sont ensuite séquencés

puis identifiés au moyen d'une base de référence. En France, cette méthode a été testée à partir de 2011 pour les inventaires piscicoles en cours d'eau. Une base de références génétiques a été constituée (par le LECA et la société SPYGEN avec l'appui de l'Onema et la contribution de différents acteurs dont le MNHN, Irstea, le Conapped, la Tour du Valat...) après séquençage du génome de 95 espèces de poissons. Une première étude comparative a été menée sur six sites où étaient pratiqués en parallèle des pêches électriques et des inventaires par ADNe.

L'eau est pompée puis filtrée afin de récupérer les cellules de poissons contenant l'ADN



© Spygen

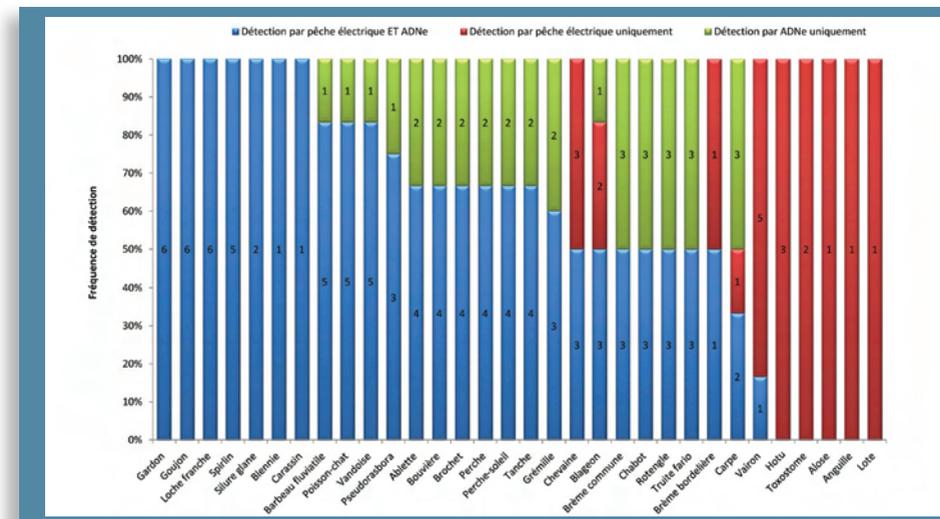
La pêche était réalisée sur le cours d'eau selon le protocole standardisé utilisé dans le cadre de la DCE. Pour l'ADNe, 50 litres d'eau étaient prélevés sur chaque site. Au total, 31 espèces ont été détectées par la pêche, contre 26 pour l'ADNe (Figure 8).

Des disparités plus ou moins importantes étaient observées selon les stations, certaines espèces étant parfois détectées par une des deux méthodes uniquement. Ces écarts peuvent provenir de différents biais. Dans le cas où l'ADNe n'a pas détecté une espèce dont la présence dans la rivière a été confirmée lors de la pêche, le problème peut venir de l'échantillonnage (l'ADN de l'espèce n'était pas présent dans le volume d'eau prélevé), d'un défaut d'amplification du fragment d'ADN par les amorces ou de la base

de références. Dans le cas inverse, plusieurs hypothèses peuvent expliquer la différence :

- le signal n'est pas significatif (c.-à-d. assimilable à un «bruit de fond») et l'espèce devrait plutôt être considérée comme absente ;
- l'espèce peut avoir été présente sur la station sans avoir été pêchée (espèces rares, notamment dans le cas des pêches partielles) ;
- l'espèce peut être présente sur la station à certaines périodes uniquement (or les pêches et les prélèvements ont eu lieu avec plusieurs semaines de décalage) ;
- l'espèce peut être présente sur des secteurs en amont (les fragments d'ADN pouvant persister pendant un certain temps dans le courant).

Figure 8. Fréquence de détection par espèce par l'ADN environnemental et/ou par pêche électrique



En l'état, ces premiers résultats confirment cependant l'intérêt de l'ADNe comme outil complémentaire à la pêche électrique (l'ADNe ne permet pas d'avoir accès à la structure en taille, ni pour l'instant à des estimations d'abondance ou de biomasse), en particulier dans le cas des grandes rivières, d'autant qu'elle présente l'avantage de pouvoir inventorier plusieurs communautés aquatiques avec un seul échantillonnage (potentiellement amphibiens, mammifères aquatiques, invertébrés, etc.). Mais la méthode doit encore être améliorée pour pouvoir être utilisée en routine, par exemple dans le cadre de la mise en œuvre de réseaux de surveillance. L'objectif d'une relation fiable entre l'ADN identifié dans l'échantillon et la

biomasse de l'espèce dans la masse d'eau est hors de portée... pour le moment. Les équipes travaillent à la détermination de seuils d'interprétation et à l'optimisation des méthodes d'analyse du signal obtenu, qui doivent notamment permettre de mieux appréhender la distance de détection des espèces. Une autre perspective d'évolution concerne le développement de systèmes de prélèvement plus intégrateurs, en travaillant par exemple sur des volumes d'échantillon plus importants, afin notamment de mieux détecter les espèces rares ou à faible densité. Ces points doivent faire l'objet de projets portés par l'Onema en partenariat avec le LECA, SPYGEN et Irstea.

2.2 – Suivi et évaluation : vers une approche intégrée de la biodiversité

La connaissance du nombre et de la densité des espèces présentes ne suffit pas pour appréhender la biodiversité d'un territoire. Celle-ci comprend classiquement trois composantes : à la diversité spécifique s'ajoutent la diversité génétique pour une espèce donnée, et la diversité des écosystèmes présents sur le territoire. En complément aux approches basées sur les inventaires floristiques et faunistiques, le développement d'outils permettant une approche intégrée de la biodi-

versité s'impose depuis plusieurs années comme une tendance de fond pour les stratégies actuelles d'évaluation.

UICN : quelle évaluation pour les écosystèmes ?

L'UICN a lancé en 2008 la mise au point d'une méthodologie pour bâtir, en parallèle à sa Liste rouge des espèces menacées, une Liste rouge des écosystèmes. Après plusieurs ateliers organisés en 2011 pour

préciser les critères d'une telle évaluation, cette approche innovante a été présentée en 2012 au Congrès mondial de la nature de Jeju (Corée du Sud). Huit catégories ont été définies pour les écosystèmes, sur le modèle de celles existantes pour les espèces : effondré (CO), en danger critique d'effondrement (CR), en danger d'effondrement (EN), vulnérable (VU), quasi-menacé (NT), faible inquiétude (LC), données insuffisantes (DD), non évalué (NE). Le statut global d'un écosystème correspond au statut le plus pessimiste obtenu pour l'un des cinq critères retenus : réduction de la répartition spatiale (A), caractère

restreint de l'étendue de l'écosystème (B), dégradation de l'environnement abiotique (C), perturbation des interactions biotiques (D), analyse quantitative (E). Pour chacun de ces critères, le statut découle d'une grille d'analyse précise. Ainsi le critère de réduction de la répartition spatiale intègre-t-il la réduction enregistrée depuis 1750, celle enregistrée au cours des 50 dernières années et celle attendue au cours des 50 prochaines.

Pour la France, les premières études de cas, présentées lors du séminaire (A. Carré, UICN France), ont été menées sur les lagunes méditer-

Le lac du Sanguinet dans les Landes : un milieu considéré «en danger» par l'UICN



ranéennes, les lacs et étangs du littoral aquitain, la zone intertidale des marais atlantiques et le bassin d'Arcachon. Ce dernier, par exemple, a été classé dans la catégorie «vulnérable» en raison des résultats obtenus pour le critère C (contamination et eutrophisation dues aux concentrations en métaux lourds, HAP et pesticides) et le critère D (régression d'une espèce-clé de l'écosystème, la zostère). Les lacs et étangs du littoral aquitain sont quant à eux considérés comme «en danger» au regard du critère D, en raison du développement rapide de végétaux invasifs.

Cet outil intégratif, qui offre un cadre de référence pour surveiller l'évolution de la biodiversité sous l'angle «écosystèmes», sera progressivement déployé à l'échelle mondiale par l'UICN, à l'instar de l'évaluation menée pour les espèces. Comme cette dernière, il présente un grand intérêt opérationnel pour la gestion : l'évaluation permet d'identifier les écosystèmes les plus menacés et les pressions qui doivent faire l'objet de mesures prioritaires. Elle contribue ainsi à orienter et appuyer les politiques et les stratégies d'action dans une optique de conservation et de restauration de la biodiversité.

Vers des indicateurs de fonctionnement des écosystèmes

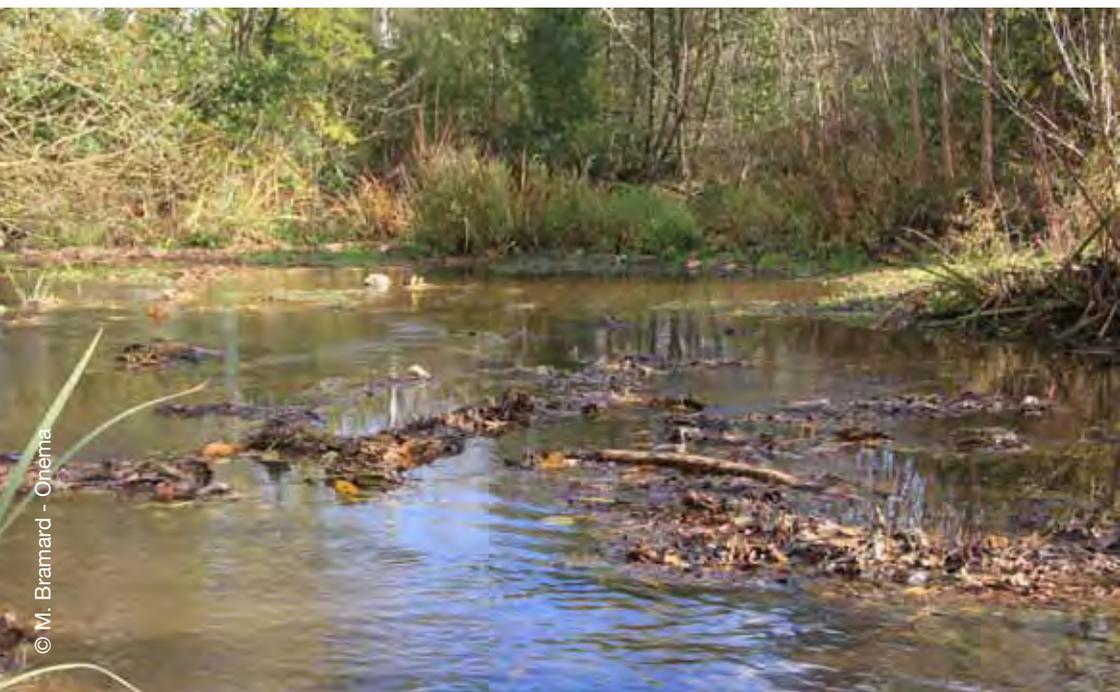
Le fonctionnement des milieux aquatiques résulte d'un grand nombre d'interactions entre les communautés vivantes, et avec leur environnement abiotique. Cette complexité rend difficile et coûteuse la réalisation de diagnostics fiables «en routine», par exemple dans le cadre des suivis réguliers qu'impose l'évaluation des trajectoires écologiques des écosystèmes restaurés. Objet d'un nombre croissant de travaux, le développement d'indicateur dits «fonctionnels» vise à intégrer cette complexité par la mesure d'un signal simple, mais révélateur du fonctionnement – bon ou mauvais – des interactions fondamentales au sein d'un milieu.

En France, le développement de tels outils fait l'objet d'un effort partenarial porté notamment par l'Onema. Un ensemble de six projets de recherche a été lancé pour la période 2012-2015. Le premier d'entre eux vise au développement d'un indicateur basé sur la mesure de processus écologiques indispensables comme le recyclage de la matière organique ou l'épuration des nutriments, pour l'évaluation de la qualité écologique des

cours d'eau et le suivi de leur restauration (J-M. Baudouin, Onema, G. Tixier, Université de Metz). Un premier protocole testé consistait à suivre la cinétique de décomposition de la matière organique particulaire. Une solution efficace a été mise en œuvre, utilisant comme substrat standardisé des bandelettes de coton. La valeur retenue pour quantifier leur état de décomposition en fonction du temps d'exposition est la «charge d'arrachage» mécanique (Tiegs *et al.*, 2007). Le dispositif est testé en 2012 sur six cours d'eau pilotes en Lorraine, avec des temps d'exposition de 10 et 32 jours. Les premiers résultats montrent une altération drastique du processus de recyclage de la matière organique, à temps d'immersion égal, selon les pressions anthropiques (agriculture intensive, artificialisation du lit des cours d'eau et urbanisation des rives...) qui s'exercent sur les rivières.

Les autres projets en cours explorent différentes pistes pour suivre l'efficacité d'actions de restauration, de la standardisation des méthodes de suivi de la décomposition des litières de feuilles mortes, à l'apport des méthodes isotopiques pour évaluer l'état des réseaux trophiques, en passant par le développement d'indicateurs de la capacité auto-épuratrice des sédiments du lit des cours d'eau.

La vitesse de décomposition de la litière renseigne sur le bon fonctionnement de l'écosystème





© N. Poulet - Onema

La cistude d'Europe (Emys orbicularis) est une espèce protégée par les réglementations nationale (arrêté du 19 novembre 2007) et européenne (Annexes II et IV de la Directive Habitat Faune Flore)

Ces outils pourraient fournir un complément idéal aux indicateurs «classiques» (les bioindicateurs basés sur la composition d'une communauté biologique donnée par exemple) : replaçant le fonctionnement des écosystèmes au centre de l'analyse, ils présentent en outre l'intérêt de détecter rapidement la réponse d'un écosystème après la levée d'une pression – on

parle alors d'indicateurs précoces. Adaptés à un suivi standardisé, ils offrent également une valeur d'entrée pertinente pour les évaluations économiques et l'analyse chiffrée des services écosystémiques. Enfin ces indicateurs peuvent aider à la quantification des fonctionnalités écologiques, au cœur des enjeux de compensation des impacts à l'environnement.

2.3 - Espèces aquatiques protégées : des fiches opérationnelles pour les gestionnaires

Les directives européennes «Oiseaux» (1979) et «Habitats Faune Flore» (1992), piliers de la politique communautaire en matière de biodiversité, ont donné aux États membres l'objectif de «maintenir ou restaurer dans un état de conservation favorable» les espèces de faune et de flore d'intérêt communautaire inscrites en annexe II.

