



HAL
open science

Des poissons, un fleuve et des hommes : approche piscicole du fonctionnement d'un écosystème fluvial sous pression, la Seine

Philippe Boët

► **To cite this version:**

Philippe Boët. Des poissons, un fleuve et des hommes : approche piscicole du fonctionnement d'un écosystème fluvial sous pression, la Seine. Sciences de l'environnement. HDR Université Pierre et Marie Curie, École doctorale Diversité du Vivant, spécialité Écologie, 2002. tel-02593425

HAL Id: tel-02593425

<https://hal.inrae.fr/tel-02593425v1>

Submitted on 15 May 2020

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

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

Université Pierre et Marie Curie - Paris VI

École Doctorale Diversité du Vivant, spécialité Écologie

Mémoire

présenté pour l'obtention de

l'Habilitation à Diriger des Recherches

par

Philippe Boët

Des poissons, un fleuve et des hommes :
approche piscicole du fonctionnement d'un écosystème
fluvial sous pression, la Seine

Soutenu le 20 mars 2002 devant la commission d'examen composée de :

Rapporteurs : Ian Cowx, Professeur, Université de Hull
Maciej Zalewski, Professeur, Académie des sciences, Varsovie
Henri Décamps, Directeur de recherche CNRS, Toulouse

Examineurs : Robert Barbault, Professeur, Université de Paris VI
Ghislain de Marsily, Professeur, Université de Paris VI
Christian Lévêque, Directeur de recherche IRD-CNRS, Paris
Yves Souchon, Directeur de recherche *Cemagref*, Lyon



Sommaire

Remerciements	2
Préambule	3
Curriculum Vitae	5
Publications et travaux (1990-2000)	9
1. Des poissons, un fleuve et des hommes : approche piscicole du fonctionnement d'un écosystème fluvial sous pression, la Seine	15
1.1 Les enjeux	15
1.2 La Seine : un modeste cours d'eau supportant une exceptionnelle pression humaine	16
1.3 Le poisson intégrateur fonctionnel	17
1.4 Une démarche intégrant l'ensemble du bassin.....	19
2 Une indispensable mise en perspective	22
2.1 Une faune appauvrie par les glaciations.....	23
2.2 Une évolution fortement marquée par l'Homme.....	25
2.3 Effet structurel des aménagements du siècle dernier.....	25
3 Situation contemporaine des peuplements	27
3.1 Le réseau hydrographique « mis en ordre »	27
3.2 Le bassin régionalisé.....	29
3.3 Les peuplements analysés en termes de guildes	30
3.4 Organisation naturelle	30
3.4.1 Dimension longitudinale.....	31
3.4.2 Influence régionale.....	32
3.4.3 Dimension latérale	33
3.5 Effet des aménagements	35
3.5.1 Modification de l'organisation longitudinale.....	35
3.5.2 Caractéristiques des peuplements sensibles aux altérations du milieu.....	35
3.5.3 Modifications de la zonation latérale.....	36
3.5.4 Gestion des barrages-réservoirs et reproduction du brochet	38
4 Perspectives	40
4.1 Modélisation des relations milieux - peuplements	40
4.1.1 Les réseaux de neurones.....	40
4.1.2 De la boîte noire à la boîte de verre.....	42
4.1.3 Les arbres de décision.....	44
4.1.4 Vers des modèles prédictifs géo-référencés	46
4.2 Structure spatiale du paysage fluvial et dynamique des populations piscicoles	51
4.3 Restauration d'un ancien méandre.....	53
4.4 Conclusions	55
5 Rendre son hospitalité à la Seine	57
Annexe : sélection de publications	60

Remerciements

Ce mémoire retrace mes travaux menés au *Cemagref* sur une période de plus de dix ans. Il résulte de la contribution de nombreuses personnes qui, de près ou de loin, m'ont apporté leurs compétences, leur savoir-faire, leurs critiques, ou leur soutien. Leur énumération me ferait craindre d'en oublier plus d'une. À toutes, je préfère adresser ici un remerciement collectif qui n'en est pas moins sincère.

Je tiens cependant à remercier tout particulièrement tous les membres de mon jury, rapporteurs et examinateurs ; c'est en effet pour moi un grand honneur que d'être jugé par eux ; ce fut aussi un formidable encouragement pour mener à terme la rédaction de ce document.

Préambule*

Le Cemagref

Créé en 1981, « le Cemagref a été transformé en EPST en 1985 pour développer une recherche de qualité afin de mieux répondre à la demande sociale dans ses domaines de compétences. Au travers des plans stratégiques successifs adoptés par son conseil d'administration, l'établissement a fait évoluer ses priorités scientifiques pour s'adapter à l'évolution des enjeux des politiques agricoles et environnementales, tout en s'attachant à capitaliser les compétences acquises par ses agents.

À l'interface de la recherche fondamentale, des pouvoirs publics et des acteurs socio-économiques, le Cemagref tient ainsi **une place essentielle et originale** au sein de la recherche française.

Il participe à la production de connaissances et en assure l'intégration pour élaborer et diffuser des outils, des méthodes et des technologies. Il développe des liens avec l'enseignement supérieur et les autres organismes de recherche français ou de l'Union européenne. Il contribue à la diffusion de l'innovation auprès des entreprises et des pouvoirs publics qu'il aide à concevoir, mettre en œuvre et évaluer des politiques. Le Cemagref assume ainsi pleinement les **cinq missions** assignées aux EPST par la loi d'orientation de la recherche de 1982.

[...] Les objets de recherche du Cemagref sont généralement des **systèmes complexes** : écosystèmes, bassins versants, petites régions naturelles, périmètres d'irrigation, aménagements... [...]

Basée sur la multidisciplinarité, la démarche scientifique mise en œuvre vise à donner une représentation opérationnelle des systèmes étudiés. Elle résulte d'une approche itérative fondée, d'une part, sur des observations et des expérimentations et, d'autre part, sur la construction et la validation de modèles. »

Centré sur l'eau et les espaces à dominante rurale

« Notre société « postindustrielle », fortement urbanisée, doit faire face à une préoccupation majeure : concilier les nécessités économiques et les aspirations humaines et sociales avec une **gestion à long terme du patrimoine naturel et des biens collectifs**. Cette préoccupation s'inscrit dans les grands défis du XXI^e siècle, tels que le développement durable ou l'exigence de sécurité et la maîtrise de la qualité. Le rôle des pouvoirs publics à cet égard est primordial. En effet, il leur revient d'assumer les grands objectifs qui ne sont pas spontanément pris en compte par la sphère marchande, mais aussi de contribuer à ce que les entreprises puissent s'adapter à ces objectifs et les anticiper. La recherche est aussi directement interpellée car l'application du principe de précaution conduit souvent à agir avant de disposer des certitudes scientifiques. »

Dans une démarche scientifique intégratrice

« L'identité du Cemagref est faite **d'acquisition de connaissances** en propre, mais aussi **d'association de connaissances** issues de recherches fondamentales en des **synthèses opérationnelles** destinées aux utilisateurs de ses travaux. Cette ingénierie de la connaissance pour l'action est en elle-même un travail de recherche qui s'inscrit dans une logique de réseaux recherche-technologie-utilisateurs-réglementation. »

* extrait du Schéma d'orientation scientifique et technique et d'organisation (SOSTO), Plan stratégique 1998-2002, 31 p.

Structurée autour de quatre orientations thématiques

« La structuration des activités scientifiques du Cemagref évolue[ra] autour de **quatre orientations thématiques** :

- Gestion des hydrosystèmes
- Génie des équipements et services pour l'eau et les déchets
- Gestion durable des territoires à dominante rurale
- Génie des équipements dans le secteur agricole et alimentaire

Ces quatre grandes orientations contribuent à la gestion intégrée des systèmes aquatiques. Des synergies internes s[er]ont développées pour mieux prendre en compte les relations entre les activités humaines, l'occupation des sols, les aménagements et la ressource et les milieux aquatiques. »

Le département Gestion des milieux aquatiques (GMA)

« Les activités [du département GMA, créé en 1994,] sont centrées sur la compréhension du fonctionnement des cours d'eau et de leurs bassins versants, prenant en compte l'occupation des sols et les infrastructures, pour concilier au mieux les impératifs humains et écologiques dans une logique de gestion et de restauration.

[...] Les activités exercées antérieurement au sein de cinq programmes sont désormais concentrées dans trois axes thématiques de recherche [ATR], à partir de huit thèmes de recherche [TR] inter-unités se substituant aux trente opérations du plan précédent. »

ATR DYMIL. Dynamique des écosystèmes et qualité des milieux aquatiques

« Cet axe thématique s'inscrit dans le courant actuel de la gestion globale des hydrosystèmes, qui inclut les principes de développement durable et de biodiversité.

Son ambition est de faire converger des visions jusqu'alors parallèles et compartimentées de ces systèmes. Ce parti pris systémique demande de savoir effectuer les transferts d'échelle au sein d'un bassin, depuis l'appartenance écorégionale jusqu'au microhabitat. Le choix judicieux des processus, mécanismes et phénomènes biotiques et abiotiques clés à étudier est une des difficultés inhérentes à cette cascade d'échelles. Les travaux menés dans ce contexte ont l'ambition de rendre compte efficacement de l'état des hydrosystèmes et de leurs communautés, d'identifier leurs pathologies et de prévoir leurs tendances d'évolution. Ils sont également conduits pour aider à la restauration physique et biologique de ces systèmes.

Quatre thèmes de recherche composent cet ATR. Le premier aborde la connaissance des réponses de l'habitat et des communautés aux variabilités hydrologiques, hydrauliques et morphologiques, le deuxième et le troisième, chacun à leur niveau d'organisation biologique, évaluent les conséquences des déversements en fonction de conditions de dégradation et d'assimilation, le quatrième a pour objectif d'optimiser les conditions de vie des espèces utilisées comme ressources et soumises aux contraintes de milieu et d'aménagement. »

TR HYDRECO. Déterminants physiques du fonctionnement écologique des hydrosystèmes d'eau courante.

« La caractéristique des recherches de ce TR pluridisciplinaire est de marier des approches physiques et biologiques pour bâtir le cadre d'habitat de référence des cours d'eau au sein de leur bassin et en analyser la dynamique fonctionnelle.

L'objectif opérationnel est d'aider à identifier les descripteurs hydrologiques, morphologiques, et hydrauliques pertinents pour prévoir les réponses des communautés aux changements. »

Curriculum Vitae

Philippe BOËT

Né le 29 décembre 1952, à Boulogne-Billancourt (92)

Vie maritale, 1 enfant

Adresse personnelle 114, rue d'Illiers, 45000 Orléans
Tél : 06-86-86-24-98

Adresse professionnelle Cemagref - Unité de recherche « *qualité et fonctionnement hydrologique des systèmes aquatiques* » (QHAN), Parc de Tourvoie BP 44, 92163 Antony cedex
Tél : 01-40-96-60-70 Fax : 01-40-96-61-99
E-mail : philippe.boet@cemagref.fr

Situation professionnelle : Directeur de recherche au Cemagref

Grade DR 2
Fonction Responsable de l'équipe d'hydro-écologie
Missions Recherches - TR HYDRÉCO : « *Déterminants physiques du fonctionnement écologique des hydrosystèmes d'eau courante* » du département Gestion des milieux aquatiques (GMA)
Responsable de l'opération « *Fonctionnement des écosystèmes fluviaux* » (QHANM201) au sein de l'Unité de recherche
Compétences
disciplinaires Écologie, Hydrobiologie, Ichtyologie
Statistiques, Analyse de données, Modélisation
filières Écosystèmes aquatiques continentaux
Effets des aménagements

Formation

1976	Maîtrise libre d'étude du milieu	Université Paris VII
1978	DEA d'Écologie	Université Paris VI
1981	Thèse 3 ^{ème} cycle d'Écologie (boursier DGRST)	Université Paris VI

Expérience professionnelle

1976 - 1977	SRAE Centre	Technicien supérieur
1982 - 1985	Lab. Écologie CNRS - ENS ULM	Hors-statut (<i>sur conventions</i>)
1985 - 1987	Conseil Supérieur de la Pêche	Chargé d'étude

Carrière au Cemagref

1988-1992	Chargé d'étude (cl. normale)	Contractuel
1992-1994	Ingénieur d'étude (2 ^{ème} cl.)	Titulaire
1994-2001	Chargé de recherche (1 ^{ère} cl.)	
Depuis 2001	Directeur de recherche (2 ^{ème} cl.)	

Enseignement et encadrement

Formation initiale	Depuis 1996	DEA national d'hydrologie « <i>Hydrologie, hydrogéologie, géostatistique et géochimie</i> », Paris VI, Paris XI, ENGREF, ENSMP, IRD (resp. Gh. de Marsily) <i>Fonctionnement piscicole des milieux fluviaux anthropisés (6h)</i>
	Depuis 2000	DEA d'Écologie, Univ. Paris VI (resp. M. Loreau), module Biologie de la conservation (resp. D. Couvet, MNHN) <i>Conserver les poissons de la Seine ? Les enjeux (3h)</i>
	2000	Maîtrise biologie des populations et des écosystèmes. Univ. Paris VI (resp. P. Lavelle) <i>Écologie des peuplements piscicoles dans les écosystèmes fluviaux (3h)</i>
Formation continue	1998	CNED « Séminaire Environnement - L'eau : approche globale par bassins versants » Paris (resp. Dominique Barbe-Asensio) <i>Les systèmes écologiques à prendre en compte dans la gestion de l'eau (4h)</i>
	Depuis 1999	ENGREF-CSP « Gestion durable des cours d'eau : les fondements » Clermont-Ferrand (resp. M. Vaucouloux) <i>Bases biologiques. Peuplements et habitats. Cas des rivières de plaine (3h)</i>
Encadrement	3 thèses	<i>Boughida 1992, Belliard 1994, Berrebi-dit-Thomas 1999</i>
	4 DEA	<i>Berrebi-dit-Thomas 1994, Chung 1994, Monfort 1995, Gorges 1998</i>
	5 ingéniorats	<i>Gallot 1994, Pommier 1994, Dubayle 1995, Chopin et al. 1998, Martin 2000</i>
	3 maîtrises	<i>Gorges 1996, Poulet 1998, Léger 1999</i> <i>(Voir liste des publications et travaux)</i>
Jurys de thèse	1999	Berrebi-dit-Thomas R., Le recrutement des communautés piscicoles dans les annexes hydrauliques de la plaine de La Bassée (Seine). <i>Thèse doct. Univ. Paris VI, Écologie, 271 p.</i>
	2001	Belkessam Djamilia, Structure des peuplements de poissons de cours d'eau du nord-ouest de la France : degré de saturation, interactions biotiques et variabilité temporelle. <i>Thèse doct. MNHN, Écologie, 186 p.</i>

Animation et organisation de la recherche

Programmes de recherche : coordination et gestion

- | | |
|-------------|--|
| Depuis 1992 | Comité directeur du PIREN-Seine (avec Gh. DE MARSILY, Eliane FUSTEC, G. BILLEN, M. MEYBECK, Josette Garnier, J.-M. MOUCHEL) |
| 1993-1994 | Coordination du programme PIRE-Poisson (avec D. PONT et B. DE MÉRONA)
« Signification des échelles spatio-temporelles dans la variabilité des peuplements piscicoles des grands cours d'eau » |
| 1994-1995 | Coordinateur du PIN inter-divisions Cemagref (BELY, ELAN, HYAX) : « Application des réseaux neuronaux à la prédiction de la faune ichthyologique des cours d'eau » |
| Depuis 1998 | Coordinateur du thème « Fonctionnement écologique du continuum aquatique et du paysage hydrologique. Biodiversité des organismes et des écosystèmes » du programme PIREN-Seine (avec Josette GARNIER) |
| 2000 | Animateur invité du thème « halieutique : populations et habitats » (avec J.-C. DAUVIN) à l'atelier de travail « Caudebec II » d'élaboration du « cahier des charges » scientifiques 2001-2004 du programme Seine-Aval (dirigé par L.-A. ROMANA)

Comité scientifique du programme « Invasion biologique » du MATE (présidé par R. BARBAULT) |

Participation aux instances du Cemagref

- | | |
|-----------|---|
| 1993-2000 | Membre élu du personnel à la commission spécialisée du département GMA, et à l'instance d'évaluation des agents |
| 2001 | Membre du CTP local (titulaire) et du CHS (suppléant) du groupement d'Antony |
| | Plusieurs jurys de concours de recrutements externes ou internes au Cemagref (3CR, 2IE, AI, AGT, AJT) |

Divers

- | | | |
|---|-----------|--|
| Groupe de travail | 1998-2000 | « Évaluation économique des services rendus par les zones humides » piloté par l'ASCA dans le cadre du programme PNRZH (MATE, GIP HydrOsysteme) |
| Comités de lecture ou de rédaction | | Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture (membre du comité de rédaction)
Annales de limnologie
Aquatic Living Resources
Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences
Écologie
Hydrobiologia
Water Research |

Appui technique et expertise

Conseils aux organismes publics (Agence de l'Eau, DIREN, Grands Lacs de Seine, Voies Navigables de France, Conseil Supérieur de la Pêche)

Éléments de rédaction de SDAGES, méthodes d'acquisition et d'exploitation de données du Réseau hydrobiologique et piscicole (RHP), aménagement de zones humides, débits écologiques...

1995

Grant Agency - Academy of Sciences of the Czech Republic

Expertise d'une proposition de recherche relative à la mise au point d'un IBI pour des barrages-réservoirs tchèques

Depuis 2000

Conseil Scientifique Régional du Patrimoine Naturel d'Île-de-France (CSRPN) : nommé par le Préfet de région (5 ans)

Publications et travaux (1990-2001)

Articles dans revues scientifiques à comité de lecture

- 1991** 1 **Boët P.**, Allardi J. & Leroy J., Le peuplement ichtyologique du bassin de l'Yonne. *Bull. Fr. Pêche et Pisciculture*, 320, 7-28.
- 1994** 2 **Boët P.**, Duvoux B., Allardi J. & Belliard J., Incidence des orages estivaux sur le peuplement piscicole de la Seine à l'aval de l'agglomération parisienne (bief André-sy-Méricourt). *La Houille Blanche*, 1-2, 141-147.
- 3 Guillard J., **Boët P.**, Roux P. & Gerdeaux D., Application of mobile acoustic techniques fish surveys in shallow water : the river Seine. *Regulated Rivers*, 9, 121-126.
- 1995** 4 Belliard J., **Boët P.** & Allardi J., Évolution à long terme du peuplement piscicole du bassin de la Seine. *Bull. Fr. Pêche et Pisciculture*, 337/338/339, 83-91.
- 5 **Boët P.** & Fuhs T., Les réseaux de neurones pour prédire la biodiversité des poissons en eau courante. *Ingénieries - EAT*, 4, 3-12.
- 6 Chevreuil M., Carru A.-M., Chesterikoff A., **Boët P.**, Tales É. & Allardi J., Contamination of fish from different areas of the river Seine (France) by organic (PCB and pesticides) and metallic (Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb and Zn) micropollutants. *Sci. Total Environ.*, 162 (1995), 31-42.
- 7 Hugueny B., Persat H., Baglinière J.-L., **Boët P.**, Carrel G., Olivier J.-M., Paugy D., Pont D. & Traoré K., Long term variability in riverine fish assemblages : results from French and West African rivers. *Bull. Fr. Pêche et Pisciculture*, 337/338/339, 93-99.
- 8 Pont D., Belliard J., **Boët P.**, Changeux T., Oberdorff T. & Ombredane D., Analyse de la richesse piscicole de quatre ensembles hydrographiques français. *Bull. Fr. Pêche et Pisciculture*, 337/338/339, 75-81.
- 9 Pont D., Allardi J., Belliard J., **Boët P.**, Carrel G., Changeux T., Oberdorff T., Olivier J.-M., Persat H. & Poizat G., Stratégies démographiques des poissons des rivières françaises : premiers résultats. *Bull. Fr. Pêche et Pisciculture*, 337/338/339, 113-119.
- 1996** 10 Tales É., **Boët P.** & Berrebi-dit-Thomas R., Les peuplements de poissons de l'année de quelques types d'annexes fluviales dans la plaine de la Bassée (Seine). *Bull. Fr. Pêche et Pisciculture*, 343 (4), 189-202.
- 1997** 11 Belliard J., **Boët P.** & Tales É., Regional and longitudinal patterns of fish community structure in the Seine River basin, France. *Environ. Biol. Fish.*, 50, 133-147.
- 1998** 12 Berrebi-dit-Thomas R., Belliard J. & **Boët P.**, Caractéristiques des peuplements piscicoles sensibles aux altérations du milieu dans les cours d'eau du bassin de la Seine. *Bull. Fr. Pêche et Pisciculture*, 348, 47-64.
- 1999** 13 **Boët P.**, Belliard J., Berrebi-dit-Thomas R. & Tales É., Multiple human impacts by the City of Paris on fish communities in the Seine River basin, France. *Hydrobiologia*, 410, 59-68.
- 14 Fustec É., **Boët P.**, Amezal A. & Fauchon N., Methodology for multifunctional assessment of riverine wetlands in the Seine River basin. *Hydrobiologia*, 410, 213-221.
- 2001** 15 Berrebi-dit-Thomas R., **Boët P.** & Tales É., Macrohabitat characteristics influencing young-of-the-year fish assemblages in connected lentic backwaters in the Seine River (France). *Archiv Hydrobiol.*, 135 (2-4), 119-135.

Contributions à ouvrages de synthèse

- 1995 16 Billen G., Décamps H., Garnier J., **Boët P.**, Meybeck M. & Servais P., Atlantic river systems of Europe (France, Belgium, The Netherlands). p. 389-418, *in* : C.E. Cushing, K.W. Cummins & G.W. Minshall (Éds.), *Rivers and streams ecosystems*, Ecosystems of the world 22, Elsevier, Amsterdam.
- 1998 17 **Boët P.**, Akopian M., Belliard J., Berrebi-dit-Thomas R., Pourriot R., Tales É. & Testard P., Une faune aquatique sous pressions multiples. p. 627-678, *in* : M. Meybeck, G. de Marsily & É. Fustec (Éds), *La Seine en son bassin. Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé*, Elsevier, Paris.
- 18 Mouchel J.-M., **Boët P.**, Hubert G. & Guerrini M.-C., Un bassin et des hommes : une histoire tourmentée. p. 77-125, *in* : M. Meybeck, G. de Marsily & É. Fustec (Éds), *La Seine en son bassin. Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé*, Elsevier, Paris.
- 2000 19 **Boët P.** & Fuhs T., Predicting presence of fish species in the Seine River basin using artificial neural networks. p. 131-142, *in* : S. Lek & J.-F. Guégan (Éds), *Artificial neuronal networks. Application to ecology and evolution*, Environmental Science, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg.
- 20 **Boët P.**, Fonctions des zones humides pour les poissons. p. 245-259, *in* : É. Fustec & J.-C. Lefeuvre (Éds), *Les fonctions et la valeur des zones humides*, Technique et Ingénierie, série Environnement, Dunod, Paris.

Comptes-rendus de colloques

- 1993 21 Allardi J., Belliard J., **Boët P.** & Boughida L., *Influence des actions anthropiques sur le peuplement ichtyologique du bassin de la Seine*. *in* : É. Fustec & G. de Marsily (Éds), *La Seine et son bassin : de la recherche à la gestion*, Paris, 29 et 30 juillet, Colloque PIREN-Seine, p. 221-237.
- 1996 22 **Boët P.** & Fuhs T., *Prédiction de la composition spécifique du peuplement piscicole en milieu fluvial par des méthodes connexionnistes*. *in* : J. Ferraris, D. Pelletier & M.-J. Rochet (Éds), *Méthode d'étude des systèmes halieutiques et aquacoles*, Actes du deuxième forum halieumétrique, Nantes, 26 - 28 juin 1995, ORSTOM éditions, p. 145-149.
- 23 Monfort O., Breil P. & **Boët P.**, *Selection of an ecological reference flow : support by modeling the habitat of a key species, the northern pike*. *in* : M. Leclerc, H. Capra, S. Valentin, A. Boudreault & Y. Côté (Éds), "Ecohydraulics 2000" 2nd IAHR international symposium on hydraulics and habitats, Quebec City, June 11-14, 1996, INRS-Eau, B, p. 133-146.
- 1998 24 **Boët P.** & Monfort O., *Gestion des inondations et reproduction du brochet*. *in* : C. Le Coz, B. Tassin & D. Thévenot (Éds), "Pluie et environnement" Actes des 8^{èmes} Journées Sciences et Techniques de l'Environnement, Paris, 15-16 mai 1997, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, p. 125-142.
- 2001 25 Oberdorff T., Pont D., Huguény B., **Boët P.**, Porcher J.-P. & Chessel D. (2001) - *Adaptation à l'ensemble du réseau hydrographique d'un indice de qualité écologique fondé sur les peuplements de poissons : résultats actuels et perspectives*. p. 95-124, *in* : J. Lemoalle, F. Bergot & M. Robert (Éds), *État de santé des écosystèmes aquatiques. De nouveaux indicateurs biologiques*, Cemagref, Paris.

Communications orales à colloques

- 1992 26 **Boët P.**, Évolution historique du peuplement piscicole du bassin de la Seine. Atelier sur la modélisation rétrospective de la qualité de l'eau des rivières, ULB, Bruxelles, 17-18 octobre.
- 1993 27 **Boët P.**, Duvoux B., Allardi J. & Belliard J., Incidence des orages estivaux sur le peuplement piscicole de la Seine à l'aval de l'agglomération parisienne (bief Andrésy-Méricourt). Colloque S.H.F., Section Hydrologie Urbaine « *La pluie : source de vie, choc de pollution* », Paris, 17-18 mars 1993.
- 28 **Boët P.**, Gerdeaux D., Guillard J. & Roux P., Méthodes acoustiques mobiles en milieu peu profond : exemple de la Seine. Congrès Limnologie & Océanographie, Évian, 25-28 mai 1993.
- 1994 29 **Boët P.**, 1994. Biodiversité et anthropisation. Séminaire PIREN-Seine, Bierville, 15-16 février 1994.
- 30 Belliard J., **Boët P.** & Allardi J., Évolution à long terme du peuplement piscicole du bassin de la Seine. Symposium international « *Relation entre le poisson et son habitat : théories, méthodes et applications* », Programme Environnement CNRS & GIP Hydrosystèmes, Lyon, 6-8 décembre 1994.
- 1995 31 **Boët P.** & Fuhs T., Prédiction de la composition spécifique du peuplement piscicole en milieu fluvial par des méthodes connexionnistes. Deuxième Forum Halieumétrique, Société Française d'Halieumétrie, Nantes, 26-28 juin 1995.
- 32 Guillard J., **Boët P.**, Degiorgi F. & Gerdeaux D., In situ determination of the target strength of white fish (*Coregonus sp.*) in a lake with two different methods, single beam and split beam echosounder, during a daily cycle. ICES International Symposium on Fisheries and Plankton Acoustics, Aberdeen, June 12-16, 1995.
- 1996 33 **Boët P.**, Belliard J. & Berrebi-dit-Thomas R., Analyse multiscalaire des conséquences de l'anthropisation de l'écosystème Seine sur la diversité du peuplement piscicole. Symposium « *Biodiversité et fonctionnement des écosystèmes* », PIR Environnement, Vie et Sociétés CNRS & Programme National *Dynamique de la Biodiversité et Environnement*, ENS Paris, 12-14 juin 1996.
- 34 Monfort O., Breil P. & **Boët P.**, Aide à la détermination d'un débit écologique de référence en milieu potamique par la modélisation de l'habitat d'une espèce-clé : le brochet. Écohydraulique 2000 - 2^{ème} symposium international de l'AIRH sur l'hydraulique et les habitats, INRS-eau, Québec, Canada, 11-14 juin 1996.
- 1997 35 Berrebi-dit-Thomas R. & **Boët P.**, Biodiversity of young-of-the-year fish assemblages from natural and artificial backwaters in the Seine River floodplain (France). Ninth Intern. Congress of European Ichthyologists (CEI9) « *Fish Biodiversity* », Trieste, Italy, August 24-29, 1997.
- 36 Oberdorff T., **Boët P.**, Chessel D., Hugueny B., Pont D., Porcher J.-P. & Tabacchi É., Schémas régionaux d'organisation des communautés de poissons sur le territoire français. Cinquième conférence internationale des limnologues d'expression française, Namur, Belgique, 7-11 juillet 1997.
- 1998 37 **Boët P.**, Échelle de temps et d'espace en ichtyologie fluviale. in : « *La prise en compte du temps dans l'analyse du fonctionnement des systèmes fluviaux anthropisés* », Séminaire PIREN-Seine, Dourdan, 3-4 novembre 1998.
- 38 **Boët P.**, Belliard J., Berrebi-dit-Thomas R. & Tales É., Multiple anthropogenic impacts induced by Paris on fish population in the Seine Basin, France. in : « *Man and river systems : the functioning of river systems at basin scale* », PIREN-Seine International conference, Paris, March 25-27, 1998.

- 39 **Boët P.** & Fuhs T., Predicting local fish species in the Seine River basin with artificial neural networks. International workshop « *applications of artificial neural networks to ecological modelling* », CNRS-Université Paul Sabatier, Toulouse, France, december 14-17, 1998.
- 40 Oberdorff T., Chessel D., Hugueny B., Pont D., **Boët P.** & Porcher J.-P., A probabilistic model characterizing riverine fish communities of French rivers : a framework for the adaptation of a fish based index. *in* M. Jungwirth, S. Schmutz & M. Kaufmann (Éds), « *Assessing the ecological integrity of running waters* », Vienna, Austria, november 9-11, 1998.
- 1999** 41 Berrebi-dit-Thomas R., Lek S. & **Boët P.**, Influence of micro- and macro-habitat characteristics of the connected lentic backwaters on the 0+ fish assemblages in a natural flood plain (Seine River, France). Seventh Intern. Symp. on the Ecology of Fluvial Fishes (ISEFF), Penczak, Tadeusz, 10-13 mai 1999, Lodz, Poland.
- 42 Oberdorff T., Pont D., Hugueny B., **Boët P.**, Porcher J.-P. & Chessel D., A probabilistic model characterizing riverine fish communities of french rivers : a framework for the adaptation of a fish based index. Seventh Intern. Symp. on the Ecology of Fluvial Fishes (ISEFF), Penczak, Tadeusz, Lodz, Poland, may 10-13, 1999.
- 2000** 43 **Boët P.**, Potentialités piscicoles des carrières dans les écosystèmes fluviaux. Colloque international « *Recréation de zones humides : l'apport écologique des carrières* », CNRS-Prog. Environnement Vie et Société, Min. aménagement du territoire et de l'environnement, Union nationale des producteurs de granulats (UNPG), Muséum national d'histoire naturelle, Maison de l'UNESCO, 30-31 mars 2000, Paris.
- 44 **Boët P.**, Les poissons *in* : « *La Seine : un miroir pour 15 millions d'habitants...* » en coll. avec Gilles Billen & Marc Benoit, Exposé *Forum Sciences* salle Boris Vian, Aqua-Expo, Grande Halle de la Villette, 5 avril 2000 17h-19h00, Paris.

Diffusions grand public et contacts médiatiques

Articles

- 1998** 45 **Boët P.** & Leclerc V., Comment va la Seine ? Les poissons nous répondent.... *SPOT*, 88 (décembre 1998), 5-8.
- 1999** 46 Le Hir P., Les poissons de la Seine souffrent de l'uniformisation du fleuve. *Le Monde* (Samedi 12 juin 1999), p. 31.
- 2001** 47 Boët P. (2001) - Restauration de peuplements piscicoles perturbés : exemple du système hydrographique de la Seine. *La Jaune et la Rouge*, 566 (juin/juillet 2001), 41-44.

Télévisions

- 1999** 48 Guillomin S., Le stress des poissons, *in* : *Le 19-20 de l'info*, informations régionales FR3 Paris Île-de-France Centre, le 23/08/99, 18h55 ; *Le 12-13 de l'info*, informations nationales FR3, les 24 et 25/08/99, 12h05.
- 49 Baruch, J.-O., Poissons sur Seine, *in* : *Visa pour la Science*, FR3 Paris Île-de-France Centre & Cité des Sciences et de l'Industrie, 18 septembre 1999, 17h30.