En France, ces dispositions ont été retranscrites dans le Code de l'environnement via notamment l'article L.411-1 qui indique, pour les espèces animales protégées au niveau national, que toute forme d'atteinte aux individus est strictement interdite : destruction ou enlèvement des œufs ou des nids, mutilation, destruction, capture ou enlèvement,

perturbation intentionnelle, naturalisation, etc. Selon ces espèces, la protection s'applique également à leurs «milieux particuliers», dont les sites de reproduction, aires de repos et corridors de déplacement. Ces interdictions s'appliquent aussi longtemps que les milieux particuliers sont utilisables au cours des cycles de reproduction ou de repos de l'espèce, et ce dès que les altérations induites par un projet remettent en cause «le bon accomplissement des cycles biologiques de l'espèce». Si les exigences liées à un projet donné l'imposent, il est toutefois possible de déroger à ces interdictions (sous conditions) ; des mesures de compensation ou d'atténuation doivent alors être proposées.

Pour les acteurs locaux et les services instructeurs, la mise en œuvre

de cette politique de protection – et en particulier le traitement des demandes de dérogation aux interdictions précitées – est souvent délicate. Elle soulève de nombreuses questions, dont : quels sont les «milieux particuliers» à ces espèces ? Quel est l'état de conservation des populations concernées au droit du projet et comment l'évaluer ? En quoi le projet affecte-t-il l'accomplissement des différentes phases de leurs cycles biologiques ? Etc. Pour assister les acteurs locaux, le Ministère chargé du développement durable, l'Onema et le Muséum national d'Histoire Naturelle (V. de Billy, Onema, R. Puissauve, MNHN) ont lancé en 2011 la réalisation de fiches de synthèse bibliographique de la connaissance scientifique acquise sur 105 espèces protégées inféodées aux milieux aquatiques (figure 9).



Figure 9. Les fiches de synthèse des connaissances sur les espèces protégées : un véritable outil de gestion.

© Renaud Puissauve

Conçues comme un véritable outil de gestion, ces fiches apportent, selon un format standardisé, l'ensemble des informations nécessaires à la mise en œuvre des mesures de protection concernant une espèce donnée : répartition en France, statut réglementaire, état de conservation selon l'UICN, description des habitats particuliers (avec renvois typologiques), éléments biologiques et physico-chimiques, alimentation, périodes de reproduction et phénologie... Chaque fiche suggère également des moyens pour éviter ou réduire les impacts de divers projets sur l'espèce. Elles sont d'abord réalisées par le MNHN (R. Puissauve) puis validées par des experts de l'espèce en question.

Saluée par de nombreux gestionnaires présents lors du séminaire, la réalisation de l'ensemble de ces fiches est une action au long cours. Après la rédaction de six fiches en 2011, puis de vingt-cinq autres en 2012, vingt nouvelles espèces sont en cours de traitement en 2013. Ces ressources sont disponibles en ligne sur le site l'Onema (<http://www.onema.fr/Especies-aquatiques-protegees>) et sur celui de l'INPN (<http://inpn.mnhn.fr/actualites/lire/1781/mise-en-ligne-de-fiches-de-synthese-sur-les-especies-aquatiques-protegees>). ■

Figure 10. Représentation schématique de la plateforme PLANAQUA, avec ses lacs artificiels et ses mésocosmes, sur le site du CEREEP-Ecotron IleDeFrance (image non contractuelle).



Les mésocosmes : des outils pour comprendre la biodiversité aquatique

À l'heure du changement global, la compréhension *in situ* des mécanismes qui régissent la biodiversité aquatique reste un défi scientifique du fait de la complexité des écosystèmes. En complément aux connaissances acquises sur le terrain, la mise en œuvre de mésocosmes constitue une approche expérimentale pertinente pour les chercheurs et les gestionnaires. Définis comme des « systèmes artificiels placés dans des conditions environnementales naturelles, et possédant suffisamment de complexité et de stabilité pour être autosuffisants » (Caquet *et al.*, 1996), ils sont utilisés depuis les années 1970 en écologie et en écotoxicologie. Leur volume varie le plus souvent de quelques centaines de litres à quelques centaines de mètres cubes pour des durées d'expérience allant de quelques semaines à quelques mois. Intermédiaires entre les systèmes de laboratoire et les écosystèmes naturels, les mésocosmes offrent une prise en compte simultanée de différents niveaux trophiques, la possibilité d'échantillonner les mêmes populations au cours du temps, la capacité de répliquer les traitements et de générer des plans factoriels complexes. En contrepartie, ils souffrent parfois d'un faible rapport signal/bruit et d'un réalisme écologique limité. Leur mise en œuvre doit être envisagée en recherchant, selon le problème posé, le meilleur compromis entre la taille des mésocosmes et leur nombre. L'Onema a publié en 2010 dans la collection « Rencontres-synthèses » un ouvrage sur le sujet (Les mésocosmes - Des outils pour les gestionnaires de la qualité des milieux aquatiques ?). L'intérêt de disposer également de dispositifs expérimentaux répliqués de plus grandes dimensions (plusieurs centaines de m³) a été souligné lors du séminaire (G. Lacroix, CNRS). De tels systèmes, plus représentatifs de la complexité spatiale des milieux naturels et abritant des communautés écologiques complexes, permettraient un couplage plus direct entre les questions fondamentales des scientifiques et les demandes émanant de la société en termes de gestion des milieux et de la qualité des eaux. En France, la plateforme PLANAQUA (« Plateforme expérimentale Nationale d'écologie aquatique ») offrira bientôt aux scientifiques et aux gestionnaires un ensemble de dispositifs expérimentaux à différentes échelles (Figure 10). Financé à partir de 2011 dans le cadre de l'appel d'offres Equipex, le projet est implanté au sein du CEREEP – Ecotron IleDeFrance (<http://www.foljuif.ens.fr>). Il prévoit la fourniture d'ici 2014 et 2015 de microcosmes et bioréacteurs de quelques décilitres à une dizaine de litres pour des expérimentations sur les communautés microbiennes et planctoniques ; de mésocosmes de quelques m³ à quelques dizaines de m³ avec un fort contrôle des gradients thermiques et du mélange des eaux ; enfin la construction d'un ensemble de 16 lacs artificiels fortement instrumentés de 700 m³ chacun (aussi appelés « macrocosmes ») pour l'étude de communautés complexes, intégrant jusqu'aux poissons carnivores en sommet de chaîne.

3

Le changement climatique :

impacts et adaptation



En France, la température moyenne de l'air a connu une augmentation de l'ordre de 1°C depuis 1910. Il est désormais acquis (Quatrième rapport du GIEC, 2007) que les perturbations du système climatique observées à l'échelle globale ont pour principal moteur l'augmentation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre (GES) résultant des activités humaines. Il est également admis que ce changement climatique va se poursuivre et s'amplifier au cours du XXI^e siècle, dans des proportions qui dépendent de l'évolution future des émissions anthropiques de GES. L'étude de ses impacts – présents et à venir – sur les milieux aquatiques fait l'objet d'un important effort de recherche en France, sous l'impulsion notamment du programme (Gestion et impacts du changement climatique (GICC) du ministère en charge du développement durable et de l'Onema.

Certains de ces travaux sont synthétisés dans l'ouvrage «Changement climatique : impacts sur les milieux aquatiques et conséquences pour la gestion», paru en 2010 dans la collection «Rencontres-synthèses» (<http://www.onema.fr/collection-les-rencontres-syntheses>). Le séminaire Biodiversité aquatique 2012 a permis de présenter plusieurs études complémentaires, qui font l'objet de cette troisième partie.

3.1 – Peuplements piscicoles : des impacts déjà visibles ?

Le changement climatique constitue une perturbation croissante pour les milieux aquatiques. Entre 1978 et 2008, le Rhône français a connu une élévation de température de 1°C à 2°C sur l'ensemble de son cours. Sur la Loire moyenne, le réchauffement observé entre 1977 et 2003 est compris entre 1,5 et 2°C (Moatar & Gailhard, 2006).

Face à cette évolution, les espèces animales et végétales sont susceptibles d'adopter deux types de réponses : le déplacement (pour conserver leur «niche climatique») et/ou l'adaptation aux nouvelles conditions locales. Des observations récentes ont constaté des processus de déplacement pour de nombreux groupes taxonomiques : chez les plantes (Lenoir *et al.*, 2008), chez les oiseaux (Thomas & Lenon, 1999), chez les insectes (Wilson *et al.*, 2005) ou chez les petits mammifères (Moritz *et al.*, 2008). Pour les poissons, de nombreux travaux en modélisation

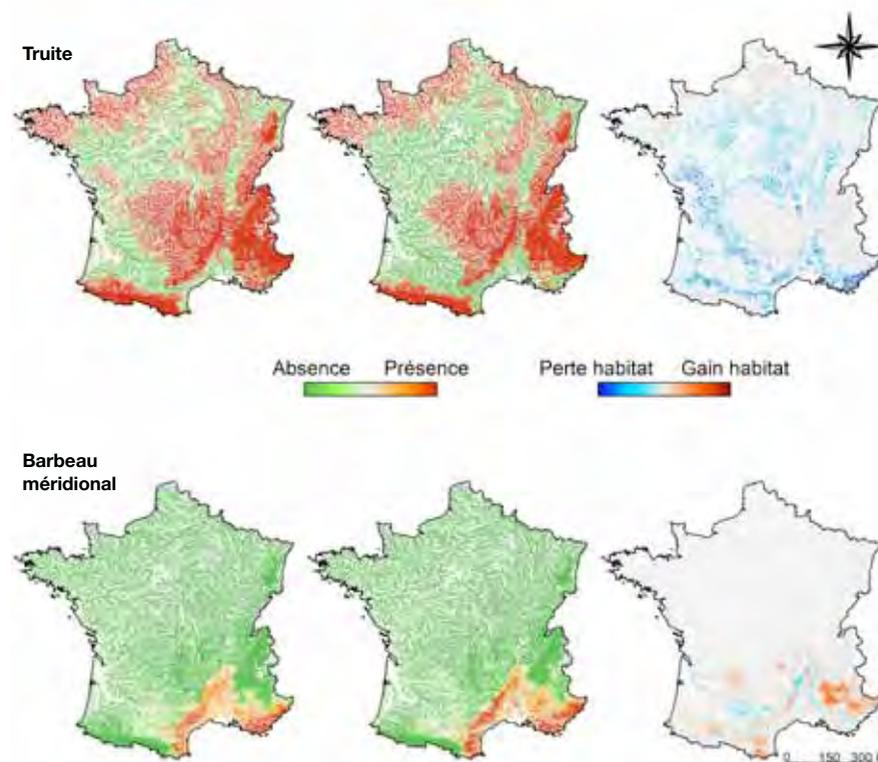
annoncent des modifications significatives des aires de répartitions à l'horizon 2100 (voir notamment section 3.2).

Mais de tels déplacements sont-ils déjà visibles ? C'est ce qu'a essayé de savoir, à l'échelle de la France métropolitaine, une étude (L. Comte, Univ. Toulouse III) basée sur les données issues de la BDMAP de l'Onema (voir section 1.2) depuis 1980. L'analyse des données météorologiques disponibles pour ces trois décennies permet de distinguer deux périodes : l'une «froide», de 1980 à 1992, l'autre «chaude», de 2003 à 2009. Entre ces deux plages de temps, le réchauffement de l'air pour une station donnée est en moyenne de 0,74°C. Il n'est bien sûr pas homogène sur le territoire, mais la très grande majorité des stations a enregistré une hausse sensible de la température. La méthode a alors consisté à modéliser l'évolution

des distributions de 32 espèces de poissons d'eau douce en présence-absence, entre ces deux périodes, à partir des inventaires piscicoles menés sur le réseau hydrographique. La base de données retenue comporte pour chaque période des échantillonnages réalisés sur plus de 3 500 sites. La comparaison des aires de répartition permet de cartographier les modifications des distributions spécifiques.

Les résultats révèlent de fortes divergences selon les espèces. Par exemple, la truite commune tend à disparaître aux marges de sa distribution initiale, tandis que le barbeau méridional apparaît aux marges de la sienne (Figure 11). Quant au vairon, il gagne des habitats au sein de toute sa distribution initiale.

Figure 11. Exemples de cartographie d'évolution de la répartition spatiale, pour la truite commune et le barbeau méridional. À gauche : habitat favorable pendant la période «froide» (1980-1992). Au centre : habitat favorable pendant la période «chaude» (2003-2009). À droite : différence entre les deux. Les couleurs rouges indiquent un gain d'habitat et les couleurs bleues une perte d'habitat.



La régression récente de la truite commune (Salmo trutta) pourrait être due - entre autres - au changement climatique



Bien sûr, dans le contexte du changement global, ces constatations ne peuvent être attribuées au seul accroissement des températures. L'analyse de la répartition des espèces le long du gradient d'altitude est néanmoins un critère pertinent pour étudier les réponses au changement climatique. L'étude a mis en évidence une remontée en altitude pour la plupart des espèces. En moyenne, celle-ci s'effectue à raison de 1,37 m par an – soit un rythme significativement plus élevé que pour la moyenne des autres groupes taxonomiques (+0,61 m/an, d'après Parmesan & Yohe 2003). Cette remontée en altitude des populations piscicoles n'apparaît cependant pas suffisamment rapide pour compenser l'accroissement thermique et leur permettre de conserver leur niche climatique. Un tel constat peut s'interpréter en considérant que les espèces tendent à «suivre» leur niche climatique, avec un certain dé-

lai dans leur réponse : elles subissent ainsi un réchauffement moins important que si elles avaient conservé leur répartition initiale.

Bien qu'imparfaite – notamment en raison de l'hypothèse qui assimile réchauffement de l'air et réchauffement de l'eau – cette étude livre des données précieuses en vue d'une analyse plus fine des réponses de chaque espèce : quels sont les déterminants biologiques et fonctionnels qui les sous-tendent ? Dans quelle mesure le changement de niche climatique s'accompagne-t-il d'évolutions dans les stratégies de reproduction, l'alimentation, la taille ? Plus largement, que peut-on en déduire quant aux capacités des espèces à faire face aux changements climatiques futurs ? Des éléments de réponse sont apportés dans la section suivante pour les poissons migrateurs amphihalins.