Audiovisuels

- 1999** 50 **Boët P.**, Bêtes de Seine. *in* « Science en Fête » Centre André Malraux, 23-24 octobre 1999, Antony
- 2000** 51 **Boët P.**, Aux origines des poissons de la Seine. *in* Espace recherche Aqua Expo, Grande Halle de la Villette, Paris, 4-11 avril 2000.

- 52 **Boët P.**, La Seine aménagée et ses poissons. *in* Espace recherche Aqua Expo, Grande Halle de la Villette, Paris, 4-11 avril 2000.

Encadrement d'étudiants

Thèses

- 1992 53 Boughida L., Éléments d'écologie du gardon (*Rutilus rutilus* L. Cyprinidae). Croissance, reproduction et développement de deux populations de la Seine, en amont et en aval de l'agglomération parisienne. *Thèse Doct. Spécialité Écologie Univ. Paris VI*, 176 p.
- 1994 54 Belliard J., Le peuplement ichthyologique du bassin de la Seine : rôle et signification des échelles temporelles et spatiales. *Thèse Doct. Univ. Paris VI*, 197 p.
- 1999 55 Berrebi-dit-Thomas R., Contribution des annexes hydrauliques au recrutement des communautés piscicoles en milieu fluvial. *Thèse Doct. Univ. Paris VI*, 270 p.

DEA

- 1994 56 Berrebi-dit-Thomas R., Étude critique d'un indice d'intégrité biotique des cours d'eau fondé sur les peuplement de poissons. Proposition d'un nouvel indice pour le bassin de la Seine. Rapport de DEA Univ. Paris VI, EMP, ENGREF, septembre 1994, 54 p.
- 57 Chung S.-O., Application des méthodes connexionnistes à la prédiction de la composition de l'ichtyofaune en milieu fluvial. Rapport de DEA Sciences & Techniques de l'Environnement Univ. Paris XII Val-de-Marne, juin 1994, 40 p.
- 1995 58 Monfort O., Aide à la détermination d'un débit écologique de référence en milieu potamique par la modélisation de l'habitat d'une espèce-clé : le brochet. Rapport de DEA Sciences & Techniques de l'Environnement Univ. Paris XII Val-de-Marne, décembre 1995, 51 p. + annexes.
- 1998 59 Gorges G., Franchissement des écluses par les poissons. Rapport de DEA Sciences & Techniques de l'Environnement Univ. Paris XII Val-de-Marne, septembre 1998, 48 p. + annexes.

Ingéniorats

- 1994 60 Gallot S., Les peuplements ichthyologiques du bassin de la Loire. Constitution d'une base de données et étude de l'organisation spatiale. Mémoire diplôme d'ingénieur agronome INA-PG, 22 septembre 1994, 54 p. + annexes.
- 61 Pommier O., Application de la détection acoustique à l'approche de peuplements piscicoles fluviaux. Mémoire diplôme d'ingénieur ENSAD, septembre 1994, 56 p.
- 1995 62 Dubayle L., Impacts de la chenalisation sur les écosystèmes fluviaux. Rapport de stage ENSAR, août 1995, 32 p.
- 1998 63 Chopin N., Delarue V., Ferney D. & Loisel O., La prédiction de la faune ichthyologique dans les bassins de la Seine et de la Loire. Mémoire de statistique appliquée ENSAE, 11 juin 1998, 30 p. + annexes.
- 2000 64 Martin E., Modélisation de la dynamique de populations de brochets dans la plaine de La Bassée. Mémoire diplôme d'ingénieur ENGEES, septembre 2000, 75 p. + annexes.

Maîtrises

- 1996 65 Gorges G., Éléments de typologie pour une régionalisation du corridor fluvial des cours d'eau du bassin de la Seine. Rapport MST Génie Sanitaire et Environnement Univ. Paris XII Val-de-Marne, Octobre 1996, 24 p. + annexes.

- 1998 66 Poulet N., Caractérisation de l'évolution spatio-temporelle du peuplement piscicole dans le secteur de Nogent-sur-Seine. Rapport Maîtrise Biologie des Écosystèmes et des Populations Univ. Paris VI, Juin 1998, 30 p. + annexes.
- 1999 67 Léger M., Essai d'application du modèle bioénergétique ECOPATH II au cas d'un bief de la Seine. Rapport Maîtrise Biologie des Écosystèmes et des Populations, Univ. Paris VI, Juin 1999, 30 p.

Rapports d'études (sélection)

- 1993 68 **Boët P.**, Allardi J., Belliard J. & Boughida L., L'ichtyocœnose du bassin de la Seine. *in*: G. Billen & J. Allardi (Éds), *Rapport de synthèse 1989-1992*. Vol. 1 : Le fonctionnement de l'écosystème : analyse des processus et modélisation, PIREN-Seine, 17 p.
- 69 Pont D., de Merona B. & **Boët P.**, Signification des échelles spatio-temporelles dans la variabilité des peuplements piscicoles des grands cours d'eau. Rapport d'activités 1992 PIR-Environnement, 133 p. + annexes.
- 1994 70 Pont D., de Merona B. & **Boët P.**, Signification des échelles spatio-temporelles dans la variabilité des peuplements piscicoles des grands cours d'eau. Rapport d'activités 1993 PIR-Environnement, 98 p.
- 1996 71 **Boët P.**, Berrebi-dit-Thomas R., Monfort O. & Tales É., Caractérisation et rôle des annexes hydrauliques sur la dynamique des communautés piscicoles. Rapport d'activité 1995/II - Thème "*Corridor fluvial*" GDR Analyse et modélisation des systèmes fluviaux anthropisés (Piren-Seine), mars 1996, 24 p.
- 72 Ivoll J.-M., Belliard J. & Wasson J.-G., 1996. Constitution d'un référentiel régionalisé de bioindicateurs des écosystèmes d'eau courante du bassin de la Loire. Rapport intermédiaire Agence de l'Eau Loire Bretagne, Cemagref Lyon BEA/LHQ et Paris QE/FEA, janvier 1996, 66 p.
- 1997 73 **Boët P.**, Berrebi-dit-Thomas R., Gauthiez F. & Tales É., Contribution des milieux annexes au recrutement des poissons. Rapport de synthèse 1996/II - Thème "*Corridor fluvial*" GDR Analyse et modélisation des systèmes fluviaux anthropisés (Piren-Seine), Juin 1997, 67 p.
- 74 Oberdorff T., **Boët P.**, Chessel D., Hugueny B., Pont D., Porcher J.-P. & Tabacchi É., Schémas régionaux d'organisation des peuplements de poissons de l'ensemble du réseau hydrographique français (définition des « Ichtyorégions »). Rapport final de la phase I du programme national « Indice Poisson », 38 p + annexes.
- 75 Rochard É., **Boët P.**, Castelnaud G., Gauthiez F., Bigot J.-F. & Ballion B., Premier inventaire ichtyologique de la partie basse de la Seine. *in*: *Rapport exercice 1996*, Programme Scientifique Seine-aval - Thème Édifices biologiques, p. 8-31.
- 1999 76 Oberdorff T., **Boët P.**, Chessel D., Hugueny B., Pont D. & Porcher J.-P., Mise au point d'un indice Poisson sur l'ensemble du réseau hydrographique national. 31 janvier 1999, Rapport final de la phase II du programme national « Indice Poisson », 60 p + annexes.
- 77 Burgeot T., Minier C., Bocquené G., Vincent F., Cachot J., Loizeau V., Jaouen A., Miramand P., Guyot T., Lesueur P., Rochard É. & **Boët P.** (1999) - *Des organismes sous stress*. 35 p., *in*: T. Burgeot (Coord.), *Programme Scientifique Seine-Aval*, fascicule n° 14, Ifremer.

1. Des poissons, un fleuve et des hommes : approche piscicole du fonctionnement d'un écosystème fluvial sous pression, la Seine

1.1 Les enjeux

L'eau est à l'origine de la vie sur terre. Elle est un besoin vital pour tous les organismes, dont l'homme, pour lequel l'utilisation de cette ressource a en outre largement contribué à son essor et son développement.

Mais aujourd'hui, comme le constate la Commission du développement durable des Nations Unies (1997¹), « *les schémas actuels de développement et d'utilisation des ressources en eau sont pour la plupart non soutenables* ».

Ainsi, l'eau est-elle en passe de devenir un enjeu crucial pour les prochaines décennies, source probable de conflits majeurs annoncés à l'aube du siècle naissant. « L'or bleu » de la planète est en effet très inégalement réparti. Ceci n'est pas nouveau et depuis des siècles déjà, l'eau revêt des aspects géostratégiques majeurs. Elle se trouve ainsi au cœur de conflits entre états, au premier rang desquels on peut citer celui qui oppose Israël et les pays arabes, ainsi que ceux émergeant aujourd'hui en raison du contrôle des sources de l'Euphrate par la Turquie aux dépens de la Syrie, ou des sources du Nil par l'Égypte, face à l'Éthiopie et au Soudan notamment.

Avec le changement climatique global, un autre défi majeur de ce nouveau siècle est celui de l'érosion de la diversité biologique qui s'accélère de façon dramatique ces derniers temps. Dans sa relation plus que mouvementée avec la nature, l'homme est en effet responsable aujourd'hui de l'extinction de nombreuses espèces, tandis que beaucoup d'autres sont menacées, au point que certains prophétisent une « 6^e extinction » (Leakey & Lewin 1996²). Certes, les paléontologues en dénombrent déjà cinq, dont la plus connue, due à un astéroïde ou à des éruptions volcaniques cataclysmiques, fit disparaître les dinosaures, à la fin du Crétacé, il y a 65 millions d'années, et avec eux, de 65 à 70 % des espèces vivant sur la planète. Il y eût pire encore, voilà 245 millions d'années, au Trias, quand une autre catastrophe planétaire balaya 96 % des espèces ! La biosphère s'est toujours relevée de ces impitoyables massacres qui ont même eu, parfois, le mérite de favoriser l'avènement d'espèces nouvelles. Mais, né de la dernière extinction de masse, sans laquelle il ne serait resté qu'un vague potentiel génétique dans les chromosomes d'un mammifère primitif, l'homme pourrait-il disparaître avec celle qu'il est en train de déclencher ?

Aujourd'hui, nous le savons tous, garantir le développement durable de la biosphère constitue un enjeu contemporain majeur de notre société humaine. Cette question cruciale repose sur nos capacités futures à gérer de façon équilibrée les écosystèmes et enrayer ainsi l'érosion actuelle de leur biodiversité.

C'est dans cette perspective que, bien plus près de nous, j'entends modestement inscrire mes travaux sur les peuplements piscicoles des écosystèmes fluviaux. Il s'agit fondamentalement pour moi de mieux connaître et comprendre les effets des activités humaines sur le fonctionnement de ces écosystèmes, pour être à terme capable de les anticiper et de les prévoir.

Les fleuves figurent parmi les écosystèmes les plus altérés par le développement des activités socio-économiques qui s'exercent sur leur bassin (navigation, agriculture, irrigation, extraction de sable et de

¹ Commission du développement durable des Nations Unies, 1997. Rapport sur la préparation de la session extraordinaire de l'Assemblée générale. Report EARTH SUMMIT+5, Special session of the General assembly to review and appraise the implementation of Agenda 21, United Nations, June 23-27, 1997, A/S-19/14-E/1997/60, New York, 92 p.

² Leakey R. & Lewin R., 1996. *The sixth extinction*. Weidenfield & Nicolson, London.

graviers, évacuation de déchets, électricités, etc.). Ces écosystèmes sont complexes et sont l'objet de nombreux enjeux d'usage. Avec l'intensification des multiples pressions humaines, en particulier depuis les deux derniers siècles, dans nos pays développés, ces écosystèmes ont subi de profondes modifications qui conduisent à la désorganisation de leur fonctionnement écologique. Cette désorganisation réduit les services et les biens qu'ils sont susceptibles de rendre, et elle menace ainsi, non seulement leur devenir, mais aussi celui de nos sociétés qui en dépendent étroitement.

Mieux gérer ces milieux et les ressources qu'ils représentent est donc une nécessité impérieuse. Mais la gestion écologique globale de ces différents enjeux n'est pour l'instant pas incluse efficacement dans les politiques publiques car elle reste encore très difficile, faute d'outils adaptés.

Pour optimiser la gestion de ces milieux, les gestionnaires ont (auront) besoin en particulier de modèles pour prédire les impacts des actions humaines, caractériser des stratégies optimisées, évaluer et proposer d'éventuels travaux de réhabilitation dont l'efficacité écologique soit précisée.

Le point de départ de ma démarche est donc d'utiliser le poisson comme « modèle » biologique, permettant de mieux comprendre le fonctionnement global des écosystèmes aquatiques. Je m'intéresse en particulier à l'identification et à la hiérarchisation des différents facteurs responsables de l'organisation et de la structuration de leurs peuplements. À travers ces peuplements, je cherche à mieux connaître et comprendre les conséquences des modifications d'origine naturelle ou anthropique, auxquelles sont soumis les milieux aquatiques continentaux. À terme, mon ambition est le développement d'outils d'aide à la gestion écologique globale à l'échelle d'un bassin fluvial.

Certes, on peut me reprocher d'osciller sans cesse entre milieu et poissons, mais à travers cette dualité de point de vue, ce que je veux affirmer avant tout, c'est qu'au-delà des poissons, c'est bien toute la question du devenir de l'homme qui me motive.

1.2 La Seine : un modeste cours d'eau supportant une exceptionnelle pression humaine

La Seine est un petit cours d'eau. Avec ses 776 km de longueur et son bassin versant de 73 700 km² de superficie, soit 12 % du territoire national, la Seine est en effet un fleuve de dimension modeste ; c'est le troisième s'écoulant en France, après la Loire (1 020 km ; 121 000 km²) et le Rhône (812 km ; 99 000 km²).

Ses débits moyens annuels sont estimés à 435 m³.s⁻¹ à Poses, dernier barrage avant son embouchure. Son régime hydrologique est de type pluvial-océanique, marqué par des crues hivernales ou printanières pouvant atteindre 2000 m³.s⁻¹ et des étiages estivaux de l'ordre de 150 m³.s⁻¹.

Une grande homogénéité caractérise son bassin versant. Son climat est de type océanique sur toute sa superficie, où ne s'expriment que de faibles gradients de pluviométrie et de température. Les sols drainés sont de nature essentiellement sédimentaire, caractérisés par une structure en auréoles concentriques, s'étageant du début du secondaire (Trias) au tertiaire supérieur (Miocène) et s'appuyant sur des massifs anciens (socle) ; ce socle correspondant à environ 3 % de la superficie du bassin est représenté par les affleurements cristallins du Morvan, au sud-est, et ceux métamorphiques des Ardennes, au nord-est. Seulement 1 % du bassin dépasse 550 m et la majorité des affluents de la Seine prennent leur source à des altitudes inférieures à 500 m, à l'exception de l'Yonne (700 m).

L'originalité de la Seine, c'est l'intense activité humaine qu'elle supporte sur son bassin versant. À cet égard, les chiffres sont éloquentes : 16,6 M d'habitants, le quart de la population française, dont plus de 10 M concentrés sur les 2 500 km² de l'agglomération parisienne ; un tiers de la production agricole et

industrielle nationale (Guerrini *et al.* 1998¹). À elle seule, la Seine représente en longueur 25 % du réseau fluvial français et supporte 50 % du trafic national. Le Port Autonome de Paris est ainsi le deuxième port fluvial européen, avec un trafic de 25 millions de tonnes par an, faisant de la Seine la deuxième voie naviguée d'Europe après le Rhin (Mouchel *et al.* 1998²).

Cette très forte densité de population (230 ind.km⁻²) situe la Seine en cinquième position derrière la Tamise (600 ind.km⁻²), l'Escaut (580 ind.km⁻²), la Meuse (400 ind.km⁻²) et le Rhin (300 ind.km⁻²) (Guerrini *et al.* 1998³). Exprimée par la population du bassin versant rapportée au débit moyen annuel, la pression humaine exercée sur le fleuve, place la Seine au deuxième rang mondial derrière la Tamise (Lamontagne & Baribeau 1992⁴).

C'est dire si les pressions qui pèsent sur l'écosystème sont fortes et variées ! La Seine représente en effet un exemple parfait de tous les usages de l'eau que l'homme a pu imaginer, résultat d'une longue cohabitation des hommes et du fleuve (Mouchel *et al.* 1998⁵).

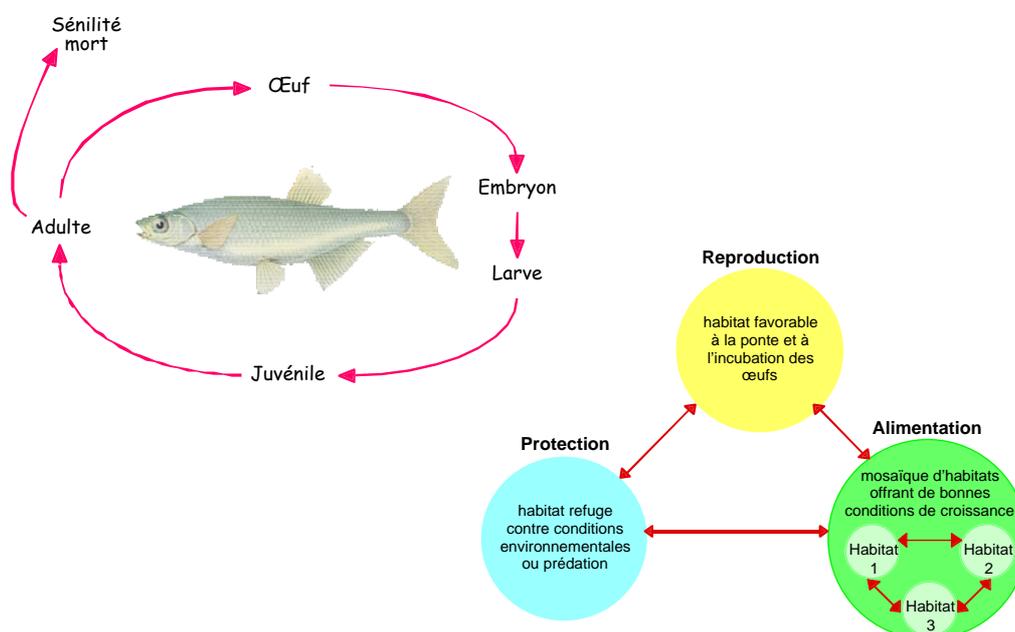


Figure 1. Cycle biologique des poissons : principaux stades de développement et schématisation des déplacements nécessaires à son accomplissement (d'après Nikolsky 1963, Harden Jones 1968 & Schlosser 1991).

1.3 Le poisson intégrateur fonctionnel

Le point de départ de ma démarche est d'utiliser les communautés de poissons comme outil de diagnostic de la qualité écologique des milieux aquatiques. Outre leur vertu symbolique hautement médiatique, les poissons constituent en effet d'excellentes « sentinelles » de la qualité des milieux aquatiques.

¹ Guerrini M.-C., Mouchel J.-M., Meybeck M., Penven M.-J., Hubert G. & Muxart T., 1998. *Le bassin de la Seine : la confrontation du rural et de l'urbain*. p. 29-75, in: M. Meybeck, G. de Marsily & E. Fustec (Éds), *La Seine en son bassin. Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé*, Elsevier, Paris.

² Mouchel J.-M., Boët P., Hubert G. & Guerrini M.-C., 1998. *Un bassin et des hommes : une histoire tourmentée*. p. 77-125, in: M. Meybeck, G. de Marsily & E. Fustec (Éds), *La Seine en son bassin. Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé*, Elsevier, Paris.

³ *Ibid.*

⁴ Lamontagne M. & Baribeau T., 1992. L'évaluation comparative des grands fleuves. *Rev. Géographie Lyon*, 67 (4), 265-272.

⁵ *Ibid.*

Pour accomplir leur cycle biologique (Figure 1), les poissons doivent en effet pouvoir se déplacer librement entre différents types d'habitats adéquats pour se reproduire, s'alimenter ou se protéger (Nikolsky 1963¹, Harden Jones 1968², Schlosser 1991³). Selon les espèces, les exigences biologiques vis-à-vis des caractéristiques de ces habitats sont extrêmement variées et plus ou moins strictes ; elles évoluent au cours du temps, en fonction des saisons et selon le stade de développement des individus (stade larvaire, juvénile ou adulte).

Cas extrême, le saumon atlantique, qui grandit en Mer du Nord, doit par exemple pouvoir circuler librement sur l'ensemble de l'axe fluvial pour remonter jusqu'à ses frayères, situées dans les petits cours d'eau des têtes de bassin.

Ces organismes dépendent donc étroitement de multiples paramètres de leur milieu écologique qui s'expriment à différentes échelles de temps et d'espace. Leurs peuplements rendent ainsi compte des qualités écologiques des rivières, notamment de la diversité des habitats offerts et de leur intégrité hydrologique (Schiemer & Spindler 1989⁴), voire plus globalement de leur intégrité biotique (Karr 1981⁵, 1991⁶). On les considère comme d'excellents « *intégrateurs* » du fonctionnement global des écosystèmes aquatiques dont ils constituent une bonne expression de « *l'état de santé* » (Fausch *et al.* 1990⁷).

Les peuplements piscicoles sont ainsi utilisés pour apprécier la qualité et l'évolution des milieux aquatiques. Ceci, au travers d'indices, fondés sur leur composition et leur structure, comme l'indice d'intégrité biotique (IBI, pour « *index of biotic integrity* » ; Karr *et al.* 1986⁸), dont l'utilisation se développe largement outre-Atlantique, et qui est actuellement en cours de mise en œuvre à l'échelle nationale (Oberdorff & Hughes 1992⁹, Oberdorff *et al.* 2001^{10,11}) en accompagnement de la mise en place du réseau hydrobiologique et piscicole (RHP) par le Conseil supérieur de la pêche et les Agences de l'eau.

Les poissons sont en effet susceptibles de réagir rapidement à des changements brutaux et localisés de leur environnement, fuite ou mortalité massive en raison d'une pollution accidentelle, par exemple, mais leur capacité d'indicateur biologique s'exprime surtout pour des processus se déroulant sur de larges échelles d'espace et pour de longues périodes de temps. Ils répondent en particulier à des processus se déroulant à des pas de temps et des échelles d'espace, plus grands que les autres indicateurs biologiques couramment utilisés, comme les algues ou les macroinvertébrés.

La « cible » de mes recherches est donc le fonctionnement de l'écosystème aquatique, que j'investigue à travers les peuplements de poissons. Il s'agit fondamentalement pour moi d'évaluer les effets des activités humaines sur ce fonctionnement.

¹ Nikolsky G.V., 1963. *The ecology of fishes*. Academic Press, London, 352 p.

² Harden Jones F.R., 1968. *Fish migration*. Edward Arnold, London, 325 p.

³ Schlosser I.J., 1991. Stream fish ecology : a landscape perspective. *Bioscience*, 41 (10), 704-712.

⁴ Schiemer F. & Spindler T., 1989. Endangered fish species of the Danube river in Austria. *Regulated Rivers*, 4 (4), 397-407.

⁵ Karr J.R., 1981. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries*, 6 (6), 21-27.

⁶ Karr J.R., 1991. Biological integrity : a long-neglected aspect of water resource management. *Ecol. Appl.*, 1 (1), 66-84.

⁷ Fausch K.D., Lyons J., Karr J.R. & Angermeier P.L., 1990. *Fish communities as indicators of environmental degradation*. p. 123-144, *In*: S.M. Adams (Eds), "Biological indicators of stress in fish", American Fishery Society Symposium, 8.

⁸ Karr J.R., Fausch K.D., Angermeier P.L., Yant P.R. & Schlosser I.J., 1986. Assessing biological integrity in running waters: a method and its rationale. *Illinois Natural History Survey Special Publication*, 5, 28 p.

⁹ Oberdorff T. & Hughes R.M., 1992. Modification of an Index of Biotic Integrity based on fish assemblages to characterize rivers of the Seine Basin, France. *Hydrobiologia*, 228 (2), 117-130.

¹⁰ Oberdorff T., Pont D., Huguény B., Boët P., Porcher J.-P. & Chessel D., 2001. *Adaptation à l'ensemble du réseau hydrographique d'un indice de qualité écologique fondé sur les peuplements de poissons : résultats actuels et perspectives*. p. 95-124, *in*: J. Lemoalle, F. Bergot & M. Robert (Éds), État de santé des écosystèmes aquatiques. De nouveaux indicateurs biologiques, Cemagref, Paris.

¹¹ Oberdorff T., Pont D., Huguény B. & Chessel D., 2001. A probabilistic model characterizing fish assemblages of French rivers : a framework for environmental assessment. *Freshwater Biology*. 46, 399-415.

L'ambition ultime est le développement d'outils d'aide à la décision et à l'évaluation des choix technologiques en matière d'aménagement et de réhabilitation, en vue d'une gestion équilibrée du patrimoine aquatique.

Aujourd'hui, dans le cadre du thème de recherche « *Déterminants physiques du fonctionnement écologique des hydrosystèmes d'eau courante* » du département Gestion des milieux aquatiques (GMA), mes recherches portent principalement les relations entre les poissons et leur habitat. Celles-ci sont en effet indispensables pour mieux connaître et comprendre l'influence des différents facteurs qui régissent les processus d'organisation et de structuration des peuplements piscicoles, afin de pouvoir prévoir les conséquences des modifications d'origine naturelle ou anthropique, auxquelles sont soumis les milieux aquatiques continentaux.

1.4 Une démarche intégrant l'ensemble du bassin

Mes travaux sur les écosystèmes fluviaux ont démarré en 1989. D'emblée, j'ai choisi de privilégier une approche intégrant l'ensemble du bassin hydrographique.

À l'époque, il s'agissait ainsi de traduire en termes scientifiques une attente collective en pleine émergence alors que se mettait en place la Délégation de bassin et que se profilait la nouvelle loi sur l'eau de janvier 1992. Ceci offrait aussi la possibilité de valoriser un vaste ensemble de données déjà acquises, résultats de pêches électriques antérieures, ayant nécessité des investissements importants, tant au plan humain que financier, mais qui n'avaient encore jamais été ni rassemblées, ni exploitées.

Une telle démarche d'ordre systémique impose un point de vue évolutif. Un système écologique, en effet, ne peut pas être considéré comme une unité figée et stable car il est en réalité l'objet d'une dynamique évolutive continue. Ne considérer son état qu'à un instant donné rend ainsi illusoire la complète compréhension de sa structure et de son fonctionnement (Barbault & Stearns 1991¹).

Un système écologique est un système adaptatif complexe, auto-organisé, dont les propriétés globales émergent d'interactions locales et de la sélection de processus agissant aux niveaux inférieurs de ses composants. Un aspect essentiel de tels systèmes est la non-linéarité et l'une des plus importantes conséquences de la sélection par étapes des processus (et des structures), est la dépendance de chaque état donné à son histoire évolutive unique. Certains auteurs parlent ainsi de dépendance historique (Levin 1998²). Et cette prise de conscience relativement récente de l'importance de la dimension historique est considérée de nos jours comme l'une des étapes majeures des dernières décennies en écologie (Barbault 1992³).

Pour mieux cerner les objets écologiques, il est donc essentiel de prendre en compte leur dimension évolutive. *A fortiori*, s'agissant de communautés biologiques, cette dimension est indispensable (Blondel 1986⁴, Ricklefs 1987⁵, Ricklefs & Schluter 1993⁶).

Les peuplements piscicoles en place aujourd'hui résultent en effet de processus évolutifs et structurels anciens, qui relèvent de la biogéographie. Ils portent également la trace des conditions passées et contemporaines de leur environnement écologique, lesquelles ont été largement influencées par les actions humaines (Blondel 1986⁷).

¹ Barbault R. & Stearns S., 1991. Toward an evolutionary ecology linking species interactions, life-history strategies and community dynamics : an introduction. *Acta Oecol.*, 12 (1), 3-10.

² Levin S.A., 1998. Ecosystems and the biosphere as complex adaptive systems. *Ecosystems*, 1 (5), 431-436.

³ Barbault R., 1992. *Écologie des peuplements. Structure, dynamique et évolution*. Masson, Paris, 273 p.

⁴ Blondel J., 1986. *Biogéographie évolutive*. Coll. Écologie n° 20, Masson, Paris, 221 p.

⁵ Ricklefs R.E., 1987. Community diversity : relative roles of local and regional processes. *Science*, 235, 167-171.

⁶ Ricklefs R.E. & Schluter D. [Eds], 1993. *Species diversity in ecological communities: historical and geographical perspectives*, The University of Chicago Press, Chicago, 414 p.

⁷ *Ibid.*

Pour apprécier pleinement leur signification actuelle, il est donc nécessaire de hiérarchiser différentes échelles de perception temporelle et spatiales auxquelles correspondent différents niveaux d'organisation biologique (Frissell *et al.* 1986¹, Tonn *et al.* 1990²).

Les propriétés qui découlent des théories sur l'organisation hiérarchique des systèmes ont guidé mes choix des variables descriptives et des échelles à considérer (Allen & Starr 1982³, O'Neill 1989⁴). La perception des phénomènes écologiques est en effet très fortement liée aux échelles spatiales et temporelles d'observation : il y a dépendance d'échelle (Wiens 1989⁵, Levin 1992⁶). Ainsi, les changements d'échelle peuvent modifier complètement l'importance des variables à prendre en compte. L'élargissement du champ d'étude, par exemple, s'il gomme certains détails, favorise l'émergence de propriétés nouvelles, invisibles à des échelles trop précises.

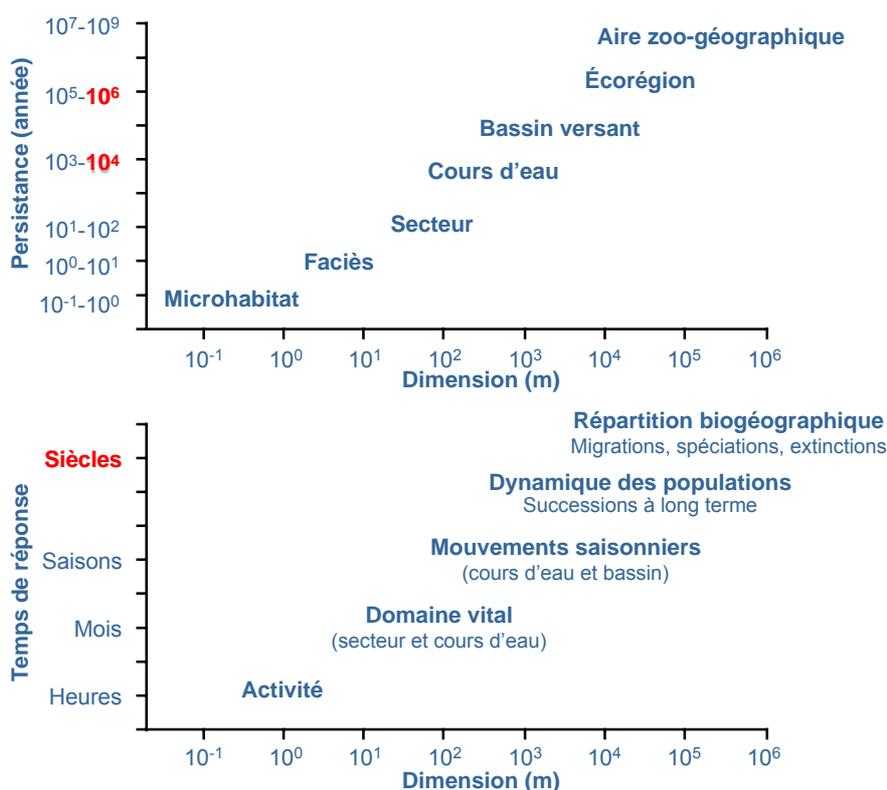


Figure 2. Échelles de temps et d'espace en écologie fluviale. Correspondance entre les unités de milieux et les processus biologiques (d'après Frissell *et al.* 1986).