3.2 – Cas des poissons migrateurs amphihalins : modélisation et projections

Comme chez tous les animaux poïkilothermes (à sang froid), la température influence la plupart des processus biologiques des poissons (par ex. Ficke *et al.* 2007), leurs histoires de vie et leurs traits de vie (par ex. Bryant 2009) : bilan énergétique, taux de survie des œufs et

des juvéniles, courbe de croissance, maturité sexuelle... Ainsi, chez *Alosa sapidissima*, le nombre de reproductions qu'un spécimen effectue au cours de sa vie augmente très significativement dans les rivières les plus septentrionales (Limburg *et al.*, 2003). La croissance des saumons

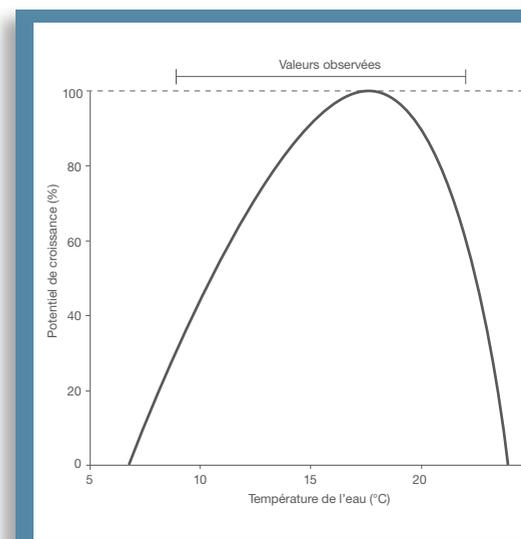
atlantiques juvéniles dépend étroitement de la température, selon une courbe en cloche (Figure 12).

Un nombre croissant de travaux scientifiques vise depuis plusieurs décennies à prévoir les implications futures du changement climatique sur la biologie des poissons et leurs populations, en lien avec le développement des outils de modélisation numérique.

Les migrateurs amphihalins, particulièrement affectés par le changement global – au point d'être, pour plusieurs d'entre eux en France, menacés d'extinction (voir section 1.1) – font l'objet d'une attention particulière. Dans le cadre du séminaire a été présenté (E. Rochard, Th. Rougier, Irstea) un ensemble de recherches françaises récentes visant à prévoir les évolutions possibles de leurs aires de répartition et la viabilité de leurs populations à l'horizon 2100, pour 196 bassins versants européens.

Ces travaux ont utilisé deux approches couplées : modélisation à large échelle des enveloppes bioclimatiques (Lassalle *et al.*, Irstea) et évaluation statistique de la viabilité des populations à échelle variable (Rougier *et al.*, Irstea). La base de données initiale comprend les caractéristiques géographiques

Figure 12. Effet de la température de l'eau sur la croissance journalières des juvéniles de saumon atlantique (*Salmo salar*) (Bal *et al.* 2011 adapté de Mallet *et al.* 1999).



et climatiques des 196 bassins versants étudiés, ainsi que les données historiques en présence/absence et en niveau d'abondance de vingt espèces migratrices pour chaque bassin depuis 1900. Les modèles ont été appliqués pour les quatre familles de scénarios climatiques du GIEC.

Les résultats diffèrent fortement d'un scénario à l'autre, et selon les espèces considérées. Dans le cas du saumon, pour le scénario d'émission de gaz à effet de serre A1Fi (le plus pessimiste), l'espèce disparaîtrait à l'horizon 2100 de la

Garonne, de l'Adour et des petits bassins bretons et normands (ainsi que de la Péninsule ibérique et de la plupart des bassins baltiques). Le scénario B1, le plus favorable, le verrait se maintenir dans la Garonne et dans la plupart des fleuves bretons. Les perspectives sont tout-à-fait différentes pour le mulot porc, qui conserverait tous ses habitats actuels en 2100 quel que soit le scénario, et ferait même son apparition dans de nombreux bassins du Nord de l'Europe. Les divergences et convergences des projections selon les scénarios climatiques peuvent être cartographiées par bassin :

la figure 12 de la page précédente représente ces résultats dans le cas du saumon atlantique.

Ces approches statistiques pâtissent bien sûr de certaines limites, et ne doivent être considérées qu'à large échelle, en complément d'autres éléments. Elles ne prennent en particulier pas en compte la dynamique de population des espèces, ni les processus ou les obstacles qui minorent leurs capacités de dispersion - l'intégration de ces processus aux modèles fait l'objet d'une thèse en cours (Thibaud Rougier, Irstea). Mais les résultats présentés consti-

Le changement climatique est une menace supplémentaire pour la survie des populations de saumon sur certains bassins français



© C. Pinel - Onema

tuent déjà des éléments utiles pour les gestionnaires. Les décisions et les investissements en vue de la sauvegarde d'une espèce donnée doivent bénéficier des éléments disponibles sur la viabilité à terme des populations dans le bassin concerné. Des solutions existent toutefois pour atténuer les impacts du changement climatique sur les migrateurs - et plus largement sur les poissons d'eau douce. Le développement de la ripisylve, la suppression de seuils et de barrages, voire l'utilisation des grands barrages permettant

d'abaisser la température de l'eau à l'aval (Yates *et al.*, 2008), modifient localement les relations entre température de l'air et température de l'eau. L'amélioration de la connectivité entre masses d'eau donne aux espèces plus de possibilités pour ajuster leurs aires de répartition. Parmi les réflexions émergentes, la migration assistée, envisagée par exemple pour le saumon chinook (Holsman *et al.*, 2012), suscite des réactions très contrastées dans la communauté scientifique.

3.3 - Les processus microbiens : quelles réponses au réchauffement ?

Souvent centrées sur les communautés piscicoles, les macrophytes ou les invertébrés, groupes emblématiques qui concentrent la majorité des suivis, les approches actuelles de la biodiversité aquatique n'accordent encore que peu d'attention aux communautés microbiennes. À tort, tant leur rôle est important dans les mécanismes qui structurent les milieux naturels.

Les communautés microbiennes représentent une diversité fonctionnelle capitale pour l'équilibre physico-chimique des écosystèmes, intervenant à toutes les étapes des cycles couplés du carbone, du phosphore et de l'azote. À l'heure du changement

climatique, l'étude des effets du réchauffement de l'eau sur les écosystèmes microbiens s'impose comme un enjeu de recherche majeur pour comprendre et anticiper les impacts à venir sur l'ensemble de la biodiversité aquatique. Les approches mathématiques et les analyses de laboratoire, offrant de grandes possibilités de contrôle et de réplification, ne prennent pas en compte la complexité des interactions entre organismes microscopiques. Les mésocosmes (voir encadré en fin de chapitre précédent) offrent un compromis intéressant entre répliquabilité et réalisme écologique. Mais seules les études expérimentales *in situ* permettent d'appré-

hender l'ensemble des paramètres qui influent sur les communautés microbiennes naturelles.

Une telle approche a été mise en œuvre (S. Boulêtreau, Ecolab, CNRS) pour les biofilms épilithiques (se développant sur les pierres) de la Garonne, à Golfech. À l'interface de la colonne d'eau et du substrat, ces biofilms concentrent une grande variété d'espèces vivantes : on y trouve notamment plus de 100 espèces

d'eucaryotes ciliés, plus de 75 espèces d'eucaryotes rotifères et plus de 50 espèces de diatomées. Chaque gramme de matière organique abrite aussi environ 1011 cellules bactériennes. L'étude *in situ* a consisté à comparer les évolutions des structures des communautés bactériennes dénitrifiantes, entre le milieu naturel (température moyenne 17°C) et un contexte de réchauffement artificiel créé, quelques décimètres plus loin, par la centrale nucléaire de Golfech (température moyenne 19,5°C). Les autres paramètres environnementaux – hauteur d'eau, vitesse de l'écoulement, physico-chimie – étaient inchangés. Le temps d'incubation était de trois semaines. En parallèle, des mesures étaient réalisées en laboratoire, en température contrôlée (1°C-12°C-21°C-31°C), pour quantifier l'activité dénitrifiante, la respiration et la production primaire de différentes structures de communautés microbiennes. L'extrapolation des résultats obtenus *in situ* donne des éléments chiffrés pour caractériser la dépendance thermique du métabolisme des biofilms. L'augmentation de 2,5°C de la température du milieu s'est traduite, au bout de trois semaines, par un accroissement d'un facteur de 1,5 de l'activité de dénitrification. La respiration et la production primaire des communautés étaient également augmentées, dans des proportions moindres. À ce stade,

ces travaux novateurs posent beaucoup de questions pour peu de réponses. De quoi dépend la sensibilité thermique des communautés dénitrifiantes ? Est-elle plutôt déterminée par leur histoire thermique, leur composition, leur biomasse ? Dans quelle mesure le réchauffement sélectionne-t-il les microorganismes ? Quelles sont les conséquences tem-

porelles (saisonniers, annuelles) sur les flux d'azote entre le biofilm et la masse d'eau ? Et quels seront les effets induits par ces évolutions sur le réseau trophique et sur les services rendus par l'écosystème ? Une nouvelle étude co-financée par l'Onema et EDF est actuellement en cours pour tenter de répondre à certaines de ces questions.

Les biofilms en tant que producteurs primaires constituent un maillon essentiel dans le fonctionnement des rivières ; comprendre leur évolution en réponse au réchauffement climatique s'avère donc crucial



3.4 - Zones humides, vulnérabilité et adaptabilité

Ecosystèmes riches d'une biodiversité remarquable mais particulièrement vulnérables au changement climatique, les zones humides (ZH) font l'objet d'un traité de conservation à l'échelle internationale depuis la convention de Ramsar, en 1972, ratifié par la France en 1986. Ses résolutions appellent notamment les parties contractantes à « gérer rationnellement les zones humides de façon à réduire les multiples pressions auxquelles elles sont soumises et renforcer ainsi leur résilience aux changements climatiques » (résolution X.24, art. 28, 2002). À l'échelle nationale, un Plan d'action en faveur des zones humides (2010) a confirmé l'urgence de mettre en place des suivis à long-terme permettant d'évaluer l'évolution des zones humides vis-à-vis du changement climatique.

L'un des premiers projets de recherche sur cette thématique a été mené dans le cadre du programme prospectif Explore 2070. Lancé en 2010 par le ministère en charge de l'écologie, celui-ci vise à l'élaboration de stratégies d'adaptation face à l'évolution des hydrosystèmes et des milieux côtiers à l'horizon 2050-2070. Parmi ses acquis, une méthode a été développée pour évaluer la vulnérabilité des zones humides et des services associés vis-à-vis du changement climatique. Les résultats obtenus pour onze zones humides de France métropolitaine ont été présentés (F. Baptist, Biotope) lors du séminaire. Pour cinq d'entre elles – la Brenne, la vallée fluviale de la Bassée, la Dombe, les lagunes méditerranéennes de Mauguio et de Thau – une évaluation des services écosystémiques a également été menée. La démarche est synthétisée dans la figure 13.

Figure 13. Méthode d'évaluation de la vulnérabilité des zones humides déployée dans le cadre d'Explore 2070.



Cette analyse demande d'abord d'identifier les principaux facteurs de sensibilité pour une zone donnée – par dire d'expert ou par étude bibliographique. Par exemple, dans le cas des zones humides des plaines intérieures, les milieux les plus sensibles au changement climatique sont les aulnaies-frênaies, les dépressions tourbeuses à *Rhynchospora alba*, les landes humides, les prairies à molinie, les milieux tourbeux et les lisières à grandes herbes.

Dans le cadre de l'étude, les trois zones humides de ce type (Brenne, Sologne, Dombes) se sont vues attribuer des niveaux de sensibilité (S) élevés. L'analyse des niveaux d'exposition (E), intégrant notamment la diminution attendue des précipitations et des débits moyens, révèle cependant des situations différentes : les Dombes connaissent un niveau d'exposition élevé, tandis qu'il est modéré pour la Brenne et la Sologne. Enfin, la vulnérabilité (V) de ces trois zones humides est liée principalement à la réduction de la lame d'eau, au développement de



Les landes humides (ici le Pinail dans la Vienne) sont particulièrement sensibles au changement climatique

© M. Bramard - Onema

l'eutrophisation et aux menaces apportées par les espèces invasives. Dans le cas des Dombes, le risque accru d'étiage à l'aval des étangs induit une vulnérabilité supplémentaire. Au final, les Dombes sont considérées comme très vulnérables au changement climatique, les deux autres zones humides affichant un niveau de vulnérabilité moyen.

Pour les zones humides des vallées alluviales, la même méthode a conduit à des estimations très différentes : faible vulnérabilité pour la vallée alluviale Rhin-Ried-Bruch, vulnérabilité moyenne pour la Basée, vulnérabilité élevée pour les Barthes de l'Adour. Les lagunes du littoral méditerranéen livrent également des diagnostics contrastés.

L'ensemble des résultats est accessible sur Internet : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Explore-2070-.html>.

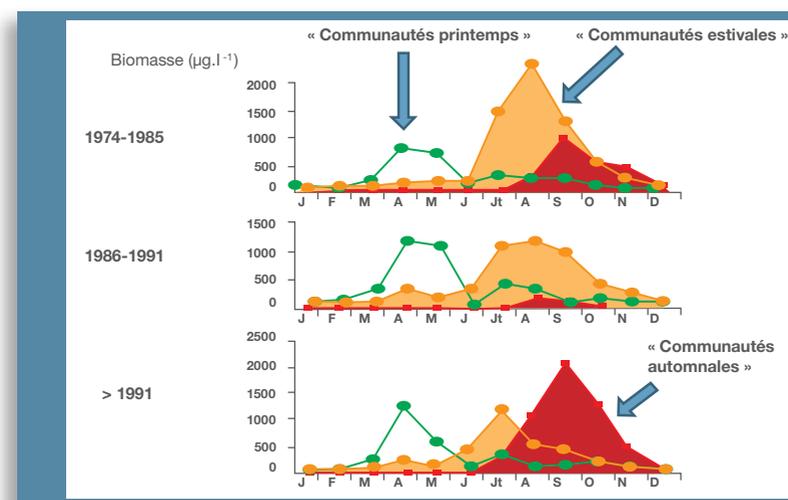
Cette démarche, malgré des niveaux d'incertitude importants, présente un intérêt qualitatif pour anticiper les faiblesses de ces écosystèmes et adapter les décisions de gestion en conséquence. En complément, un travail a été mené pour quantifier les services associés. Bien qu'incomplets, les résultats fournissent de premiers éléments de réflexion en vue d'une analyse des services écosystémiques des zones humides sous l'angle monétaire. ■

Léman, Annecy : deux écosystèmes suivis à la loupe

Le suivi exhaustif mené depuis 1974 sur le lac Léman (voir section 1.3) permet de bâtir une analyse globale des effets du changement climatique sur l'ensemble des chaînes trophiques de l'écosystème. De par sa superficie et sa profondeur importantes, le Léman possède en effet l'inertie thermique suffisante pour « enregistrer » le changement climatique : la température moyenne à 5 m sous sa surface a connu une élévation de plus de 1,5°C au cours des 40 dernières années. Ce réchauffement modifie la structure thermique du lac. La stratification intervient plus précocement dans l'année : aux alentours du 15 mai dans les années 2000, soit un mois plus tôt que dans les années 1970. Cela se traduit aussi par un moindre brassage des couches d'eau, et donc par une baisse de la concentration en oxygène dans les strates profondes. L'autre évolution majeure est liée à la concentration en phosphate : après une eutrophisation marquée entre 1960 et 1975, le lac connaît une réoligotrophisation sous l'effet de la mise en œuvre de la déphosphatation dans les stations d'épuration des eaux usées, et de l'interdiction du phosphate dans les lessives, en Suisse puis en France. Lors du séminaire, il a été montré (D. Gerdeaux, INRA) comment ces deux paramètres couplés (changement climatique et réoligotrophisation) influent sur l'ensemble des chaînes trophiques du lac, du phytoplancton aux peuplements piscicoles. Des changements temporels sont observés dans les successions d'assemblages planctoniques, comme le montre la figure 14.