S'agissant des poissons et des écosystèmes fluviaux (Figure 2), les échelles spatiales et temporelles sont très liées (Bayley & Li 1992⁷). Les échelles de temps sont complexes. Celles qui concernent la

¹ Frissell C.A., Liss W.J., Warren C.E. & Hurley M.D., 1986. A hierarchical framework for stream habitat classification : viewing streams in a watershed context. *Environmental Management*, 10 (2), 199-214.

² Tonn W.M., Magnuson J.J., Rask M. & Toivonen J., 1990. Intercontinental comparison of small-lake fish assemblages : the balance between local and regional processes. *Am. Nat.*, 136 (3), 345-375.

³ Allen T.F.H. & Starr T.B., 1982. *Hierarchy : perspectives for ecological complexity*. Univ. Chicago Press, 310 p.

⁴ O'Neill R.V., 1989. *Perspective in hierarchie and scale*. p. 140-156, in: J. Roughgarden, R.M. May & S.A. Levin (Eds), *Perspectives in ecological theory*. Princeton Univ. Press.

⁵ Wiens J.A., 1989. Spatial scaling in ecology. *Functional Ecology*, 3, 385-397.

⁶ Levin S.A., 1992. The problem of pattern and scale in ecology. *Ecology*, 73, 1943-1967.

⁷ Bayley P.B. & Li H.W., 1992. *Riverine fishes*. p. 251-281, in: P. Calow & G.E. Petts (Eds), *The rivers handbook : hydrological and ecological principles*, Blackwell, Oxford.

persistance des unités de l'environnement sont, à échelle spatiale égale, d'un ordre deux à trois fois supérieur aux échelles écologiques correspondantes.

Au plan pratique, cela veut dire que les conséquences et la récupération de perturbations dépendent de l'échelle, vis-à-vis des poissons comme des unités de milieu. De même, s'agissant de préservation ou de restauration, le succès à une échelle donnée (chenal ou micro-habitat) dépend de la prise en compte du niveau supérieur (contexte régional).

En outre, il semble important de remarquer que de ce point de vue, certaines des modifications physiques imposées par l'homme, altération du bassin versant, édification de barrage régulateur ou chenalisation du lit mineur par exemple, s'inscrivent dans des gammes de temps proches de celles qui concernent les phénomènes évolutifs.

2 Une indispensable mise en perspective

En premier lieu, pour bien comprendre la situation actuelle du peuplement piscicole de la Seine, il est nécessaire de la resituer dans sa dimension historique.

Cette prise en compte de l'histoire est une nécessité, non seulement au plan de l'écologie (aspects biogéographiques notamment), mais également vis-à-vis des relations entre les sociétés humaines et leur environnement (évolution des perceptions).

Savoir, en effet, comment s'est constituée la faune d'une région, comment elle a évolué ou comment se succèdent les peuplements depuis plusieurs milliers d'années apporte beaucoup, surtout si cette histoire tente d'y inclure l'histoire de l'impact de l'homme (Lecomte 1999¹). En particulier, cette étape est utile pour définir une « référence » et elle permet d'apprécier combien cette dernière ne peut qu'être relative. Car il convient assurément de ne pas tomber dans le piège qui ferait dire que ce qui est naturel est l'état du système tel qu'on peut l'imaginer, il y a deux mille ans, et qu'il faut tenter d'y revenir (Figure 3). Il s'agit davantage de connaître la « naturalité » d'hier pour mieux apprécier celle d'aujourd'hui et tenter d'accompagner celle de demain (Lecomte 1999²).

L'influence de l'homme s'exerce en effet dans la logique d'un système écologique évolutif et « la flèche du temps » fait que le futur ne peut pas rejoindre le passé.



Figure 3. La Seine au niveau du site de Paris aux époques pré- et protohistorique (d'après une maquette réalisée par L. Renou 1991, Musée Carnavalet, in Velay 1992³).

¹ Lecomte J., 1999. Réflexion sur la naturalité. *Courrier de l'environnement de l'INRA*, 37, 5-10.

² *Ibid.*

³ Velay P., 1992. *De Lutèce à Paris - L'île et les deux rives*. Coll. Patrimoine au présent, Caisse Nationale des Monuments Historiques et des Sites - Presses du CNRS, Paris, 128 p.

2.1 Une faune appauvrie par les glaciations

La connaissance de l'évolution biogéographique de la faune ichtyologique à l'échelle des continents permet de reconstituer la faune originelle de la Seine et d'apprécier ses caractéristiques majeures, comparé aux autres bassins fluviaux ouest-européens, voire nord-américains.

Assez riche et relativement homogène à travers toute l'Europe occidentale à la fin du pliocène, la faune originelle du continent européen a été fortement décimées lors des différents épisodes glaciaires du début du quaternaire, au Pléistocène, il y a 1,8 millions d'années. Les espèces les plus thermophiles ont massivement disparu. Leur retrait vers le Sud a été limité par l'existence de chaînes montagneuses et de bras de mer.

À l'échelle intercontinentale, ces événements permettent de comprendre la relative pauvreté de notre faune piscicole ouest-européenne (193 espèces ; Lelek 1987¹), comparé au continent nord américain (950 espèces ; Moyle & Leidy 1992²), où la survie des espèces a été favorisée par l'orientation nord-sud du réseau hydrographique, *via* le bassin du Mississippi.

Sur notre continent ouest-européen, un nombre infime de « résistants glaciaires » (*sensu* Thienemann 1925³) ont survécu. Il s'agit des espèces capables de supporter des températures très basses et tolérant la salinité (euryhalines), en particulier les espèces migratrices, comme l'anguille ou les Salmonidés. Mais la majorité des poissons d'Europe occidentale aujourd'hui est constituée d'espèces immigrantes postglaciaires. Elles proviennent principalement du refuge danubien (Banarescu 1989⁴), à partir duquel elles ont ensuite recolonisé les autres grands systèmes fluviaux environnants.

À l'échelle régionale, ceci explique la large répartition géographique de la quasi-totalité des espèces rencontrées sur le continent européen, ainsi que la diminution graduelle est-ouest du nombre d'espèces observées dans les principaux bassins hydrographiques. En effet, plus de 100 espèces sont dénombrées dans le bassin du Danube (Bacalbasa-Dobrovici 1989⁵), 60 dans le bassin du Rhin (Lelek 1989⁶), 58 dans le bassin du Rhône (Pattée 1988⁷) et 50 dans celui de la Loire (Arrignon 1988⁸).

C'est ainsi que, situé relativement à l'écart des autres cours d'eau centro-européens, le bassin de la Seine se présente primitivement comme un sous-ensemble appauvri de la faune médio-européenne, avec un fond faunistique indigène réduit, estimé entre 24 et 33 espèces, et constitué d'une importante composante en espèces amphihalines (Belliard 1994⁹, Belliard *et al.* 1995¹⁰).

De ces processus évolutifs découlent par ailleurs certains traits biologiques des espèces piscicoles européennes : plutôt de grandes tailles et mobiles, certaines étant capables d'effectuer de longs

¹ Lelek A., 1987. *The freshwater fishes of Europe. Vol. 9 Threatened fishes of Europe*. European Committee for the Conservation of Nature and Natural Resource, Council of Europe, n° 9 (10), AULA-Verlag, Wiesbaden.

² Moyle P.B. & Leidy R.A., 1992. *Loss of Biodiversity in aquatic ecosystems : evidence from fish faunas*. p. 127-169, in: P.L. Fiedler & S.K. Jain (Eds), *Conservation biology : the theory and practice of nature conservation, preservation and management*, Routledge Chapman & Hall Inc., New York.

³ Thienemann A., 1925. *Die Binnengewässer Mitteleuropas. Eine limnologische Einführung. Die Binnengewässer, Stuttgart*, 1, 1-255.

⁴ Banarescu P.M., 1989. *Zoogeography and history of the freshwater fish fauna of Europe*. p. 88-107, in: J. Holcick (Ed.), *The freshwater fishes of Europe. Vol. 1/II : General introduction to fishes Acipenseriformes.*, Aula-Verlag, Wiesbaden.

⁵ Bacalbasa-Dobrovici N., 1989. *The Danube River and its fisheries*. p. 455-468, in: D.P. Dodge (Ed.), "Proceeding of the International Large River Symposium (LARS)", Ontario, Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci., 106.

⁶ Lelek A., 1989. *The Rhine River and some of its tributaries under human impact in the last two centuries*. p. 469-487, in: D.P. Dodge (Ed.), "Proceeding of the International Large River Symposium (LARS)", Ontario, Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci., 106.

⁷ Pattée E., 1988. Fish and their environment in large european river ecosystems. The Rhône. *Sciences de l'Eau*, 7 (1), 35-74.

⁸ Arrignon J., 1988. Fish and their environment in large european river ecosystems. The Loire. *Sciences de l'Eau*, 7 (1), 21-34.

⁹ Belliard J., 1994. Le peuplement ichtyologique du bassin de la Seine : rôle et signification des échelles temporelles et spatiales. *Thèse Doct. Univ. Paris VI*, 197 p.

¹⁰ Belliard J., Boët P. & Allardi J., 1995. Evolution à long terme du peuplement piscicole du bassin de la Seine. *Bull. Fr. Pêche et Pisciculture*, 337/338/339, 83-91.

déplacements, plutôt généralistes et doués d'une certaine plasticité écologique, à niches écologiques plutôt larges. Alors qu'en revanche, en Amérique du Nord, où la spéciation s'est poursuivie, les espèces sont davantage de petite taille, peu mobiles et plus spécialisées, à niches écologiques étroites (Mahon 1984¹).

Enfin, la recolonisation étant finalement en grande partie liée au hasard, les peuplements s'avèrent non-saturés (Belkessam *et al.* 1997²), raison pour laquelle sans doute, les introductions ultérieures ont si bien réussi.

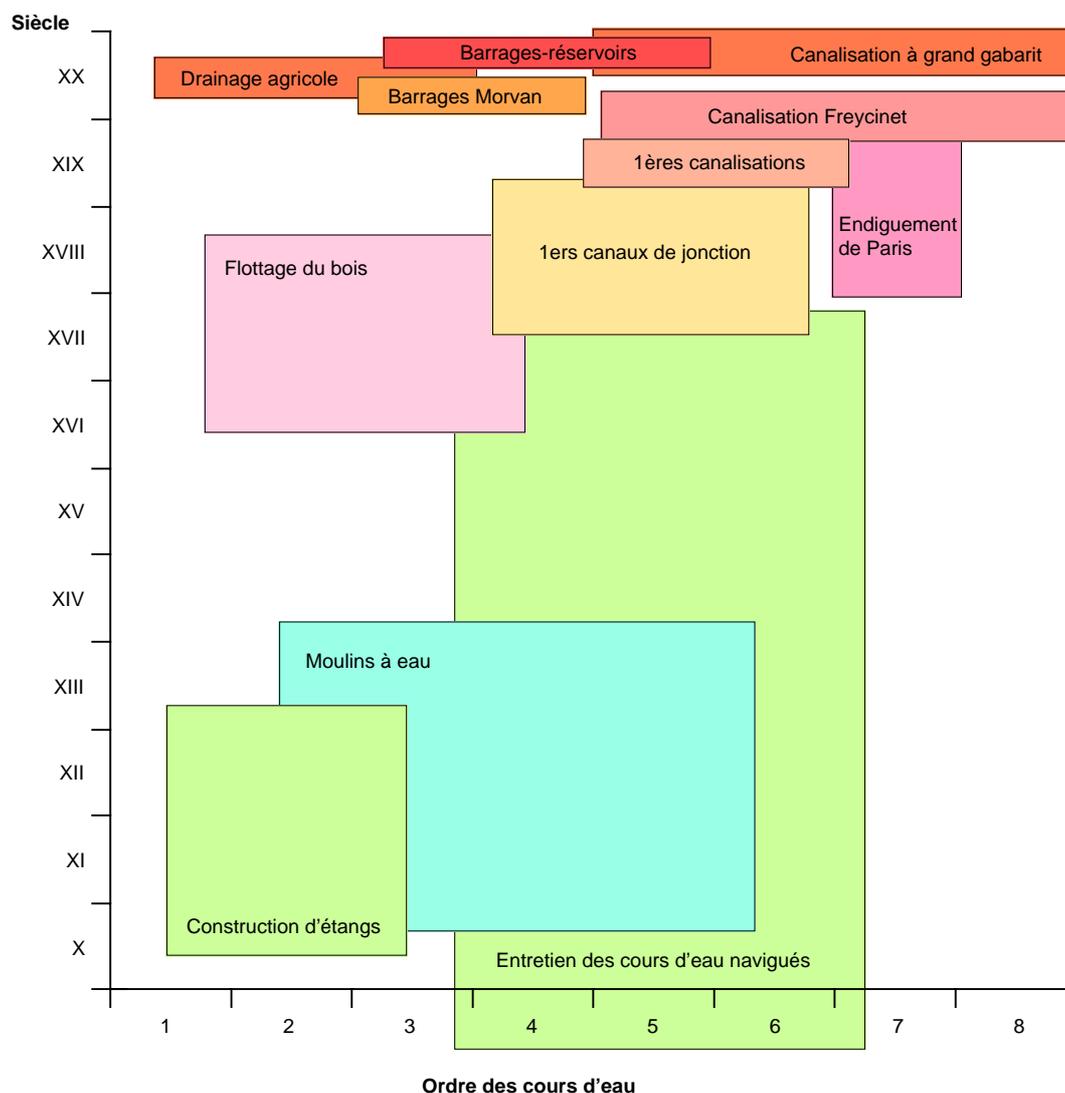


Figure 4. Évolution des interventions humaines sur le linéaire de rivière dans le bassin de la Seine, en fonction de l'ordre des cours d'eau (d'après Mouchel *et al.* 1998³).

¹ Mahon R., 1984. Divergent structure in fish Taxocenes of north temperate streams. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 41, 330-350.

² Belkessam D., Oberdorff T. & Huguény B., 1997. Unsaturated fish assemblages in rivers of the North-Western France : potential consequences for species introductions. *Bull. Fr. Pêche et Pisciculture*, 344/345, 193-204.

³ *Op. cit.* n. 2, p. 17.

2.2 Une évolution fortement marquée par l'Homme

Ce fond faunistique originel s'est ensuite trouvé rapidement marqué par des facteurs d'origine anthropique qui sont progressivement devenus prépondérants en même temps qu'évoluaient les activités humaines et les modes de gestion des cours d'eau.

D'abord limité tout au long de la Préhistoire, l'impact de l'homme s'est progressivement accentué au cours de son développement tandis que progressaient ses capacités d'intervention sur les milieux naturels (Figure 4). Aux premières modifications de l'environnement survenues dès le Néolithique, ont succédé depuis le Bas Moyen Âge des transformations des cours d'eau eux-mêmes, ainsi qu'une quantité croissante de rejets polluants, qui ont entraîné d'importants changements de la composition spécifique du peuplement : introduction, colonisation et disparition d'espèces.

Les premières modifications touchant la composition de la faune piscicole du bassin sont liées à des introductions d'espèces. Dès l'Antiquité, la carpe aurait été disséminée à travers l'Europe par les légions romaines. Au cours du Moyen Âge, les communautés religieuses ont ensuite contribué aux transferts entre bassins hydrographiques de plusieurs espèces d'étangs de pisciculture, notamment la tanche, le rotangle ou le carassin. Les canaux de jonction entre bassins, motivés par les besoins de la navigation, ont favorisé la colonisation d'espèces comme le hotu ou la grémille. À la fin du siècle dernier, la truite arc-en-ciel, la perche-soleil, le poisson-chat ou le black bass furent importés d'Amérique du nord par les naturalistes, pris d'engouement pour les introductions et les essais d'acclimations. Ces introductions se sont poursuivies au cours du XX^e siècle conduisant à l'extension de l'aire géographique d'espèces européennes (sandre, ombre, silure).

Par leur nombre, ces arrivées mettent à mal non seulement la naturalité mais aussi la biodiversité autochtone. Avec l'arrivée du sandre par exemple, est apparue la bucéphalose larvaire, qui affecte les poissons blancs de la famille des cyprinidés, et fut observée à partir de 1966 dans le bassin de la Seine (de Kinkelin *et al.* 1967¹).