Ces évolutions des assemblages planctoniques, véritable pompe biologique du lac, influent en cascade sur l'ensemble de sa biodiversité. Ainsi, ils induisent un meilleur ajustement trophique pour les larves de corégone (*Coregonus lavaretus*), lesquelles bénéficient également d'une moindre compétition avec d'autres espèces comme la perche ou le gardon. Cette évolution, amplifiée par l'effort d'alevinage et l'amélioration de la qualité de l'eau, est le moteur de la dynamique démographique de cette espèce, attestée par l'augmentation des captures : de l'ordre de 50 tonnes dans les années 1980, celles-ci atteignent aujourd'hui près de 400 tonnes annuelles. Si le corégone apparaît comme un « gagnant » du changement climatique, ce n'est pas le cas d'une autre espèce emblématique du lac, l'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*). Ce poisson nécessitant une eau très froide, dont les captures sont en repli marqué depuis une décennie, subit l'accroissement de la température dans les couches profondes du lac. Le maintien de l'espèce apparaît problématique à l'horizon 2070.

Figure 14. Changements dans les successions annuelles d'assemblages planctoniques du Léman, sous l'effet du changement climatique et de la réoligotrophisation.



Si la pêche du corégone (*Coregonus lavaretus*) sur le Léman se porte bien, en revanche celle de l'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*) a fortement décliné, l'espèce subissant les effets du changement climatique



4

Dégradation des habitats :

conséquences et solutions



© H. Jacquot - Onema

Indépendamment du climat, les pressions exercées sur les habitats aquatiques par les usages sociétaux (pollution, artificialisation, uniformisation, prélèvements d'eau, hydroélectricité...) affectent directement la faune et la flore. Les exemples sont multiples. Ainsi l'édification de seuils et de barrages contribue au réchauffement de l'eau et restreint la capacité de déplacement des espèces – notamment migratrices. L'endiguement des rivières se traduit par la régression des prairies inondées, qui accueillent entre autres le frai hivernal du brochet. L'assèchement des annexes fluviales prive de leurs habitats préférentiels nombre d'espèces de poissons, d'amphibiens ou d'invertébrés. Plus généralement, la variété et le bon état des habitats naturels conditionnent la biodiversité aquatique. Ainsi la Directive cadre sur l'eau a-t-elle fait de l'hydromorphologie – les caractéristiques physiques de la morphologie des milieux aquatiques – une composante à part entière de son programme d'évaluation de l'état des masses d'eau. Cette notion est désormais appuyée par des connaissances scientifiques solides et le suivi d'actions de restauration récentes.

Après une courte section consacrée aux pressions chimiques – thème majeur qui fait l'objet d'un séminaire national en 2013 et d'une publication à venir dans la collection «rencontres-synthèses» – cette quatrième partie est consacrée aux conséquences des dégradations physiques des habitats sur la biodiversité aquatique. Elle fournit un aperçu des recherches récentes menées en France sur les liens entre hydrologie et biodiversité aquatique, puis sur les impacts des seuils et barrages sur la biologie des espèces piscicoles. Elle présente ensuite les plans de gestion mis en œuvre pour deux espèces particulièrement touchées par les pressions hydromorphologiques : l'apron du Rhône et l'anguille européenne.

4.1 – La qualité de l'eau, condition nécessaire à la biodiversité aquatique

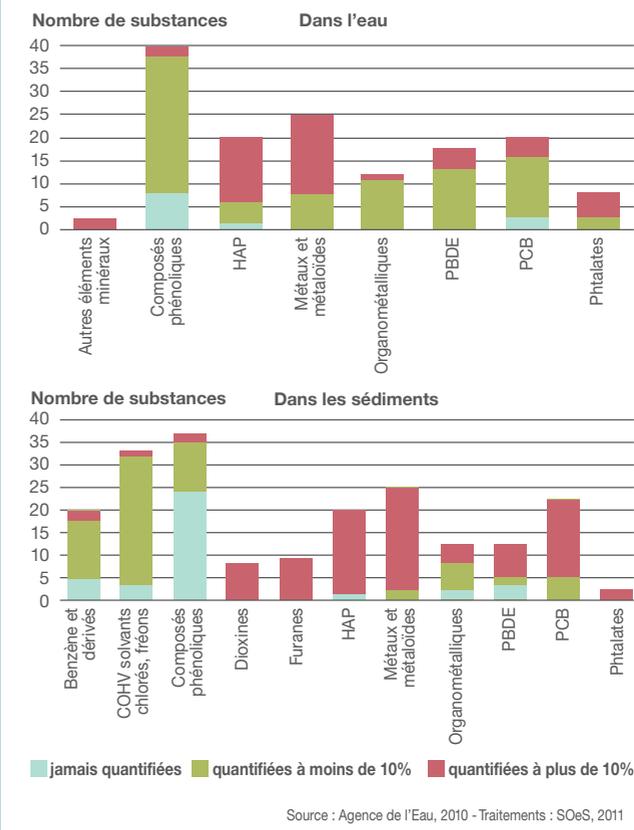
Au même titre que l'artificialisation des berges, les prélèvements de la ressource ou la fragmentation des cours d'eau par les ouvrages, la présence dans les eaux douces de polluants d'origine agricole ou industrielle constitue une dégradation majeure pour de nombreux habitats aquatiques, générant des impacts parfois dramatiques pour la biodiversité qu'ils abritent. Si les pollutions aigües, qui entraînaient encore dans les années 1970 ou 1980 des pics de mortalité piscicole spectaculaires sur les rivières, se font désormais plus rares en France, la pollution diffuse des masses d'eau superficielles se maintient à des niveaux inquiétants.

Pour son Bilan de présence des micropolluants dans les milieux aquatiques continentaux publié en 2009, le Commissariat général au développement durable a rassemblé les données pendant deux ans sur près de 950 substances différentes dont les effets toxiques sont avérés, même à de très faibles concentrations : pesticides, métaux et métalloïdes, hydrocarbures, poly-chlorobiphényles (PCB), polybromodiphényl(ethers) (PBDE), composés organiques halogénés et/ou volatils, dioxines et furanes,

phthalates... Il ressort de ce bilan une contamination quasi-généralisée des milieux aquatiques français. Des pesticides ont été détectés dans 91 % des points de suivi de la qualité des cours d'eau français, 21 % des points de suivi des cours d'eau enregistrent une concentration totale en pesticides supérieure à 0,5 µg/l. Pour les contaminants autres que les pesticides, 22 familles de micropolluants ont été suivies en métropole. Parmi les 17 familles les plus recherchées, 8 familles différentes pour l'eau et 11 pour les sédiments présentent des substances quantifiées sur plus de 10 % des analyses (Figure 15).

La compréhension du devenir de ces polluants dans les milieux aquatiques, de leur transfert dans les chaînes trophiques et de leurs impacts sur la biodiversité est un enjeu de recherche essentiel. L'Onema consacre en juin 2013 un séminaire national à cette thématique, dont les apports seront publiés dans la collection «Rencontres-synthèses». Deux contributions scientifiques centrées sur les pressions chimiques ont également été présentées lors du séminaire «biodiversité aquatique», et font l'objet de cette section.

Figure 15.
Nombre de substances quantifiées dans plus de 10% des analyses, par famille de micropolluants hors pesticides, dans les cours d'eau de métropole.



Réponses de la biodiversité à la levée d'une pression chimique : le cas du Vistre

Comment les communautés biologiques répondent-elles à l'amélioration de l'état chimique de l'eau ? Des éléments de réponse ont été apportés par une étude de cas (V. Archaimbault et E. Arce, Irstea) menée sur les invertébrés benthiques du Vistre (Gard). Ce petit cours d'eau, fortement canalisé depuis le 17^e siècle, pâtit d'une qualité chimique médiocre en raison notam-

ment des rejets diffus d'une dizaine de stations d'épuration (STEP). Afin de réduire les apports, notamment en azote et phosphore, dans le Vistre, une nouvelle STEP a été mise en service en 2007 pour traiter les effluents de la ville de Nîmes. Son rejet se situe 1 km en aval de l'exutoire de l'ancienne STEP de Nîmes fermée en 2007.

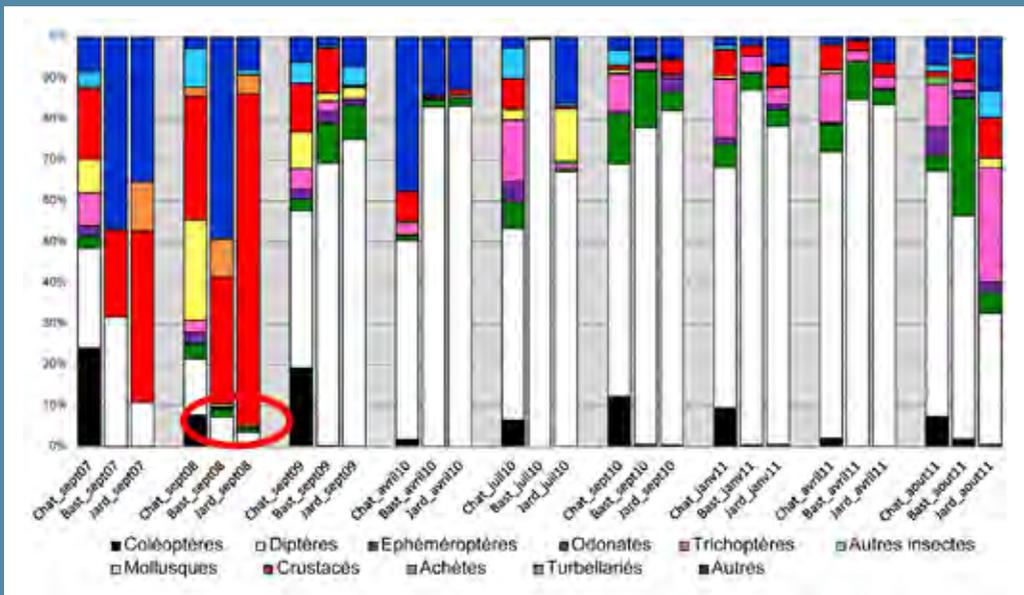
L'étude a été menée de 2007 à 2011 sur 3 stations : Château, située en amont des rejets et faisant office de témoin, Bastide, située en aval

de l'ancien rejet et Jardins, située en aval du nouveau rejet de STEP. Un suivi physico-chimique a été mené tous les deux mois sur les trois stations. En parallèle, une série d'échantillonnages faunistiques a été réalisée selon le protocole XP-T 90 333, pour les trois stations.

Le déplacement de la station d'épuration s'est traduit par une amélioration nette et rapide de la qualité chimique de l'eau : en quelques mois les paramètres (ammonium, phosphore total, nitrites et nitrates notamment) étaient revenus à des

valeurs comparables à celles existant sur le secteur amont. La réponse des communautés benthiques montre des évolutions très significatives en termes d'abondance, de richesse et de diversité : les populations recupèrent rapidement, sans toutefois retrouver les niveaux de la station témoin – ce qui suggère que le retour à l'équilibre d'une communauté après la levée d'une pression chimique peut nécessiter un délai supérieur à trois ans. Le suivi des compositions faunistiques livre d'autres enseignements.

Figure 16. Évolution de la composition taxonomique (invertébrés benthiques) pour les trois stations étudiées.



La présence de certaines espèces dont le stade larvaire est aquatique (ici un éphéméroptère au stade adulte) témoigne de la qualité du milieu

Un an après le déplacement de la station d'épuration, les crustacés jusque-là dominants ont disparu au profit des diptères. Les mollusques et les éphéméroptères sont les premiers à se réimplanter, suivis des trichoptères, odonates et turbellariés. Les coléoptères semblent avoir beaucoup de difficultés à s'installer, tandis que les plécoptères restent absents. Globalement, les taxons sensibles réapparaissent potentiellement très vite, mais leur maintien à des effectifs importants nécessite du temps. L'évolution des communautés aval à partir de 2010, avec davantage de taxons sensibles aux

matières organiques et aux nutriments, confirme une récupération progressive du milieu.

Cette étude met en évidence les effets bénéfiques de l'amélioration du traitement des effluents urbains sur les communautés d'invertébrés. Néanmoins, dans un contexte comme celui du Vistre, fortement perturbé sur la majeure partie de son linéaire, les actions de restauration devraient être pensées à une échelle plus large et intégrer non seulement des actions sur la qualité chimique de l'eau mais également sur l'habitat physique.

Mortalité de poissons sur la Loue : quelles hypothèses explicatives ?

La rivière Loue, affluent du Doubs et haut-lieu de la pêche à la mouche, est devenue en quelques années un cours d'eau emblématique des dégradations portées aux milieux aquatiques à l'ère du changement global. Des mortalités exceptionnelles de poissons (en particulier truites communes et ombres), constatées en 2010 et 2011 sur plusieurs tronçons du linéaire, ont suscité une forte mobilisation des associations et des populations locales, et conduit à la création, à la demande du Préfet du Doubs, d'un groupe d'experts national placé sous la responsabilité de l'Onema. Constitué de onze membres et présidé par Jean-François Humbert (INRA), ce groupe avait pour mission d'expliquer les mortalités de poissons et leurs liens éventuels avec le développement de cyanobactéries toxiques, observé dans le même temps sur le fond de la rivière. Les résultats de ses travaux ont été rendus publics en mars 2012 sous la forme d'un rapport détaillé (disponible sur le site de l'Onema <http://www.onema.fr/rendu-du-rapport-d-expertise-sur-la-loue>) et présentés lors du séminaire «biodiversité aquatique».

Les experts ont travaillé une année durant à partir des publications scientifiques existantes sur la question et des données communiquées par diverses sources (dont l'agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse), en relation avec un groupe de travail local. Ils sont d'abord parvenus à la conclusion (J-F. Humbert, INRA) qu'aucun lien direct ne pouvait être établi entre les mortalités piscicoles et la présence des cyanobactéries toxiques.

En l'absence de cause aigüe de mortalité clairement identifiée (polluants ou agents pathogènes), les experts ont adopté une nouvelle hypothèse de travail, selon laquelle les mortalités piscicoles et les proliférations de cyanobactéries sont deux manifestations extrêmes d'un dysfonctionnement récurrent de la rivière. Ils se sont alors attachés à caractériser l'état de la rivière et de son bassin versant et à rechercher les causes de ces dysfonctionnements, dans un contexte où de nombreux paramètres (notamment les concentrations en micropolluants d'origine agricole ou issus des activités de traitement du bois) sont très mal documentés, faute de suivis adaptés.

Il ressort de cette analyse que la Loue comporte de nombreux aménagements (petits barrages,

seuils...) qui ralentissent la rivière, contribuent au réchauffement de l'eau et induisent une discontinuité écologique au sein du cours d'eau. Par ailleurs, des biomasses importantes d'algues benthiques et de plantes aquatiques sont observées en de nombreuses zones, ce qui traduit une disponibilité importante en nutriments (phosphore et azote en particulier). Cette importante production de biomasse organique entraîne des altérations des

habitats et localement des anoxies temporaires, conduisant à une perte de biodiversité dans les communautés de producteurs primaires et à des perturbations dans les réseaux trophiques. C'est ainsi qu'il a été constaté une diminution des abondances et de la richesse des communautés d'invertébrés benthiques et de poissons, et des déplacements typologiques avec des espèces de l'aval venant prendre la place de celles localisées en amont.

Saurez-vous retrouver les deux truites perdues au milieu de cette surabondance d'algues benthiques sur la Loue ?



© J.F. Humbert - INRA

Pour expliquer ces modifications physico-chimiques et biologiques, le groupe de travail a caractérisé l'évolution des pressions anthropiques s'exerçant sur le bassin versant de la Loue. Celui-ci a connu, au cours des dernières décennies, un fort accroissement démographique qui a entraîné une hausse des rejets domestiques (notamment du phosphore, des polluants type HAP, mais aussi probablement des médicaments). Le développement de la production laitière et les changements survenus dans les pratiques agricoles se sont traduits par des rejets accrus en azote – et sans doute en pesticides. Enfin, l'essor de l'industrie du bois s'est également accompagné d'une utilisation importante d'insecticides et de fongicides. L'impact de ces pressions chimiques est sans doute d'autant plus importantes que le bassin versant, de nature karstique, est caractérisé par une faible épaisseur des sols et par la présence de dolines qui favorisent le transfert rapide des polluants de la surface vers les réseaux d'aquifères, puis la rivière.

Au final, le dysfonctionnement de l'écosystème apparaît comme le produit d'un faisceau de causes multifactorielles, dans lequel les activités anthropiques locales jouent un rôle prépondérant. En conclusion de son rapport, le groupe de travail a proposé un ensemble de recommandations opérationnelles, de suivi et de

politique scientifique. Au plan opérationnel, il plaide notamment pour une identification rapide des principales sources locales de phosphore et de nitrates dans le bassin versant en vue d'un meilleur contrôle des flux de nutriments dans la rivière. Il recommande également un encadrement plus exigeant des activités humaines polluantes, au regard de la vulnérabilité particulière du bassin versant. Enfin, il demande à ce qu'une plus grande continuité écologique soit redonnée à la rivière par l'arasement de certains seuils et barrages. En termes de suivi physico-chimique, le groupe suggère la création d'un conseil scientifique qui aura pour charge de coordonner l'ensemble des suivis réalisés sur la Loue dans le but de remédier à la faible qualité et à l'hétérogénéité des données disponibles actuellement.

Enfin, au plan scientifique, il identifie quelques pistes de recherches prioritaires pour progresser dans la compréhension du fonctionnement actuel de la Loue, visant notamment à une meilleure connaissance :

- des pressions toxicologiques s'exerçant sur la rivière et de leurs impacts sur les organismes qu'elle héberge ;
- des modifications intervenant dans le fonctionnement du système karstique ;
- du déterminisme des proliférations de cyanobactéries et de leur toxicité.

4.2 – Régime de débit et peuplements piscicoles

L'eau douce, matrice de la biodiversité aquatique, est aussi une ressource vitale pour les sociétés humaines. En France, la quantité totale d'eau prélevée s'élevait en 2006 à 32,6 milliards de m³ (en grande majorité issus des masses d'eau superficielles), parmi lesquels 5,75 milliards ne retournent pas au milieu naturel. Cette part consommée est utilisée à 49% pour l'irrigation, 24% pour l'eau potable, 23% pour la production d'énergie et 4% pour l'industrie (Ministère en charge de l'écologie, 2007). Il est largement admis que les évolutions

climatiques et surtout socio-économiques à venir (croissance démographique, modifications de l'occupation des sols) devraient conduire à une augmentation globale de ces prélèvements. Dans une optique de préservation de la biodiversité aquatique, cette pression sur la ressource constitue une problématique majeure : le régime hydrologique d'un cours d'eau (les variations de son débit) façonne sa morphologie, donc les habitats naturels qui s'y développent et les communautés végétales et animales qu'il abrite.

Quarante neuf pour-cent de l'eau prélevée au milieu naturel est consommée pour l'irrigation



© M. Bramard - Onema

Les liens entre hydrologie et biologie font l'objet d'un effort de recherche croissant depuis quinze ans. Au-delà du concept de « débit minimal biologique », instauré en France par la loi « Pêche » de 1984, les travaux scientifiques mettent en évidence la nécessité de maintenir un régime de débit annuel pour préserver les équilibres naturels (Naiman *et al.*, 2002). Des variables-clés ont été proposées pour définir ce régime de débit (Poff *et al.*, 1997) : les valeurs de débit à un instant donné, les fréquences de retour de certains événements, les durées de certaines valeurs de débits, la prévisibilité des événements, la stabilité.

À la suite de ces travaux, l'Onema étudie dans le cadre du volet « hydromorphologie » de la DCE les

liens entre régimes hydrologiques et biodiversité. Des exemples quantitatifs, issus de différents programmes de recherche, ont été présentés lors du séminaire (Ph Baran, Onema, B. Bergerot, HEPIA) pour illustrer ces liens. L'hydrologie de crue a par exemple des effets marqués sur les migrateurs – comme cela a déjà été souligné en section 1.3 pour les saumons et truites de mer de la Bresle. Les suivis réalisés sur l'Allier, entre Vichy et Poutès, confirment que des forts débits printaniers ou automnaux favorisent la remontée du saumon. Dans le cas de l'anguille, les suivis réalisés sur un cours d'eau vendéen (voir aussi section 4.4) révèlent des passages de civelles et d'anguillettes beaucoup plus importants en nombre lorsque les hydrologies printanières et esti-



© N. Poulet - Onema

Les crues sont un phénomène naturel, indispensable au bon fonctionnement des cours d'eau

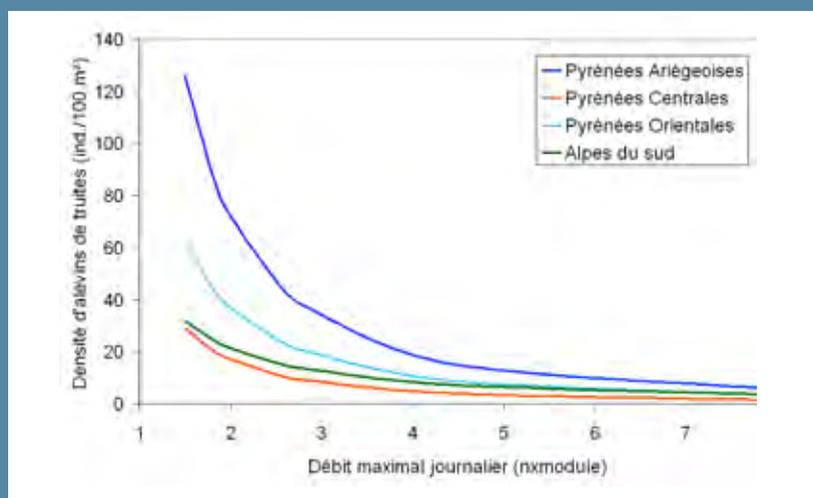
vales sont plus soutenues. Il existe aussi une relation étroite entre le recrutement en alevins de truite commune et l'hydrologie de crue : schématiquement, la densité de juvéniles chute lorsque les débits de crue, au moment de l'émergence des alevins des frayères, sont supérieurs à cinq fois le module de la rivière (son débit moyen interannuel). Mais cette relation est d'amplitude variable selon les régions, comme le montre la Figure 17.

visant à relier caractéristiques hydrologiques et biodiversité, par croisement des données issues des inventaires piscicoles (10 893 stations de pêche bancarisées dans la BDMAP) et de la banque HYDRO, qui rassemble 4 827 stations de mesure de l'hydrologie en France métropolitaine. Une sélection drastique a été menée. Seules les sessions de pêche menées sur une station où existait au moins quatre années de suivi piscicole étaient présélectionnées. Les données hydrologiques correspondantes devaient provenir d'une station suivie depuis au moins vingt ans. Les lieux des sessions de pêche et des relevés hydrologiques ne devaient être séparés ni par un obstacle ni par un affluent. Au final, 127 couples de stations poisson/hydrologie ont été retenus pour mener cette analyse en France métropolitaine. Elle permettra de préciser les exigences liées à l'hydrologie pour la détermination de mesures opérationnelles de restauration, dans une concertation à l'échelle du bassin versant.

De même, l'hydrologie d'étiage influence sur certains peuplements piscicoles notamment dans la zone à truite aval. Une réduction du QMNA (débit mensuel d'étiage atteint pour une année donnée) d'un facteur de 2,5 entraîne une réduction de la biomasse de truite commune, d'un facteur de 2 à 6 selon les régions. En revanche, les effectifs de loche franche ou de vairon s'accroissent lorsque le débit d'étiage se réduit.

L'HEPIA et l'Onema s'orientent maintenant vers une analyse à large échelle

Figure 17. Influence des crues sur le recrutement des truites, un effet régionalisé



4.3 – Seuils, barrages et fractionnement des habitats : l'apport de la génétique

Sur un cours d'eau donné, le maintien d'un régime hydrologique approprié est une condition essentielle mais parfois insuffisante pour en préserver la biodiversité. Les seuils, ouvrages et barrages implantés sur un cours d'eau sont susceptibles d'altérer profondément son fonctionnement et son régime thermique.

En France, on dénombre environ 550 grands barrages, 2 500 à 3 000 ouvrages hydroélectriques, et plus de 50 000 seuils. Rompant la continuité écologique de l'écoulement, ils fragmentent les habitats et entravent les déplacements des es-

pèces aquatiques. C'est le cas bien sûr pour les poissons migrateurs (la situation de l'anguille fait l'objet de la section 4.5), mais aussi pour toutes les espèces d'eau douce, dont les populations peuvent se trouver isolées, et donc fragilisées, par la présence des obstacles – à l'image de l'apron du Rhône (évoqué en section 4.4). Pour quantifier ces impacts sur les peuplements piscicoles, une approche *in situ* pertinente consiste à mesurer indirectement, par des outils moléculaires, les flux d'individus au sein d'une même espèce : ces flux peuvent être minorés en présence d'obstacles entravant le mouvement des poissons.

Un seuil de moulin peut avoir un effet non négligeable sur l'isolement d'une population piscicole

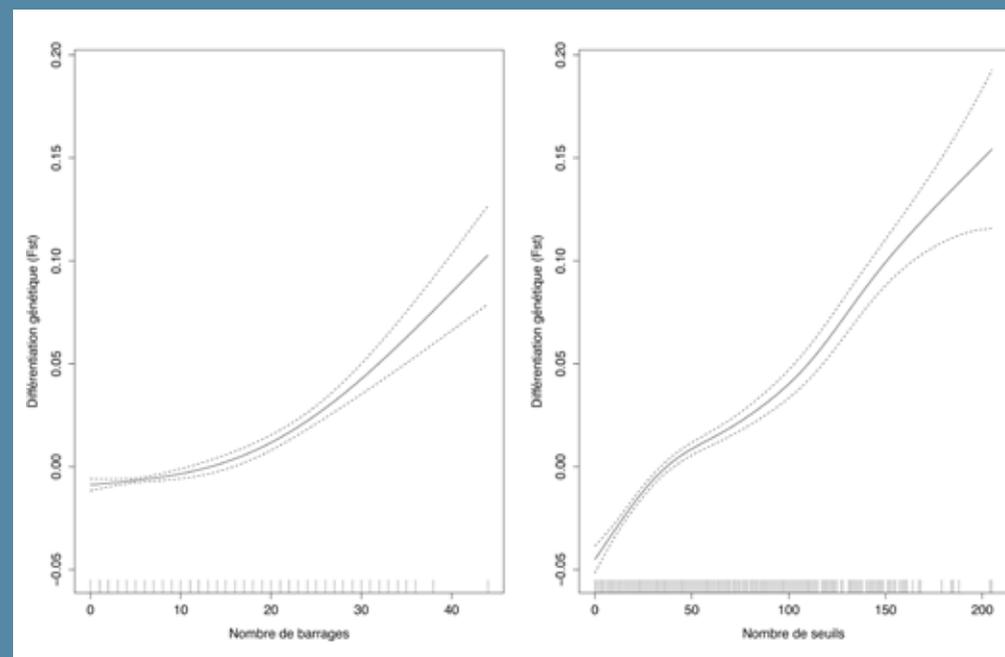


Cette approche a été mise en œuvre par une équipe scientifique (Simon Blanchet, Géraldine Loot, Vincent Dubut, Ivan Paz-Vinas, Charlotte Veysières CNRS) sur des cours d'eau du Sud-Ouest de la France en utilisant le chevesne et le goujon comme modèles biologiques. Une analyse globale a d'abord été menée à l'échelle du bassin versant de la Garonne. À partir de spécimens issus de plus de 90 sites d'échantillonnage, deux métriques génétiques ont été calculées pour chaque espèce et chaque paire de sites : la différenciation génétique, qui caractérise la dispersion à long terme (plus de 10 générations) des populations, et le nombre de dispersants,

qui caractérise une dispersion à court terme (moins de deux générations).