Parallèlement, les obstacles infranchissables engendrés par les barrages-écluses, conjointement à la pollution, entraînaient la disparition progressive de toutes les espèces migratrices, esturgeon, saumon, lamproie ou aloses, incapables de rejoindre leurs lieux de reproduction, à l'exception de l'anguille.

À cette échelle historique, le bilan du développement des interventions humaines sur le bassin se solde par la disparition de 7 espèces (20 à 30 % de la faune d'origine), principalement migratrices, et en revanche, l'introduction d'au moins 19 espèces nouvelles (40 % du peuplement actuel), venues enrichir le peuplement originel (Belliard *et al.* 1995²).

2.3 Effet structurel des aménagements du siècle dernier

L'explosion industrielle du XIX^e siècle, entraînant un bouleversement des rapports entre l'homme et son milieu, annonça l'ère des grandes pollutions contemporaines. Dans le cas de la Seine, le premier choc fut celui de la pollution organique engendrée par la politique du tout-à-l'égout et le rejet massif et direct des collecteurs qui centralisaient les eaux usées de Paris, dépassant largement les capacités auto-épuratrices du fleuve (Manéglier 1992³). Cette période a également été marquée par la modification radicale des caractéristiques morphologiques de la rivière, à la suite d'une nouvelle étape de modernisation de la voie d'eau.

La comparaison de la situation actuelle avec les données anciennes (Belliard *et al.* 1995⁴) permet de mesurer les modifications structurelles des communautés de certains secteurs de cours d'eau, depuis le

¹ de Kinkelin P., Tuffery G., Leynaud G. & Arrignon J., 1969. Etude épizootiologique de la bucéphalose larvaire à *Bucephalus polymorphus* Baer (1827) dans le peuplement piscicole du bassin de la Seine. *Bull. Fr. Piscicult.*, 234, 5-20.

² *Op. cit.* n. 10, p. 23.

³ Manéglier H., 1992. Une grande ville et un bassin, Paris et la Seine. *Rev. Géographie Lyon*, 67 (4), 299-303.

⁴ *Ibid.*

siècle dernier, et d'apprécier ainsi les effets des profonds bouleversements provoqués par l'intensification récente des actions humaines, notamment depuis la fin du XVIII^e siècle.

À cette échelle, dans la plupart des cas, les changements observés depuis 1850 sur le bassin de la Seine traduisent une remontée globale vers l'amont de communautés à dominante cyprinicole, normalement inféodées aux parties aval, lentes et profondes, des cours d'eau. Pour une large part, ces modifications s'expliquent par les seules transformations d'habitats survenues aux différentes étapes de la chenalisation du réseau fluvial.

Seul, le cas de l'Yonne amont se singularise, montrant une nette inversion d'évolution de 1950 à aujourd'hui. Cette situation s'explique par la mise ne service du barrage de Pannecièrre (1949) dont les eaux de restitution, issues des couches profondes, entraînent un refroidissement artificiel durable du cours d'eau aval conduisant à une dérive des peuplements vers des composantes à nouveau salmonicoles.

Ceci illustre l'utilité de données anciennes pour l'étude des peuplements piscicoles et, plus généralement, l'intérêt qu'offrent ces derniers comme indicateur de l'évolution des systèmes fluviaux, permettant ainsi de mieux comprendre les conséquences des perturbations engendrées par les activités humaines sur leur fonctionnement. Dans le cas présent, leur réponse à long terme s'avère différente selon la nature des aménagements.

Les poissons sont parmi les organismes aquatiques ayant été le plus précisément observés au cours des siècles passés ; ils peuvent ainsi constituer de précieux éléments de référence susceptibles d'aider aux orientations en matière d'aménagement ou de réhabilitation des milieux aquatiques.

3 Situation contemporaine des peuplements

Il s'agit ensuite d'établir les modalités d'organisation et de structuration des communautés piscicoles le long du gradient amont-aval, depuis les petits cours d'eau des têtes de bassin, jusqu'au bas cours. Celles-ci sont considérées selon un schéma de type *stream order*, paramètre très intégrateur des conditions de milieu, en fonction des écorégions afin de dégager des processus plus généraux, ou encore, selon des groupes fonctionnels ou guildes (groupes d'espèces exploitant de façon identique une même catégorie de ressources) pour dépasser la simple description des structures en place et aboutir à leur analyse en termes d'organisation fonctionnelle.

L'étude systématique des variables physiques, chimiques ou biologiques, de l'ensemble des milieux du réseau fluvial est en effet un travail trop important pour être mené de façon exhaustive. Dans un premier temps, la sectorisation du réseau hydrographique et le découpage du bassin versant en régions homogènes peuvent être réalisés par l'analyse détaillée de cartes déjà définies : climat, topographie, géologie, végétation, substrat etc. (Dupias & Rey 1985¹, Hughes 1989, Wasson *et al.* 1993²).

3.1 Le réseau hydrographique « mis en ordre »

Le rang fluvial ou ordre des cours d'eau (« *stream order* » *sensu* Strahler 1957³) est utilisé comme descripteur général de la situation des tronçons de cours d'eau au sein du gradient amont aval dans le chevelu du réseau hydrographique, allant de 1 pour les ruisseaux sans affluent des têtes de bassin jusqu'à 8 pour la Seine à l'embouchure.

En écologie, l'ordre a été utilisé pour la première fois par Kuehne (1962⁴) et appliqué à l'analyse de la richesse piscicole dans un petit bassin versant par Sheldon (1968⁵). Le caractère synthétique de ce paramètre fortement lié aux paramètres physiques et fonctionnels des écosystèmes aquatiques explique son intérêt. Il rend compte en outre d'éventuelles discontinuités à l'intérieur du réseau fluvial, les changements d'ordre s'effectuant au niveau de confluences d'égales importances.

L'ordre sert par exemple de référentiel au schéma général d'organisation fonctionnelle des écosystèmes d'eau courante du *River continuum concept* (Vannote *et al.* 1980⁶). Il est aussi très souvent utilisé comme cadre de référence lors de la mise au point d'indices d'intégrité biotique (IBI) de détermination de la qualité des écosystèmes aquatiques à partir des peuplements piscicoles en place (Karr & Dudley 1981⁷, Fausch *et al.* 1984⁸, Bramblett & Fausch 1991⁹). Par ailleurs, l'ordre est également à la base du modèle « *Riverstrahler* » de fonctionnement écologique du bassin de la Seine (Billen *et al.* 1994¹⁰), développé au sein du PIREN-Seine.

¹ Dupias G. & Rey P., 1985. *Document pour un zonage des régions phyto-écologiques*, CNRS, 39 p. + cartes.

² Wasson J.-G., Bethemont J., Degorce J.-N., Dupuis B. & Joliveau T., 1993. Approche écosystémique du bassin de la Loire : éléments pour l'élaboration des orientations fondamentales de gestion. Phase I : Etat initial - Problématique. Rapport final Cemagref Lyon BEA/LHQ & Univ. Saint-Etienne CRENAM, juillet 1993, 102 p + Atlas 70 pl. et annexes.

³ Strahler A.N., 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 38, 913-920.

⁴ Kuehne R.A., 1962. A classification of streams, illustrated by fish distribution in an eastern Kentucky Creek. *Ecology*, 43 (4), 608-614.

⁵ Sheldon A.L., 1968. Species diversity and longitudinal succession in stream fishes. *Ecology*, 49, 193-198.

⁶ Vannote R.L., Minshall G.W., Cummins K.W., Sedell J.R. & Cushing C.E., 1980. The River Continuum Concept. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 37, 130-137.

⁷ Karr J.R. & Dudley D.R., 1981. Ecological perspective on water quality goals. *Environmental Management*, 5, 55-68.

⁸ Fausch K.D., Karr J.R. & Yant P.R., 1984. Regional application of an index of biotic integrity based on stream fish communities. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 113, 39-55.

⁹ Bramblett R.G. & Fausch K.D., 1991. Variable fish communities and the index of biotic integrity in a western Great Plains river. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 120, 752-769.

¹⁰ Billen G., Garnier J. & Hanset P., 1994. Modelling phytoplankton development in whole drainage networks : the RIVERSTRAHLER Model applied to the Seine river system. *Hydrobiologia*, 289, 119-137.

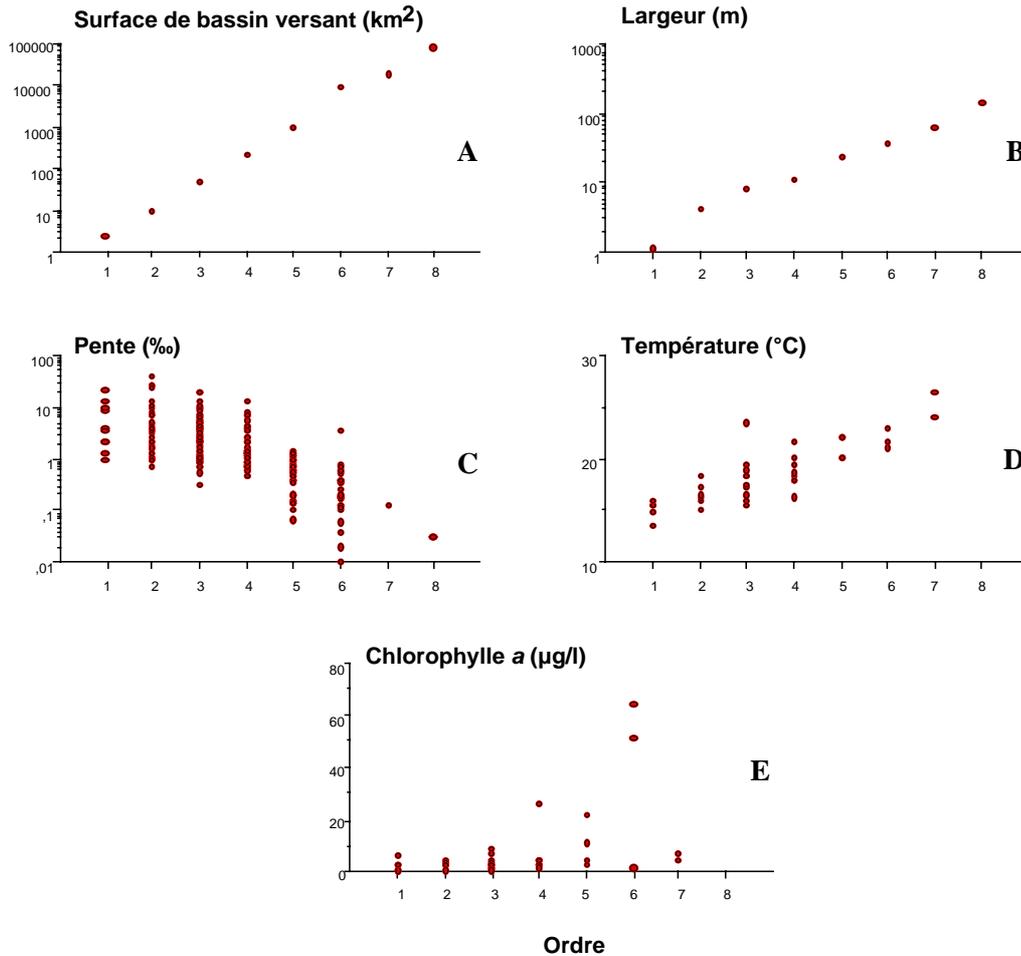


Figure 5. Évolution de quelques paramètres en fonction de l'ordre des cours d'eau sur le bassin de la Seine. A : surface de bassin versant (valeurs moyennes) ; B : largeur de cours d'eau (valeurs moyennes) ; C : pente du cours d'eau ; D : température de l'eau en Juillet ; E : concentration de l'eau en chlorophylle a en Juillet (d'après Hanset et al. 1991 in Belliard 1994¹).

La détermination de l'ordre dépend bien sûr des références utilisées, notamment de la prise en compte ou non des cours d'eau temporaires et de l'échelle des cartes (Hughes & Omernick 1983²). Elle est, en revanche, relativement facile et rapide à mettre en œuvre, contrairement à d'autres paramètres, comme la superficie de bassin versant ou la distance à la source*. La sensibilité de l'ordre à des facteurs régionaux climatiques ou géologiques est aussi critiquée parfois comme un obstacle à son utilisation généralisée en écologie. Mais en fait, tous les paramètres liés à la « taille » des cours d'eau (pente, débit, surface de bassin versant etc.) possèdent une composante régionale liée aux variations géologiques et climatiques. Et au contraire, l'utilisation de l'ordre peut permettre de dépasser ces différences régionales et conduire à une description plus générale des écosystèmes d'eau courante

¹ Op. cit. n. 9 p. 23.

² Hughes R.M. & Omernick J.M., 1983. *An alternative for characterizing stream size*. p. 87-101, in: T.D. Fontaine & S.M. Bartell (Eds), *Dynamics of lotic ecosystems*, Ann Arbor Science, Ann Arbor.

* Ceci n'est plus tout à fait exact maintenant que l'on dispose d'outils puissants, tels que les systèmes d'information géographique capables de faire ces types de calculs ; mais encore faut-il pour cela disposer de fonds de carte digitalisés ce qui représente un lourd labeur préalable...

(Naiman *et al.* 1992¹). En Outre, la connaissance de l'ordre d'un tronçon de cours d'eau permet de replacer celui-ci dans le contexte du réseau hydrographique (Cummins 1992²).

De fait, sur le bassin de la Seine, l'ordre s'avère très intégrateur de nombreuses caractéristiques des cours d'eau (Figure 5), tant morpho-dynamiques, pente, largeur, débit, vitesse ou granulométrie, que fonctionnelles, comme la température et l'oxygène dissous, par exemple, ou l'activité photosynthétique exprimée par la teneur en chlorophylle (Garnier *et al.* 1998³, Guerrini *et al.* 1998⁴).

3.2 Le bassin régionalisé

Pour comprendre l'organisation des peuplements piscicoles du bassin de la Seine à une échelle régionale, une démarche de type « écorégion » est aussi développée.

La régionalisation est en effet un outil intéressant dans la mesure où, comme le rang fluvial, elle offre également une description synthétique des informations sans en modifier le sens (Cummins 1992⁵). Ce concept de régionalisation est, en outre, une aide à la mise en place d'une gestion globale de l'écosystème (Bailey 1984⁶, Wasson 1994⁷).

Un fleuve est la résultante de son bassin (cf. Hynes 1975⁸ : « *la vallée gouverne le cours d'eau* »). Parallèlement à l'organisation longitudinale des rivières, les caractéristiques des bassins versants, des vallées et des rives sont en effet susceptibles d'induire des différences fonctionnelles importantes. Les facteurs de contrôle primaires de l'hydrosystème, la géologie et le climat, déterminent historiquement et actuellement le relief, la géomorphologie, la nature des sols, la couverture végétale, et donc l'hydrologie, la morphologie, la physico-chimie de l'eau. Ils conditionnent ainsi localement le fonctionnement de l'écosystème eau courante. Les conditions écologiques régionales aboutissent donc à façonner les systèmes aquatiques en différents types fonctionnels, auxquels devraient logiquement correspondre des peuplements qualitativement et/ou quantitativement distincts (Wasson *et al.* 1993⁹). Au plan fonctionnel en effet, les influences régionales et locales prédominent dans les mécanismes qui structurent les communautés biologiques.

Au plan pratique, comme toute gestion implique une certaine classification de l'espace en groupe d'entités écologiques, auxquels vont s'appliquer certaines règles et certaines actions, l'intérêt de la régionalisation est de fournir au niveau d'une région, un système de référence pour évaluer les potentialités et les perturbations des cours d'eau présentant des caractéristiques voisines des types décrits (Wasson 1994¹⁰).

Cette définition d'ensembles régionaux homogènes est aussi une question d'échelle d'observation : elle doit être appréciée au regard de l'hétérogénéité globale de l'espace analysé. Les régions écologiques (écorégions) du bassin de la Seine sont définies sur la base de la carte de France au

¹ Naiman R.J., Lonzarich D.G., Beechie T.J. & Ralph S.C., 1992. *General principles of classification and the assessment of conservation potential in rivers*. p. 92-123, in: P.J. Boon, P. Calow & G.E. Petts (Eds), *River conservation and management*, John Wiley & Sons, Chichester.

² Cummins K.W., 1992. *Catchment characteristics and river ecosystems*. p. 125-135, in: P.J. Boon, P. Calow & G.E. Petts (Eds), *River conservation and management*, John Wiley & Sons, Chichester.

³ Garnier J., Billen G., Hanset P., Testard P. & Coste M., 1998. *Développement algal et eutrophisation dans le réseau hydrographique de la Seine*. p. 593-626, in: M. Meybeck, G. de Marsily & E. Fustec (Eds), *La Seine en son bassin. Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé*, Elsevier, Paris.

⁴ *Op. cit.* n. 1, p. 17.

⁵ *Ibid.*

⁶ Bailey R.G., 1984. Testing an ecosystem regionalization. *Journal of Environmental Management*, 19, 239-248.

⁷ Wasson J.-G., 1994. *Ecorégions et systèmes de référence*. p. 37-47 "Les variables biologiques : des indicateurs de l'état de santé des écosystèmes aquatiques", Séminaire national, Paris, 2-3 novembre 1994, GIP-Hydrosystèmes, Ministère de l'Environnement, AGHTM.

⁸ Hynes H.B.N., 1975. The stream and its valley. *Verh. Internat. Verhein. Limnol.*, 19, 1-15.

⁹ *Op. cit.* n. 2, p. 27.

¹⁰ *Ibid.*

1/100 000 des régions phyto-écologiques établies par (Dupias & Rey 1985¹). Ces régions phyto-écologiques sont déterminées essentiellement par les conditions climatiques et géologiques, facteurs qui conditionnent la répartition à large échelle des écosystèmes. Sur le bassin de la Seine, le facteur géologique ressort de façon prépondérante. La carte de Dupias et Rey (1985²) offre 4 niveaux de lecture hiérarchisés. Le premier niveau est homologue à la carte des écorégions produite aux USA par (Omernick 1987³). Pour des raisons d'échantillonnage, c'est le deuxième niveau qui a été utilisé, donc un grain plus fin. Seule la région correspondant à l'agglomération parisienne est isolée en raison de son caractère très particulier. Dans ses grandes lignes, cette délimitation correspond à celle obtenue lors d'une approche préliminaire utilisant la méthodologie américaine de détermination des écorégions (Gallant *et al.* 1991⁴).

3.3 Les peuplements analysés en termes de guildes

Afin de dépasser la simple description des structures en place et aboutir à leur analyse en termes d'organisation fonctionnelle, les peuplements sont étudiés en termes de guildes ou groupes fonctionnels (Simberloff & Dayan 1991⁵, Austen *et al.* 1994⁶).

Pour les poissons d'eau douce, les guildes de reproduction sont les groupes fonctionnels les mieux définis. La classification établie par Balon (1975a⁷, 1975b⁸, 1981⁹) intègre l'ensemble des modes de reproduction rencontrés chez les poissons en prenant en compte des aspects relatifs à l'éthologie de la reproduction et à la localisation de la ponte. En conservant de cette classification les aspects relatifs au substrat de ponte, les espèces piscicoles du bassin de la Seine se répartissent selon trois grandes stratégies de reproduction : lithophiles, phytophiles et phytolithophiles, pondant respectivement sur substrat minéral (graviers, sables), sur substrat végétal, ou indifféremment sur substrat minéral ou végétal.

En raison de la grande plasticité des poissons européens et de leur spectre alimentaire relativement large, les guildes trophiques sont plus délicates à définir. Néanmoins, trois grands types de comportement alimentaire se distinguent : invertivores, au régime composé préférentiellement d'insectes ou d'invertébrés, piscivores et omnivores (Michel & Oberdorff 1995¹⁰).

Des groupes écologiques sont également établis selon les grands types habitats nécessaires à l'accomplissement du cycle de vie des espèces : rhéophiles, d'eaux vives, limnophiles, d'eaux calmes ou eurytopes, sans affinités particulières (Schiemer & Waidbacher 1992¹¹).

3.4 Organisation naturelle

Actuellement, 45 espèces sont recensées sur le bassin de la Seine. Elles représentent 15 familles, dont la plus importante est celle des Cyprinidés, comprenant 22 espèces.

¹ *Op. cit.* n. 1, p.27.

² *Ibid.*

³ Omernick J.M., 1987. Ecoregions of the conterminous United States. *Annals of the Association of American Geographers*, 77, 118-125.

⁴ Gallant A.L., Omernick J.M. & Hughes R.M., 1991. Ecoregions of the Seine River basin, France. Status Report U.S.E.P.A. Environmental Research Laboratory, Corvallis, Oregon, U.S.A.

⁵ Simberloff D. & Dayan T., 1991. The guild concept and the structure of ecological communities. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 22, 115-143.

⁶ Austen D.J., Bayley P.B. & Menzel B.W., 1994. Importance of the guild concept to fisheries research and management. *Fisheries*, 19 (6), 12-20.

⁷ Balon E.K., 1975a. Reproductive guilds of fishes : a proposal and definition. *J. Fish. Res. Board Can.*, 32 (6), 821-864.

⁸ Balon E.K., 1975b. Ecological guilds of fishes : a short summary of the concept and its application. *Ver. Internat. Verein. Limnol.*, 19, 2430-2439.

⁹ Balon E.K., 1981. Additions and amendments to the classification of reproductive styles in fishes. *Environ. Biol. Fish.*, 6 (3;4), 377-389.

¹⁰ Michel P. & Oberdorff T., 1995. Feeding habits of fourteen European freshwater fish species. *Cybium*, 19 (1), 5-46.

¹¹ Schiemer F. & Waidbacher H., 1992. *Strategies for conservation of a danubian fish fauna*. p. 363-382, in: P.J. Boon, P. Calow & G.E. Petts (Eds), *River conservation and management*, John Wiley & Sons, Chichester.

3.4.1 Dimension longitudinale

Globalement, la distribution actuelle des espèces reste conforme aux différentes « zonations » naturelles décrites dans la littérature (Huet 1949¹, Illies & Botosaneanu 1963², Verneaux 1973³). Les zones à truite, ombre, barbeau et brème se succèdent longitudinalement selon un gradient amont-aval qui s'accompagne d'une augmentation progressive (par addition et remplacement) du nombre des espèces présentes. Ceci est bien net sur le bassin de la Seine, jusqu'à l'ordre 5 (Figure 6)

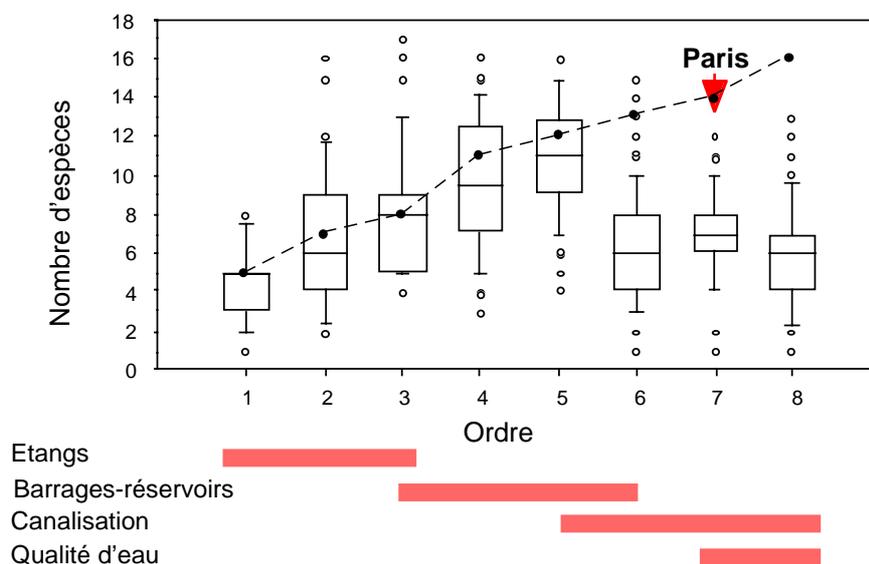


Figure 6. Évolution longitudinale de la richesse locale des peuplements du bassin de la Seine. En pointillé est indiquée la richesse locale moyenne sur le bassin de la Loire (d'après Boët et al. 1998⁴).

Cette augmentation naturelle du nombre d'espèces de poissons le long du gradient amont-aval d'un cours d'eau s'explique de plusieurs façons. Dans les parties amont, le faible nombre d'espèces rencontrées est dû à la grande instabilité des conditions de milieu, notamment à l'instabilité hydrologique (Horwitz 1978⁵). Au contraire, la stabilité du milieu aval permet la coexistence d'un plus grand nombre d'espèces. L'augmentation de la richesse spécifique vers l'aval est également liée à celle de la diversité des habitats offerts (Schlosser 1982⁶). L'accroissement de la profondeur favorise aussi l'installation des espèces les plus grandes qui ne peuvent s'implanter dans les parties amont trop peu profondes. Selon Zalewski & Naiman (1985⁷), les communautés piscicoles sont contrôlées par un continuum de facteurs abiotiques et biotiques. Dans un environnement instable, imprévisible, peu diversifié, seules quelques espèces bien adaptées aux conditions de milieu peuvent subsister ; la

¹ Huet M., 1949. Aperçu des relations entre la pente et les populations piscicoles des eaux courantes. *Schweiz. Z. Hydrol.*, 11 (3-4), 332-351.

² Illies J. & Botosaneanu L., 1963. Problèmes et méthodes de la classification et de la zonation écologique des eaux courantes, considérées surtout du point de vue faunistique. *Mitt. Intern. Ver. Limnol.*, 12, 1-57.

³ Verneaux J., 1973. Cours d'eau de Franche-Comté (massif du Jura). Recherches écologiques sur le réseau hydrographique du Doubs. Essai de biotypologie. *Thèse Doct. Ann. Fac. Sci. Univ. Besançon*, 257 p.

⁴ Boët P., Akopian M., Belliard J., Berrebi-dit-Thomas R., Pourriot R., Tales E. & Testard P., 1998. Une faune aquatique sous pressions multiples. p. 627-678, in: M. Meybeck, G. de Marsily & E. Fustec (Eds), *La Seine en son bassin. Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé*, Elsevier, Paris.

⁵ Horwitz R.J., 1978. Temporal variability patterns and the distributional patterns of stream fishes. *Ecol. Monogr.*, 48, 307-321.

⁶ Schlosser I.J., 1982. Fish community structure and function along two habitat gradients in a headwater stream. *Ecol. Monogr.*, 52 (4), 395-414.

⁷ Zalewski M. & Naiman R.J., 1985. The regulation of riverine fish communities by a continuum of abiotic-biotic factors. p. 3-9, in: J.S. Alabaster (Ed.), *Habitat modification and freshwater fisheries*, Butterworths, London.

régulation par les facteurs abiotiques, tels que turbulence, vitesse, substrat, température, est alors dominante. Au contraire, dans un environnement stable ou prévisible, et diversifié, la coexistence de nombreuses espèces est possible ; dans ce contexte, les facteurs de régulation biotiques, tels que compétition ou prédation, sont alors prépondérants. Le long du gradient amont-aval, l'évolution de la richesse spécifique repose sur la combinaison de ces mécanismes.

Dans ses grandes lignes, l'évolution longitudinale de la structure fonctionnelle des peuplements piscicoles est également conforme au schéma attendu dans le cadre théorique du continuum fluvial (*River continuum concept*, Vannote *et al.*, 1980¹). Avec l'accroissement de la richesse spécifique, la diversité fonctionnelle des peuplements augmente, notamment s'agissant de leur composition trophique (Belliard 1994², Oberdorff *et al.* 1993³). De l'amont vers l'aval, la succession des groupes de reproduction, lithophiles, phyto-lithophiles, phytophiles, qui accompagne la disponibilité des habitats de ponte offerts, est aussi globalement maintenue. En rapport avec les exigences écologiques des poissons, dont les conditions de reproduction sont relativement strictes, comparé à la grande plasticité de leur comportement alimentaire, les structures sont mieux marquées pour les guildes de reproduction que pour les guildes alimentaires.

La comparaison de la situation actuelle avec des cours d'eau au degré d'anthropisation moins élevé comme la Loire met néanmoins en évidence des altérations majeures (Figure 6). Alors que l'augmentation de la richesse des peuplements se fait régulièrement pour atteindre une asymptote dans les parties les plus aval de la Loire, la Seine montre au contraire dans ces secteurs, une baisse notable du nombre d'espèces présentes.

3.4.2 Influence régionale

Malgré l'homogénéité exceptionnelle du bassin de la Seine, les modalités d'évolution amont-aval de la composition des communautés montrent des différences régionales marquées (Belliard *et al.* 1997⁴) : successions plus ou moins rapides et richesse spécifique variable selon les écorégions drainées par les cours d'eau, qui conduisent à apprécier plus finement et mieux hiérarchiser l'influence de certains paramètres du milieu (pente, largeur...).

Dans le cas de la Seine en effet, ces différences régionales au sein des peuplements piscicoles ne résultent pas de mécanismes biogéographiques, car toutes les espèces sont susceptibles d'être rencontrées sur l'ensemble du bassin. Ces différences s'expliquent davantage par la structure des milieux ; elles sont liées aux caractéristiques morpho-dynamiques des cours d'eau et à la diversité des habitats selon les écorégions, en particulier concernant les sites de reproduction offerts aux diverses espèces. Elles se traduisent par différentes proportions en termes de groupes de reproduction au sein des peuplements. Certaines régions sont ainsi sensiblement plus riches en espèces lithophiles, qui pondent sur des substrats de sable, de graviers ou de cailloux, d'autres en espèces phyto-lithophiles, dont les exigences sont naturellement moins strictes (Belliard *et al.* 1997⁵).

Dans une perspective de gestion, il est clair que de telles différences sont importantes à prendre en compte. S'il s'agit par exemple de définir un peuplement de référence à partir duquel mesurer une évolution ou un éventuel écart dû à une quelconque perturbation, le contexte régional doit en effet être considéré.

¹ *Op. cit.* n. 6, p. 27.

² *Op. cit.* n. 9, p. 23.

³ Oberdorff T., Guilbert E. & Lucchetta J.C., 1993. Patterns of fish species richness in the Seine River basin, France. *Hydrobiologia*, 259 (3), 157-167.

⁴ Belliard J., Boët P. & Tales E., 1997. Regional and longitudinal patterns of fish community structure in the Seine River basin, France. *Environ. Biol. Fish.*, 50, 133-147.

⁵ *Ibid.*

3.4.3 Dimension latérale

Les rivières ou les fleuves ne peuvent être seulement considérés comme de simples chenaux d'écoulement longitudinal. Ils doivent être également appréciés dans leur dimension latérale à l'échelle du lit majeur (Décamps & Naiman 1989¹, Ward & Stanford 1989²) et les différentes annexes hydrauliques de leur plaine alluviale, anses riveraines, bras secondaires des zones de tressage, bras-morts ou lônes des secteurs à méandres sont une composante essentielle de leur dynamique fonctionnelle et de leur diversité (Amoros & Roux 1988³).

À l'état naturel, la plaine alluviale se compose en effet d'une mosaïque de milieux aquatiques qui favorisent le déroulement des trois phases essentielles du cycle de vie des poissons, telles que définies par Nikolsky (1963⁴) et Schlosser (1991⁵) (cf. Figure 1 ; p. 17). Ces milieux péri-fluviaux du lit majeur sont donc essentiels pour de nombreuses espèces, mais que l'artificialisation du lit majeur compromet gravement (Ward & Stanford 1995⁶, Welcomme 1995⁷).

En particulier, la reproduction et les premiers mois de vie des alevins constituent la phase la plus critique du cycle vital des poissons (Mann 1996⁸). C'est elle qui conditionne le recrutement des populations, c'est-à-dire, la quantité de juvéniles intégrant le peuplement adulte. Son bon déroulement est intimement lié à la grande spécificité des exigences biologiques des espèces vis-à-vis de leurs habitats de pontes (Balon 1975⁹, Grandmottet 1983¹⁰) et des habitats nécessaires au développement des jeunes (Copp 1989¹¹, Schiemer *et al.* 1991¹²), ainsi qu'à la faible mobilité de ces premiers stades (œufs, larves et jeunes). Les liens écologiques des stades larvaire et juvénile avec les annexes hydrauliques sont en effet primordiaux à cause de l'importance des ressources trophiques lors de leur développement et de leur faible résistance aux vitesses d'écoulement.