Les résultats ont été analysés au regard du nombre de barrages ($H > 3$ m) et de seuils ($H < 3$ m) qui séparent chaque paire de site. Ils confirment un impact marqué du nombre de barrages et de seuils sur la différenciation génétique des deux espèces (Figure 18). La différenciation génétique entre deux sites augmente linéairement avec le nombre cumulé de barrages et/ou de seuils entre ces deux sites : cela indique que les flux d'individus est d'autant plus faible que le nombre d'obstacles entre deux sites augmentent.

Figure 18. Influence du nombre d'obstacles sur l'indice de différenciation génétique du chevesne. À g. : barrages, à d. : seuils.



À court terme, les résultats diffèrent selon l'espèce. Aucun impact n'est observé sur le nombre de dispersants chez le chevesne, tandis que le nombre de seuils a un effet notable sur ce paramètre chez le goujon : l'explication d'un tel résultat requiert une étude approfondie sur le comportement des espèces et leurs stratégies biodémographiques.

Une seconde phase de l'étude s'est attachée à mesurer l'effet individuel des obstacles, sur deux petits cours d'eau du même bassin versant : le Célé et le Viaur, où ont été étudiés respectivement 20 et 16 obstacles. Les espèces étudiées étaient cette fois le goujon et le vairon. Des échantillonnages ont été menés directement à l'amont et à l'aval de chaque obstacle. Ceux-ci étaient caractérisés par quatre paramètres : hauteur, pente, tirant d'eau et distance à la source. L'équipe a mesuré la connectivité des populations entre chaque paire de sites encadrant un obstacle, au moyen de quatre indices moléculaires (dont l'indice de différenciation évoqué ci-dessus). L'analyse synthétique de ces indices livre un constat étonnant pour le Célé : la connectivité est d'autant plus mauvaise que les obstacles sont situés dans les zones amont du linéaire. Les résultats sont plus intuitifs pour le Viaur, où le paramètre déterminant est la hauteur de l'obstacle.

De manière générale, cette étude confirme l'intérêt des outils moléculaires pour quantifier les impacts des obstacles sur la dispersion des populations, et donc pour identifier les ouvrages les plus préjudiciables dans une optique de priorisation des actions de gestion. Elle rappelle aussi que chaque rivière a ses caractéristiques propres, qui rendent difficile la généralisation des diagnostics réalisés localement. Des développements ultérieurs pourraient permettre d'affiner les indices de connectivité, et notamment permettre une utilisation de ces approches pour suivre l'efficacité d'actions de restauration.

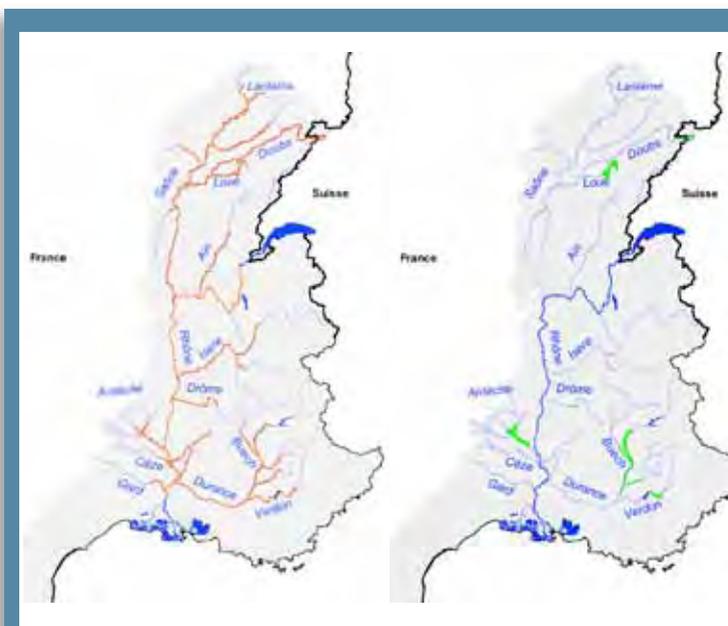
4.4 – Préservation de l'apron du Rhône : des résultats modestes mais encourageants

Le cas de l'apron du Rhône (*Zingel asper*) est emblématique des impacts de la dégradation des habitats naturels sur la biodiversité aquatique. Aussi appelé « sorcier », ce poisson endémique figure parmi les espèces en danger critique d'extinction sur la liste rouge de l'UICN. Présent au début du XX^e siècle sur environ 2 000 km de linéaire dans le bassin du Rhône, il n'est plus signalé aujourd'hui que sur quelques tronçons dans le Doubs suisse, la Loue, l'Ardèche, la Drôme, la Durance ou le Verdon (Figure 19). Les causes de son déclin sont connues : ce nageur médiocre, doté d'une faible fécondité, exige des habitats à morphologie naturelle, une

eau propre et claire et une température inférieure à 30°C. Il est particulièrement affecté par les ouvrages qui fragmentent son habitat et la baisse des débits d'étiage, auxquels s'ajoutent les pollutions et l'extraction de granulats qui troublent l'eau des rivières.

L'espèce fait l'objet de plans d'actions depuis 1994 : d'abord par la direction régionale de l'environnement (DIREN) Rhône-Alpes, puis dans le cadre des projets Life Nature 1 et 2 avec le soutien de l'Onema. Un bilan de ces actions a été dressé (P. Roche, Onema) lors du séminaire. La restauration de la continuité écologique y tient une bonne place. Le

Figure 19.
Aires de répartition de l'apron au début du XX^e siècle (à g.) et aujourd'hui (à d.)





© M. Bejean

L'apron du Rhône, espèce que l'on ne trouve qu'en France, est en danger critique d'extinction selon l'UICN

barrage de Saillans, sur la Drôme, a été supprimé dès 1994, comme plus tard ceux de Serre, sur le Buëch, ou de Sainte Tulle, sur l'Ardèche. Sept passes à poissons ont été installées sur l'Ardèche, la Drôme et la Loue. Ces efforts se traduisent aujourd'hui par des résultats concrets. Ces dernières années, l'apron a recolonisé plusieurs kilomètres du linéaire ardéchois, à l'amont et à l'aval de Lanas. Dans la passe à poissons de Quingey, sur la Loue, il est la seconde espèce la plus fréquemment observée. Des accroissements démographiques sont aussi attestés sur le Buëch.

Ces signes encourageants valident les progrès accomplis dans la restauration de l'hydromorphologie et de la qualité de l'eau, qui ont rendu

possible des opérations de réintroduction ou de translocation d'individus. C'est le cas de l'opération Drôme, proposée en 2001 : cette rivière, où l'apron avait quasiment disparu malgré des conditions à nouveau favorables, a bénéficié de l'apport d'individus de la Durance en 2006, puis de l'introduction d'alevins de souche ardéchoise, obtenus par reproduction ex situ au Muséum de Besançon depuis 2008. D'autres alevins, issus de reproducteurs de la Durance cette fois, sont annoncés en 2013.

Le « sorcier » du Rhône est toujours en vie, et les gestionnaires disposent encore de leviers pour améliorer sa situation : poursuite des actions de décloisonnement, limitation des micro-seuils de baignade et de canoë,

accroissement de la recharge sédimentaire. Mais de sérieuses inquiétudes subsistent : certaines populations isolées sont menacées à terme par leur trop faible diversité génétique, d'autres par la montée des

températures estivales, en l'absence d'accès aux tronçons plus amont. Les efforts de repeuplement et de soutien aux populations doivent intégrer cette double contrainte pour utiliser au mieux les moyens disponibles.

4.5 – Anguille européenne : 18 actions de R&D pour réduire l'impact des ouvrages

Autrefois très répandue dans la quasi-totalité des milieux aquatiques européens, l'anguille connaît depuis quelques décennies un déclin rapide. Elle est désormais classée par l'UICN, à l'instar de l'apron du Rhône, parmi les quatre espèces de poissons en danger critique d'extinction sur le territoire métropolitain. Cette situation alarmante résulte d'un ensemble de causes anthropiques. Victime de la pollution des eaux et des sédiments, de la surpêche et du braconnage, cette espèce migratrice au cycle de vie complexe est aussi particulièrement impactée par l'artificialisation des habitats et les obstacles à l'écoulement. Lors de la migration de montaison, les civelles puis les jeunes anguilles jaunes sont confrontées, dès la zone soumise à marée, à une grande variété d'ouvrages qui restreignent son accès aux habitats situés en amont : écluses, portes à flots, vannes... Plus loin, les grands barrages consti-

tuent d'autres obstacles difficilement franchissables. Et au terme de sa vie, lorsque l'anguille devenue « argentée » entreprend la migration de dévalaison pour retourner frayer en mer des Sargasses, elle doit à nouveau franchir ces obstacles : une part significative des reproductrices transitent notamment dans les turbines hydroélectriques, s'exposant à des blessures mortelles.

L'espèce fait l'objet depuis 2007 d'une politique de protection volontariste à l'échelle européenne (règlement européen CE n°1100/2007), qui s'est traduite en France par l'adoption d'un plan de gestion visant notamment à assurer un taux d'échappement vers la mer d'au moins 40% de la biomasse d'anguilles argentées qui existerait en l'absence de toute pression anthropique.



Alors qu'elle abondait dans la plupart des rivières et marais de France au début du siècle dernier, l'anguille a vu son recrutement chuter de plus de 95%

Cet objectif a conduit le Ministère en charge de l'écologie à mettre en œuvre un programme de R&D pour limiter les impacts des ouvrages transversaux : un ensemble de 18 actions de recherche complémentaires a été mené dans le cadre d'un accord de partenariat réunissant l'Onema, l'ADEME et cinq producteurs d'hydroélectricité.

Trois années durant, cet effort de recherche sans précédent a permis d'acquérir des connaissances nouvelles sur l'écologie de l'anguille, de la cinétique de montaison des

civelles aux paramètres environnementaux et hydrologiques qui déclenchent le retour des argentées vers l'aval (L. Beaulaton, Onema). Un large panel d'options techniques a été identifié et testé pour quantifier les impacts et optimiser la conception des ouvrages : solutions d'admission d'eau salée pour les portes à flots, dimensionnement des passes à brosses pour favoriser le franchissement des barrages par les anguillettes, dispositifs de comptage à résistivité pour en mesurer l'efficacité... À la dévalaison, des suivis de reproductrices par transpondeurs

ont permis de comprendre leur comportement au droit des ouvrages et d'estimer la part des animaux qui transitent par les turbines – dont les impacts ont été évalués *in situ* pour différents modèles. Des études ont permis le dimensionnement de grilles empêchant l'accès des poissons aux turbines, et le calcul de leurs impacts sur la production électrique ; d'autres ont porté sur le dimensionnement de turbines ichtyophiles et la validation *in situ* de leurs performances. En complément des études menées à l'échelle d'un ouvrage, le programme R&D a également analysé, modèles à l'appui, les impacts à l'échelle d'un axe de cours d'eau. Ces avancées ont jeté les bases d'une analyse technique et économique en vue d'une gestion adaptée du turbinage, incluant des arrêts ciblés de production lors des pics de dévalaison.

L'ensemble de ces travaux et résultats est présenté en détail dans l'ouvrage « Plan de sauvegarde de l'anguille - optimiser la conception et la gestion des ouvrages », paru en 2012 dans la collection Rencontres-Synthèses. De leur appropriation par les gestionnaires et acteurs économiques dépend la mise en œuvre des solutions adaptées qui contribueront, aux différentes échelles de gestion, à l'atteinte des objectifs fixés par le plan de sauvegarde de l'anguille. ■



L'apport des documents historiques pour comprendre la biodiversité

Alors que l'intérêt de replacer les évolutions de la biodiversité dans des dynamiques de long terme est largement reconnu par la communauté scientifique, la plupart des travaux actuels envisagent au mieux des périodes de quelques décennies. L'exploitation de documents historiques, lorsqu'ils existent, peut constituer une source d'informations précieuses pour étendre l'horizon temporel des analyses menées sur les liens entre biodiversité et pressions anthropiques.

Une telle approche a été développée par Irstea avec l'appui de l'Onema dans le cas des populations piscicoles du bassin de la Seine (S. Beslagic, Irstea). L'équipe a collecté un ensemble de documents provenant d'écrits de naturalistes et d'érudits de la fin du XIX^e et du début du XX^e siècles, ainsi que des archives des ministères de l'Agriculture et des Travaux publics produites par les ingénieurs des Ponts et Chaussées ou les conservateurs des Eaux et Forêts.

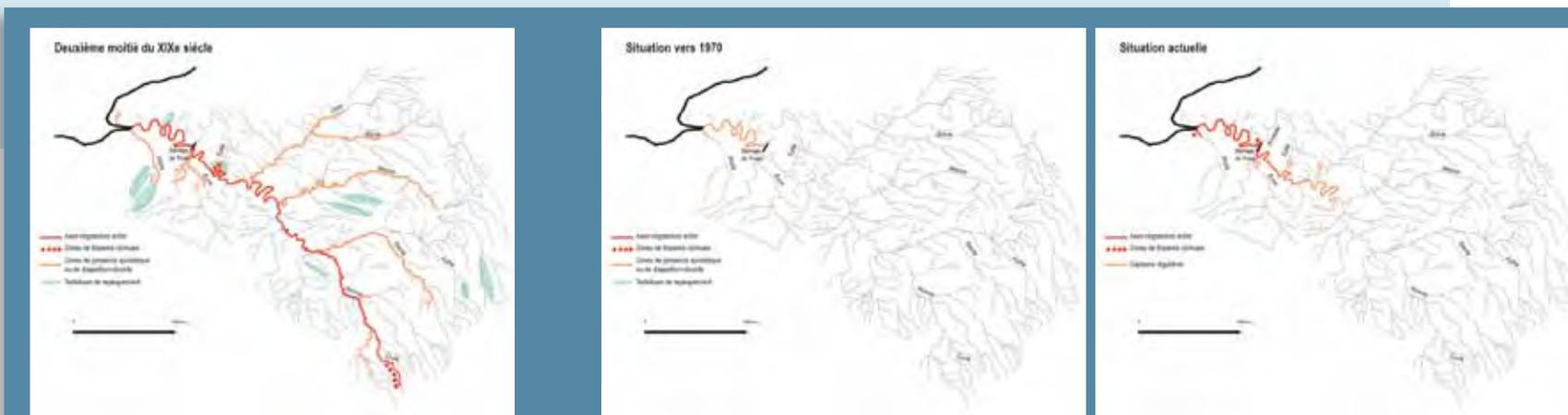
Après traitement, cette ressource documentaire représente une somme de 4 317 observations (présence ou absence) sur une localité et une période données. En vue de l'analyse de ces informations, une base de données baptisée CHIPS (Catalogue historique des poissons de la Seine) a été créée. Pour chaque enregistrement, elle renseigne le nom du taxon, le nom et la catégorie d'eau (rivière, canal, plan d'eau), son emplacement géographique et la date de l'observation. Selon disponibilité, des données complémentaires sont bancarisées : abondance de l'espèce, introduction ou repeuplement, disparition, biométrie, état sanitaire... Le type d'observation (directe, témoignage, enquête...) permet d'estimer la qualité de l'information. Au total, CHIPS comprend des informations sur 211 cours d'eau (ainsi qu'une vingtaine de canaux) ; 58 taxons ont été identifiés, auxquels s'ajoutent quelques écrevisses. Une première exploitation de cet outil a permis de reconstituer les aires de répartition historique pour certaines espèces comme le saumon en Figure 20.

L'équipe a également identifié 18 tronçons de cours d'eau pour lesquels les informations historiques (1840-1970) fournissent une liste « exhaustive » des espèces et des indications sur leur abondance. Complétées par les données de pêche électrique récentes, ces informations permettent de reconstituer la composition des peuplements à différentes périodes, et donc la trajectoire temporelle des peuplements sur ces tronçons.

L'analyse de ces trajectoires montre notamment que les modifications dans la structure des peuplements sur le long terme sont bien plus importantes que celles constatées à court terme sur la période récente. Ainsi, l'essor des espèces rhéophiles (poissons de courant) apparaît comme une tendance significative sur le long terme. Ce constat peut être relié aux évolutions de l'hydromorphologie – en particulier la suppression de nombreux étangs au cours de la période étudiée.

Au final, la prise en compte de ces données historiques, dans une analyse à long terme des liens entre biodiversité et pressions anthropiques et/ou hydro-climatiques, est un apport pertinent pour de nombreuses questions écologiques. Elle contribue notamment à une meilleure connaissance des espèces patrimoniales et des mécanismes de colonisation des espèces non natives, et à affiner la notion d'« état de référence » – à l'image de la méthodologie de la liste rouge UICN, dont les critères intègrent l'évolution de l'aire de répartition depuis le XVIII^e siècle. Un élargissement de la fenêtre temporelle de telles approches apparaît possible, jusqu'à la prise en compte de données archéologiques. L'équipe plaide également pour la transposition de la démarche à d'autres bassins versants, lorsque les données sont disponibles.

Figure 20.
Évolution de la répartition du saumon dans le bassin versant de la Seine - à la deuxième moitié du XIX^e siècle, en 1970 et aujourd'hui.





À la fois composante et conséquence du changement global, les espèces exotiques envahissantes, aussi appelées espèces invasives, se sont imposées en quelques décennies comme une préoccupation majeure pour les gestionnaires des milieux aquatiques. Des végétaux comme les jussies ou les myriophylles, venus d'Asie, d'Afrique ou d'Amérique, colonisent de nombreux cours d'eau européens, au point parfois d'en altérer totalement les équilibres écologiques. L'écrevisse de Californie (entre autres), importée en Europe à des fins commerciales, exerce une forte pression en tant que compétitrice et surtout vecteur de pathogènes sur les espèces autochtones, dont plusieurs sont menacées d'extinction. L'écrevisse de Louisiane quant à elle modifie profondément le fonctionnement des écosystèmes qu'elle envahit. Des poissons exotiques comme le pseudorasbora ou l'épirine, ont fait leur apparition dans les rivières, canaux et plans d'eau européens, et peuvent s'y développer jusqu'à proliférer (voir section 1.2).

Comment évaluer l'impact écologique d'un végétal ou d'un animal donné sur les milieux qu'il colonise ? Dans quelle mesure représente-t-il une pression pour la biodiversité aquatique ? Quelles actions de gestion faut-il mettre en œuvre pour limiter cette pression, et à quel coût économique ? Chaque espèce pose un problème différent ; les réponses à ces questions sont multiples et souvent controversées. Cette dernière partie livre quelques observations, outils et réflexions pour éclairer l'analyse.

5.1 – Le GT-IBMA : un outil de concertation et d'action à l'échelle nationale

Face à la complexité des problématiques de gestion posées par les invasions biologiques en milieu aquatique, les gestionnaires expriment le besoin d'un appui scientifique, technique et réglementaire. En réponse à cette attente, suite à une proposition du Cemagref (devenu Irstea depuis), l'Onema a impulsé en 2008 la création d'un groupe de travail dédié.

E. Mazaubert et A. Dutartre (Irstea) présentent le GT-IBMA (Groupe de travail sur les invasions biologiques en milieu aquatique), dont les travaux ont commencé en 2009, réunit en son sein

des compétences très variées : des gestionnaires (Parcs naturels régionaux, Agences de l'eau, ONCFS...) et des porteurs d'enjeux (FNPF, Ministère en charge de l'agriculture...) assurent le partage des expériences, questions et difficultés rencontrées sur le terrain ; des acteurs institutionnels (MEDDE, collectivités territoriales...) assurent le lien entre les activités du groupe et les enjeux nationaux et européens ; enfin des membres de conservatoires botaniques et d'instituts de recherche (Irstea, INRA, CNRS, MNHN...) apportent leur expertise et leurs connaissances scientifiques.

Certaines espèces exotiques peuvent se révéler particulièrement envahissantes à l'image de la laitue d'eau (Pistia stratiotes)



© A. Dutartre - Irstea

Fort de cette diversité de points de vue, le GT-IBMA s'emploie à définir à l'échelle nationale des lignes de conduite pour la gestion des invasions biologiques en milieu aquatique, à contribuer au développement d'outils opérationnels à destination des gestionnaires et à définir les orientations de politique scientifique sur le sujet. Il mène une nécessaire action d'appui et de coordination entre les travaux menés à différents niveaux : à l'échelle communautaire, où une « stratégie européenne relative aux espèces envahissantes » est à l'étude ; en France, où les pouvoirs publics ont publié une Stratégie nationale sur les espèces exotiques envahissantes - poursuite de l'élaboration de la réglementation, renforcement des actions de lutte et sensibilisation du public - et enfin, aux niveaux territoriaux, où opèrent divers groupes de travail et structures impliqués dans la gestion des espèces.

Les travaux engagés par le GT-IBMA, en collaboration avec les coordinateurs techniques du Ministère de l'Ecologie chargés de la mise en œuvre de la stratégie nationale, visent à l'établissement et la validation d'une liste d'espèces invasives animales et végétales en France métropolitaine, et à la définition d'une méthode d'évaluation des risques liés à l'introduction d'espèces en vue d'une application en France métropolitaine. Pour ce faire, il mène diverses actions : organisation d'un séminaire « gestion des espèces

invasives dans les milieux aquatiques » (12-14 octobre 2010, <http://www.onema.fr/IMG/pdf/rencontres/Onema-Les-Rencontres-9.pdf>), enquête sur les espèces exotiques envahissantes et leur gestion en milieux aquatiques, étude de cas sur la gestion des jussies dans le Parc Naturel Régional de Brière... Le Groupe publiera également fin 2013 un guide de « bonnes pratiques » en matière de gestion des EEE en milieux aquatiques, et prépare d'autres ouvrages.

L'ensemble de ces travaux est accessible sur le site Internet www.gt-ibma.eu (Figure 21). En réponse à une demande croissante des gestionnaires, le groupe de travail envisage de poursuivre son action sur le développement d'approches économiques pour évaluer les coûts de gestion liés aux invasions.

Figure 21. Page d'accueil du site www.gt-ibma.eu





La végétation rivulaire de l'Adour a subi d'importantes modifications dues aux pressions anthropiques et en particulier à l'introduction d'espèces

5.2 – Des altérations profondes des écosystèmes : le cas de l'Adour

Les impacts d'une invasion biologique s'inscrivent toujours dans un processus évolutif : pour appréhender l'état d'un écosystème à un instant donné – et prendre les bonnes décisions de gestion – il faut comprendre dans leur temporalité les processus qui s'y jouent. Dans cette optique, une étude s'est intéressée aux évolutions des compositions floristiques des zones riveraines de l'Adour (E. Tabacchi, CNRS et membre du GT IBMA). Les mêmes observateurs ont mené en 1989, 1999 et 2009 des inventaires floristiques exhaustifs en présence/absence, sur 32 sites du couloir riverain du fleuve, distribués de la source à l'embouchure.

Ces observations révèlent une muta-

tion profonde de la dynamique fluviale sous l'effet de l'anthropisation, avec des conséquences marquées sur la biodiversité végétale. Dans le méandre de Bernède (32), le nombre d'espèces observées est par exemple passé de 673 à 383, le nombre d'habitats distincts de 29 à 16. De manière surprenante, aucun changement significatif n'a pourtant été observé dans la richesse spécifique totale (voisine de 2 000 espèces) : l'évolution s'est surtout traduite par une « redistribution des cartes », avec une tendance marquée à l'homogénéisation des compositions entre amont et aval – surtout entre 1989 et 1999. Cette homogénéisation se traduit de manière différente selon les groupes

de végétaux envisagés. Si les espèces compétitrices, plus présentes dans les secteurs amont, n'affichent qu'une légère régression, les espèces tolérantes au stress connaissent un net repli sur le tiers amont et le tiers aval du bassin (Figure 22).

Autres évolutions marquées : les hydrophytes (plantes immergées ou amphibies) enregistrent une régres-

sion sensible à l'aval du cours d'eau, tandis que les espèces rudérales (plantes poussant spontanément dans les milieux perturbés) sont en augmentation sur l'ensemble du linéaire. Enfin, les espèces introduites connaissent un fort développement. Ainsi, elles représentent aujourd'hui en moyenne plus de 25% du nombre d'espèces observées sur un site, contre 17% en 1989 (Figure 23).

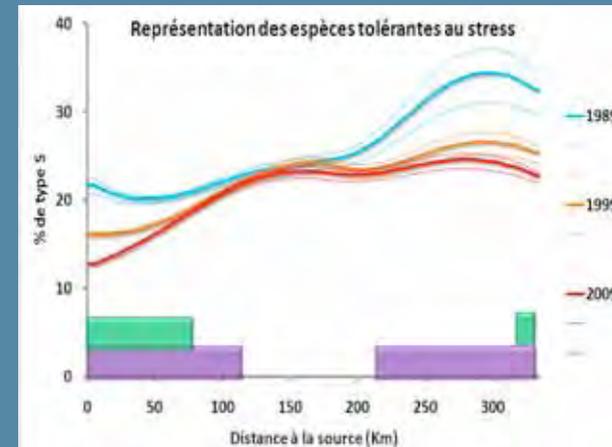


Figure 22. Evolution spatiale et temporelle des espèces tolérantes au stress (en % du nombre total d'espèces) le long du couloir rivulaire de l'Adour. Les barres horizontales signalent les zones où les changements sont significatifs (en violet, entre 1989 et 1999 ; en vert, entre 1999 et 2009).

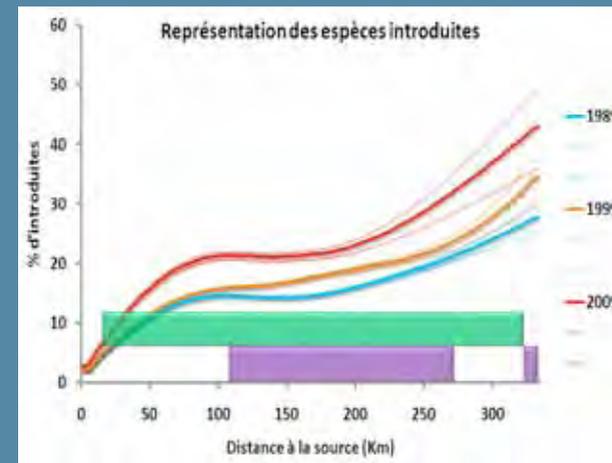


Figure 23. Evolution spatiale des espèces introduites (en % du nombre total d'espèces) le long du couloir rivulaire de l'Adour.

Le bilan est au final contrasté. Le maintien d'une diversité (richesse spécifique) élevée suggère une résilience potentielle importante de cet écosystème face aux pressions anthropiques (urbanisation, agriculture, fragmentation paysagère) et face au changement climatique. Mais il ne doit pas occulter les modifications profondes de la composition des peuplements végétaux. La disparition inquiétante d'espèces spécialistes (souvent d'intérêt patrimonial) est partiellement à relier aux invasions constatées, mais surtout aux modifications d'habitat. Les invasions ne sont d'ailleurs pas toutes le fait d'espèces exotiques : des

végétaux natifs peuvent se révéler envahissants à la faveur des déséquilibres que subit un écosystème.

Au plan méthodologique, la robustesse des profils d'évolution observés conduit les auteurs à suggérer leur utilisation pour la construction de bio-indicateurs systémiques. Cette étude au long cours est appelée à se poursuivre : l'équipe envisage maintenant le développement d'une approche fonctionnelle quantifiée, visant à évaluer les effets des changements de composition sur les fonctionnalités et les services rendus par les écosystèmes.

5.3 – Vers des approches économiques

Pour appuyer la gestion des invasions biologiques, le développement d'approches économiques s'est imposé depuis quelques années comme un enjeu de recherche croissant. Parmi les premiers travaux de ce type en France, une étude (A. Thomas, INRA en partenariat avec le GT IBMA) s'est intéressée au cas des jussies : ce végétal aquatique, qui présente un intérêt esthétique lorsqu'il est présent en faibles densités, a tendance à envahir les milieux naturels en l'absence de mesures de contrôle appropriées, entraînant alors des préjudices écologiques et économiques.

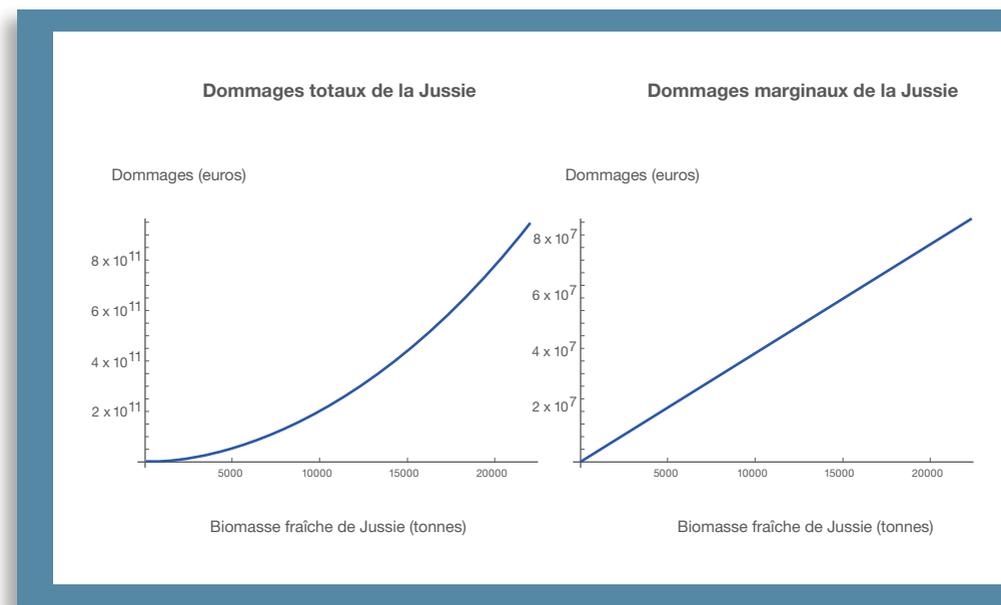
L'étude s'est donc attachée à modéliser les relations entre la fonction de croissance du végétal, les impacts associés et les coûts de contrôle, avec l'objectif d'établir une méthode permettant d'estimer le stock « optimal » de jussies sur un territoire donné. À partir de fonctions théoriques, les coûts de gestion ont été mis en équation, liant biomasse présente et quantité à extraire au regard de chaque type d'impacts (marchands et non marchands) de l'invasion.

La méthode a été appliquée à la zone humide du Marais poitevin. Les différents impacts ont été analysés et traduits en préjudice économique. Parmi les effets marchands, la jussie entraîne notamment une perte de revenus touristiques liés à une moindre navigabilité des canaux, des préjudices agricoles, un risque accru d'inondation lié à l'envasement de voies d'eau et d'importants rejets de nitrates lorsque l'invasion recouvre tout le linéaire. Les impacts « non-marchands » englobent bien sûr la perte de biodiversité, mais aussi le préjudice esthétique et les désagré-

ments induits pour les pratiques de la pêche ou de la chasse de loisir. L'ensemble de ces paramètres a été traité par le modèle précité, permettant une évaluation des dommages totaux, en euros, en fonction de la biomasse de jussie (Figure 24).

Les calculs aboutissent, après mise en équation des coûts de gestion, à une estimation du stock « optimal » de jussie dans le Marais poitevin : il correspond à 87 % du stock actuellement en place. Un tel outil a suscité l'intérêt des gestionnaires lors du séminaire. En l'état, la méthode reste bien sûr perfectible. L'un

Figure 24. Coûts induits par l'invasion, en fonction de la biomasse totale de jussie.



des biais réside dans l'hypothèse d'équivalence entre la longueur de linéaire envahi et la biomasse de végétal présente. Par ailleurs, une limite récurrente de ce type d'approche réside dans la difficulté

à prendre en compte et à chiffrer l'ensemble des impacts liés à l'invasion. En particulier, la délicate question de la « monétarisation » des services rendus par la biodiversité reste ouverte et controversée. ■

Arrachage de la jussie dans le parc naturel régional de la Brière



© JP. Damien - PNR Brière

À travers une trentaine de présentations thématiques, le séminaire organisé par l'Onema les 14 et 15 novembre 2012 a rendu compte de la grande variété des approches scientifiques menées en France pour comprendre les mécanismes qui influent sur la biodiversité aquatique, en évaluer l'état présent et développer les outils et les méthodes qui permettront demain aux gestionnaires d'œuvrer plus efficacement à sa restauration.

L'état des lieux proposé témoigne de la gravité des atteintes portées par le changement global et les activités anthropiques à la faune et à la flore des milieux aquatiques français – plus d'une espèce de poisson d'eau douce sur cinq est considérée comme menacée. Mais l'avenir n'est pas écrit. Ainsi l'examen des tendances temporelles mené par l'Onema suggère-t-il une embellie relative de l'état des populations piscicoles, dont les efforts réalisés depuis 30 ans pour améliorer la qualité des eaux sont sans doute un facteur explicatif. Les retours d'expérience présentés, sur l'apron du Rhône par exemple, rappellent que les actions de restauration se traduisent, lorsqu'elles sont bien menées, par des résultats significatifs. Les outils réglementaires en lien avec la biodiversité aquatique – directive Habitats faune-flore, réseaux Natura 2000, Directive cadre sur l'eau – fournissent aux gestionnaires un cadre nécessaire pour appuyer leurs actions. De même l'effort de restauration des masses d'eau impulsé par la Directive cadre sur l'eau, et les avancées techniques qui l'accompagnent – bioindicateurs, nouvelles méthodes d'inventaire... – doivent-ils concourir, au-delà des objectifs de la surveillance et du rapportage, à la connaissance et à la préservation de la biodiversité.

Des communautés microbiennes aux macrophytes, du dytique au brochet, la vie aquatique résulte d'un ensemble complexe d'équilibres physico-chimiques et d'interactions trophiques, entre les communautés vivantes et leur environnement. Chaque intervention – aggravation ou levée d'une pression, action de restauration – entraîne des effets sur l'ensemble de la chaîne. La préservation de la biodiversité

aquatique, au-delà de la seule gestion des espèces ou des populations, doit intégrer cette complexité et cette résilience pour appréhender le fonctionnement dynamique des systèmes. Cette volonté préside désormais au développement d'approches intégrées de la biodiversité aquatique : l'évaluation des écosystèmes impulsée par l'UICN, le développement de bioindicateurs fonctionnels ou le recours aux études en mésocosmes témoignent de ce nouveau paradigme. Les données présentées sur le lien entre régime de débit et biodiversité, ou sur les impacts des obstacles à l'écoulement, montrent de même que le bon état hydromorphologique des milieux conditionne leur bon fonctionnement global et contribue à une restauration intégrée des communautés vivantes.

Les approches scientifiques actuelles de la biodiversité s'ouvrent aussi davantage à l'interdisciplinarité. Le séminaire a ainsi permis de rendre compte des apports récents de la bioinformatique ou des outils moléculaires pour évaluer l'état des peuplements. L'exploitation des documents historiques livre en outre des connaissances précieuses pour étendre l'horizon temporel des analyses. Le développement d'approches économiques, intégrant la notion émergente de service écosystémique, s'est imposé comme un enjeu de recherche majeur pour appuyer les choix de gestion : des outils de ce type ont par exemple été présentés pour évaluer la vulnérabilité des zones humides ou chiffrer les coûts d'une invasion biologique. Cette ouverture interdisciplinaire du champ de la biodiversité doit maintenant s'étendre aux autres sciences humaines et sociales, encore peu représentées. Leurs apports permettront d'éclairer les perceptions sociales de la biodiversité aquatique, les attentes qu'elle suscite, et par conséquent les valeurs et services liés aux écosystèmes.

Enfin, la diffusion des données et connaissances acquises, sous forme de supports et d'outils déclinés auprès des différents publics – scientifiques, gestionnaires, acteurs économiques, citoyens – reste un enjeu premier : l'effort de restauration de la biodiversité exige, plus que jamais, les progrès de notre conscience collective. ■

Références bibliographiques

Bal, G. *et al.* (2011) Effect of water temperature and density of juvenile salmonids on growth of young-of-the-year Atlantic salmon *Salmo salar* Journal of Fish Biology 78:1002-1022

Bryant M.D. (2009) Global climate change and potential effects the future: climate modelling predictions and phylogeography on Pacific salmonids in freshwater ecosystems of southeast Alaska. Climatic Change, 95, 169–193.

Caquet T. *et al.* (1996). Outdoor experimental ponds (mesocosms) designed for long-term ecotoxicological studies in aquatic environment. Ecotoxicology and Environmental Safety, 34: 125-133.

Daufresne M. *et al.* (2009). Global warming benefits the small in aquatic ecosystems. Proceedings of the National Academy of Sciences 106: 12788–12793.

Dubois A. & Lacouture L. (2011) Bilan de présence des micropolluants dans les milieux aquatiques continentaux, période 2007-2009, Soes

Ficke A.D. *et al.* (2007) Potential impacts of global climate change on freshwater fisher-Caley M.J., Carr M.H., Hixon M.A., Hughes T.P., Jones. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 17, 581–613.

GIEC, 2007 : Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. GIEC, Genève, Suisse, 103 pages.

Holsman K. K. *et al.* (2012). Interacting Effects of Translocation, Artificial Propagation, and Environmental Conditions on the Marine Survival of Chinook Salmon from the Columbia River, Washington, U.S.A. Conservation biology : the journal of the Society for Conservation Biology, 26(5), 912–922.

Keith P. *et al.* (2011). Les Poissons d'eau douce de France, collection Inventaires & biodiversité, Biotope Editions, Publications scientifiques du Muséum, 552 p.

Kottelat M. & Freyhof J. (2007). Handbook of European freshwater fishes. Kottelat, Cornol, Switzerland and Freyof, Berlin.

Kottelat M. & Persat H. (2005) – The genus *Gobio* in France, with redescription of *G. Gobio* and description of two new species (Teleostei : Cyprinidae). Cybium, 29(3) : 211-234.

Lenoir J. *et al.* (2008) A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. Science, 320: 1768-1771.

Limburg K. E. *et al.* (2003). American shad in its native range. Pages 125-140 in K. E. Limburg, and J. R. Waldman, editors. Biodiversity, status, and conservation of the world's shads. American Fisheries Society Symposium 35, Bethesda, Maryland.

Mallet J. P. *et al.* (1999). Growth modelling in accordance with daily water temperature in European grayling (*Thymallus thymallus* L.). Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 56, 994–1000

Moatar F. & Gailhard J. (2006). Water temperature behaviour in the River Loire since 1976 and 1881. Comptes Rendus Geoscience 338: 319–328.

Moritz C. *et al.* (2008). Impact of a century of climate change on small-mammal communities in Yosemite National Park, USA. Science 322:261–264.

Naiman R.J. *et al.* (2002). Legitimizing fluvial ecosystems as users of water: an overview. Environmental Management., 30, 455–467.

Poff N. *et al.* (1997). The natural flow regime. A paradigm for river conservation and restoration. BioScience, 47, 769–784.

Poulet N. *et al.* (2011) Time trends in fish populations in metropolitan France: insights from national monitoring data. Journal of Fish Biology 79: 1436–1452.

Thomas D. & Lennon J.J. (1999) Birds extend their ranges northwards. Nature, 399: 213.

Tiegs S.D. *et al.* (2007). Cotton Strips as a Leaf Surrogate to Measure Decomposition in River Floodplain Habitats. Journal of the North American Benthological Society 26:112-119.

Wilson R.J. *et al.* (2007) An elevational shift in butterfly species richness and composition accompanying recent climate change. Global Change Biology, 13: 1873–1887.

Yates D. *et al.* (2008). Climate warming, water storage, and Chinook salmon in California's Sacramento Valley. Climatic Change 91:335-350.

Sites web mentionnés

<http://www.onema.fr/collection-les-rencontres-syntheses>

<http://www.onema.fr/collection-les-syntheses-eaufrance>

<http://www.foljuif.ens.fr>

<http://www.onema.fr/rendu-du-rapport-d-expertise-sur-la-loue>

www.gt-ibma.eu

<http://inpn.mnhn.fr/actualites/lire/1781/mise-en-ligne-de-fiches-de-synthese-sur-les-especes-aquatiques-protegees>

<http://www.onema.fr/Especes-aquatiques-protegees>

Rédaction

Nicolat Poulet (Onema/Dast),
Nirmala Séon-Massin (Onema/Dast puis ONCFS)
et Laurent Basilico (journaliste)

Edition

Véronique Barre (Onema/Dast)

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble des intervenants
pour leur investissement lors du séminaire
et dans la relecture attentive de ce document.

Tous nos remerciements à l'Office international de l'eau
pour son concours à l'organisation et à la valorisation de cet évènement.
Merci également à tous ceux qui ont fourni gracieusement
des photos et illustrations.

**La collection « Les rencontres-synthèses »,
destinée à un public technique
ou intéressé, présente les principaux résultats
de séminaires organisés, ou co-organisés, par l'Onema.**

*Changement climatique :
impacts sur les milieux aquatiques
et conséquences pour la gestion (février et août 2010)*

*Les mésocosmes :
des outils pour les gestionnaires
de la qualité des milieux aquatiques ? (mars 2011)*

*Quel(s) rôle(s) pour les instruments économique
dans la gestion des ressources en eau en Europe ?
Enjeux politiques et questions de recherche (juin 2011)*

*Captages d'eau potable et pollutions diffuses :
quelles réponses opérationnelles à l'heure
des aires d'alimentation de captage «grenelle» ? (août 2011)*

*Plan de sauvegarde de l'anguille.
Quelles solutions pour optimiser la conception
et la gestion des ouvrages (novembre 2012)*

*Mise en oeuvre de la directive cadre sur l'eau.
Quand les services écosystémiques entrent en jeu (février 2013)*

*Bioindication :
des outils pour évaluer l'état écologique
des milieux aquatiques (avril 2013)*

ISBN : 979-10-91047-17-3

Création graphique : Inzemoon (06 75 24 19 30)
Réalisation : Bluelife (09 66 82 33 55)

Imprimé sur papier issu de forêts gérées durablement par :
IME

Septembre 2013
IMPRIMÉ EN FRANCE