Ce rôle fondamental des milieux péri-fluviaux du lit majeur, comme site de reproduction et de nourricerie des jeunes larves, est évalué à travers la composante alevinique – les premiers stades des jeunes individus –, considérée à la fois comme potentiel de recrutement et indicateur fonctionnel du milieu aquatique (Copp *et al.* 1990¹³).

Ces travaux concernent la plaine alluviale de La Bassée, située en amont de Paris, qui offre un gradient amont-aval d'artificialisation croissante. Deux secteurs contrastés en termes de niveau d'anthropisation sont étudiés : une zone amont « *sub-naturelle* », et une zone aval très fortement aménagée.

¹ Décamps H. & Naiman R.J., 1989. L'écologie des fleuves. *La Recherche*, 20, 310-319.

² Ward J.V. & Stanford J.A., 1989. *Riverine ecosystems : the influence of man on catchment dynamics and fish ecology*. p. 56-64, in: D.P. Dodge (Ed.), "Proceeding of the International Large River Symposium (LARS)", Ontario, Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci., 106.

³ Amoros C. & Roux A.-L., 1988. *Interactions between water bodies within the floodplains of large rivers : function and development of connectivity*. p. 125-130, In: K.F. Schreiber (Eds), 2nd Internat. Seminar of the "International Association for Landscape Ecology", Münstersche Geographische Arbeiten, 29.

⁴ *Op. cit.* n. 1, p. 18.

⁵ *Op. cit.* n. 3, p. 18.

⁶ Ward J.V. & Stanford J.A., 1995. Ecological connectivity in alluvial river ecosystems and its disruption by flow regulation. *Regulated Rivers*, 11 (1), 105-119.

⁷ Welcomme R.L., 1995. Relationships between fisheries and the integrity of river systems. *Regulated Rivers*, 11 (1), 121-136.

⁸ Mann R.H.K., 1996. Environmental requirement of European non-salmonid fish in rivers. *Hydrobiologia*, 323, 223-235.

⁹ *Op. cit.* n. 7, p. 30.

¹⁰ Grandmottet J.-P., 1983. Principales exigences des téléostéens dulcicoles vis-à-vis de l'habitat aquatique. *Ann. sci. Univ. Franche-Comté, Besançon, Biol. Anim.*, 4^{ème} sér. (fasc. 4), 3-32.

¹¹ Copp G.H., 1989. The habitat diversity and fish reproductive function of floodplain ecosystems. *Environ. Biol. Fish.*, 26, 1-27.

¹² Schiemer F., Spindler T., Wintersberger H., Schneider A. & Chovanec A., 1991. Fish fry associations : important indicators for the ecological status of large rivers. *Ver. Internat. Verein. Limnol.*, 24, 2497-2500.

¹³ Copp G.H., Olivier J.-M., Penaz M. & Roux A.-L., 1990. *Juveniles fishes as functional descriptors of fluvial ecosystem dynamics*. Symp. on Floodplain Rivers, April 9-11 1990, Baton Rouge, Louisiana, USA.

À l'aval de la confluence de l'Aube, où la Seine peut être considérée comme une « zone sub-naturelle » car elle demeure caractéristique de l'évolution morphologique du fleuve dans sa plaine alluviale, l'existence d'une zonation latérale fonction du degré de connexion des annexes avec le chenal actif est mise en évidence (Tales *et al.* 1996¹).

Dans les différents types d'annexes en communication permanente avec le chenal principal, les peuplements des jeunes poissons de l'année se répartissent, en effet, selon leur degré de rhéophilie, et répondent à un gradient spatial qui évolue des milieux lotiques (courants) aux milieux lenticques (calmes). Ce gradient spatial se manifeste également vis-à-vis des groupes de reproduction constitués par les espèces piscicoles (Tales *et al.* 1996²). Il est assimilable à une zonation latérale du fleuve, par analogie à la zonation piscicole longitudinale.

Sur la Seine amont, cette zonation latérale est globalement conforme à celle établie sur le Rhône, en contexte peu anthropisé (Copp & Penaz 1988³), cette dernière répondant à la typologie géomorphologique de la plaine alluviale (Amoros *et al.* 1982⁴). Cette situation témoigne du caractère encore relativement préservé de ce secteur de la Seine.

À l'écart du chenal principal, se distingue une variété de milieux annexes, issus de ses déplacements. Ils correspondent à des stades d'évolution particuliers : les milieux les plus anciens sont les plus éloignés du chenal ; ils sont aussi les moins soumis aux échanges hydrauliques qui régissent le fonctionnement de l'hydrosystème. La complémentarité de ces multiples milieux, vis-à-vis de la reproduction des espèces piscicoles, est mise en évidence dans de nombreux bassins, comme le Danube (Witkowski 1984⁵, Holcik 1990⁶, Schiemer *et al.* 1991⁷) ou le Rhône (Copp 1989⁸). Par conséquent, si l'on veut maintenir une faune diversifiée, la préservation de l'ensemble de ces milieux est essentielle.

En dépit de leur apparente similitude dans le cas de la Seine, ces milieux naturels offrent en réalité aux différentes espèces une gamme étendue de situations locales, propice à la diversité globale des peuplements de juvéniles.

En outre, l'analyse des facteurs structurant les peuplements de juvéniles de ces annexes, à trois échelles spatiales emboîtées : micro-habitat, méso-habitat (à l'échelle d'une annexe) et macro-habitat (à l'échelle du tronçon de cours d'eau), montre que la richesse et la structure des peuplements à l'échelle locale est en partie conditionnée par des facteurs et des processus agissant à des échelles spatiales supérieures (Berrebi-dit-Thomas 1999⁹, Berrebi-dit-Thomas *et al.* 2001¹⁰).

¹ Tales E., Boët P. & Berrebi-dit-Thomas R., 1996. Les peuplements de poissons de l'année de quelques types d'annexes fluviales dans la plaine de la Bassée (Seine). *Bull. Fr. Pêche et Pisciculture*, 343 (4), 189-202.

² *Ibid.*

³ Copp G.H. & Penaz M., 1988. Ecology of fish spawning and nursery zones in the flood plain, using a new sampling approach. *Hydrobiologia*, 169, 209-224.

⁴ Amoros C., Richardot-Coulet M. & Pautou G., 1982. Les "ensembles fonctionnels" des entités écologiques qui traduisent l'évolution de l'hydrosystème en intégrant la géomorphologie et l'anthropisation (exemple du Haut-Rhône Français). *Revue de Géographie de Lyon*, 57, 49-62.

⁵ Witkowski A., 1984. Structure of communities and biomass of ichthyofauna in the Biebrza River, its old river beds and affluents. *Pol. ecol. Stud.*, 10 (3-4), 447-474.

⁶ Holcik J., 1990. *Effects of hydraulic engineering on habitat and fish community in river anabranches of the middle Danube*. p. 14-24, in: W.L.T. Van Densen, B. Steinmetz & R.H. Hughes (Eds), "Management of freshwater fisheries", Proceeding of a symposium organized by the European Inland Fisheries Advisory Commission, Göteborg, Sweden, 31 May - 3 June 1988, Pudoc Wageningen.

⁷ *Op. cit.* n. 12, p. 33.

⁸ *Op. cit.* n. 13, p. 33.

⁹ Berrebi-dit-Thomas R., 1999. Le recrutement des communautés piscicoles dans les annexes hydrauliques de la plaine de La Bassée (Seine). *Thèse Doct. Univ. Paris VI, spécialité Ecologie*, 271 p.

¹⁰ Berrebi-dit-Thomas R., Boët P. & Tales E., 2001. Macrohabitat characteristics influencing young-of-the-year fish assemblages in connected lentic backwaters in the Seine River (France). *Arch. Hydrobiol.*, 135 (2-4), 119-135.

L'influence de ces différentes échelles varie selon les espèces, notamment selon les guildes de reproduction, mais la position des annexes dans le gradient amont-aval, leur degré d'isolement et leur surface s'avèrent des facteurs déterminants.

3.5 Effet des aménagements

Bien sûr, dans le contexte fortement anthropisé du bassin de la Seine, les peuplements de poissons subissent de nombreuses perturbations, qui modifient sensiblement leurs schémas d'organisation naturelle (Boët *et al.* 1998¹).

3.5.1 Modification de l'organisation longitudinale

Dans les têtes de bassin, la construction de barrages et, plus récemment dans certaines régions, la création de multiples étangs ont définitivement coupé l'accès aux frayères ainsi qu'aux zones de nurseries des salmonidés notamment (Figure 6). Parallèlement, la transformation du milieu d'origine en un système de type lacustre, favorable aux espèces d'eaux calmes, influence fortement la structure et la composition des communautés en aval, tant par l'ensemencement d'espèces « indésirables », gardon ou perche-soleil par exemple, que par le biais de modifications thermiques, hydrauliques ou chimiques.

Dans les secteurs intermédiaires, les canaux de navigation qui longent les rivières court-circuitées offrent également des habitats propices aux espèces d'eaux calmes (voire d'étang) et conduisent à des perturbations similaires du peuplement originel qui subit en outre l'influence des réductions de débit.

À l'aval, la canalisation et la régulation des rivières naviguées ont entraîné l'homogénéisation des habitats et des écoulements, la destruction des zones de reproduction de nombreuses espèces, et conjointement à la pollution, engendrent une profonde dégradation de la structure des peuplements et une nette diminution de la richesse spécifique. Les cyprinidés d'eaux vives, qui sont sensibles aux conditions d'oxygénation de l'eau et nécessitent des substrats de graviers ou de cailloux pour se reproduire, sont en nette régression (hotu, vandoise, barbeau). Pour d'autres espèces comme le brochet, c'est l'altération et l'artificialisation du régime hydraulique, motivées par la lutte contre les crues, qui conduisent à la disparition des zones d'inondation indispensables à sa reproduction et mènent à sa raréfaction. Au contraire, les espèces les moins exigeantes et les plus résistantes deviennent les plus abondantes (gardon, perche, ablette, brèmes) ; à la monotonie des habitats s'est associée une banalisation des peuplements.

Enfin, avec l'agglomération parisienne, la détérioration de la qualité physico-chimique de l'eau s'accroît, renforçant le déséquilibre de la faune piscicole qui subit en outre de fréquentes pollutions accidentelles en période estivale, liées en particulier aux rejets des déversoirs d'orages.

3.5.2 Caractéristiques des peuplements sensibles aux altérations du milieu

À l'échelle des peuplements, que les stations soient ou non altérées, et toutes choses égales par ailleurs (ordre, écorégion), la richesse spécifique n'est pas statistiquement différente (Berrebi-dit-Thomas *et al.* 1998²). L'insensibilité de ce paramètre à la dégradation du milieu est à rapprocher de « l'intermediate disturbance hypothesis » (Connell 1978³), laquelle suggère que la diversité d'un peuplement n'évolue pas de manière monotone avec la qualité du milieu mais qu'elle est au contraire maximale pour des perturbations d'intensité moyenne.

¹ *Op. cit.* n. 4, p. 31.

² Berrebi-dit-Thomas R., Belliard J. & Boët P., 1998. Caractéristiques des peuplements piscicoles sensibles aux altérations du milieu dans les cours d'eau du bassin de la Seine. *Bull. Fr. Pêche et Pisciculture*, 348, 47-64.

³ Connell J.H., 1978. Diversity in tropical rain forest and coral reefs. *Science*, 199, 1302-1310.

Entre stations altérées et stations de « référence », établies comme étant celles présentant les meilleures situations vis-à-vis des données de qualités d'eau et d'habitat, parmi les paramètres décrivant six caractéristiques majeures de la structure des peuplements piscicoles (richesse, équilibre des guildes alimentaires, types d'habitat utilisés pour l'alimentation ou au cours du cycle de vie, types de substrat de ponte et capacité de résistance des espèces), les plus sensibles aux altérations des cours d'eau sont liés à la dégradation des habitats de reproduction (Berrebi-dit-Thomas *et al.* 1998¹).

Il est logique que les poissons soient d'abord affectés par la dégradation de leur habitat de reproduction et de ponte, qui constitue une clé essentielle de leur développement. Viennent ensuite des facteurs qui touchent d'autres fonctions de leur cycle vital, comme la qualité de leur alimentation, ou celle de leurs habitats d'alimentation ou de repos. Ainsi, la prise en compte des groupes d'espèces très spécialisées, à la fois pour leur reproduction et dans l'accomplissement d'autres fonctions vitales, revêt une importance particulière car leur présence est, à ce titre, un bon indicateur de la qualité générale du milieu.

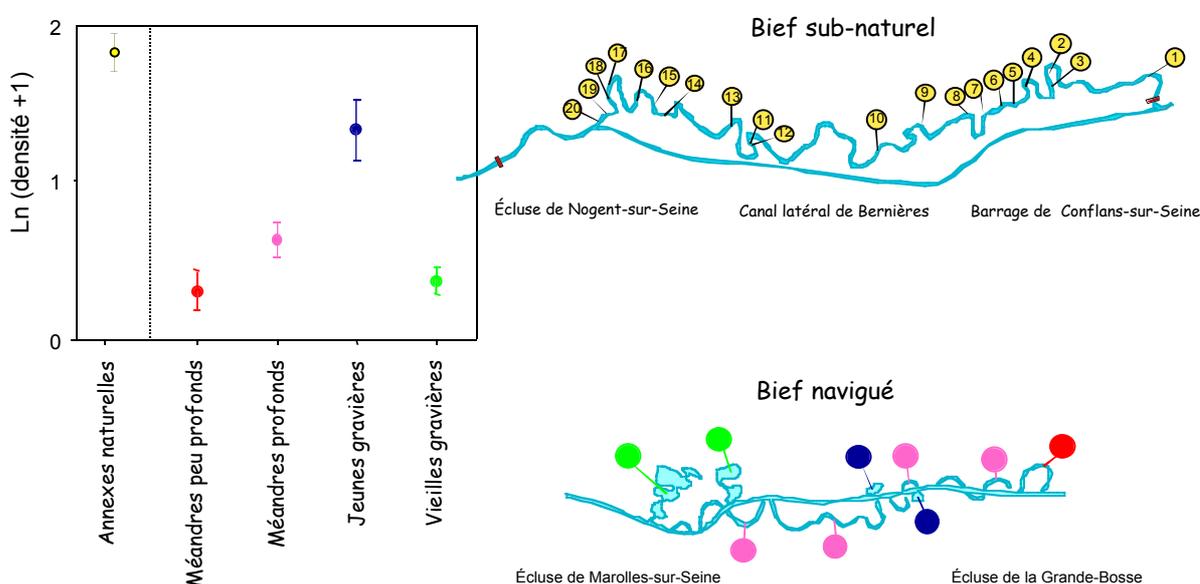


Figure 7. Densités d'alevins dans des annexes hydrauliques d'origine naturelle ou d'origine artificielle de deux biefs de la Seine (d'après Berrebi-dit-Thomas, 1999).

3.5.3 Modifications de la zonation latérale

Les principaux aménagements des fleuves, notamment la régulation des débits et la chenalisation du lit pour les besoins de la navigation, rompent la dynamique fluviale morphogène et en définitive tendent à réduire, voire à supprimer, les connexions latérales du chenal actif avec ses milieux annexes, annihilant ainsi leur rôle (Holcik 1990², Schiemer & Waidbacher 1992³, Patton & Hubert 1993⁴, Scheidegger & Bain 1995⁵). En résulte une homogénéisation globale des habitats et des écoulements, qui se traduit par la banalisation des peuplements piscicoles. En effet, les secteurs aménagés des cours d'eau régulés se caractérisent souvent par une diversité faunistique réduite et une faible densité

¹ *Op. cit.* n. 2, p. 35

² *Op. cit.* n. 6, p. 34.

³ *Op. cit.* n. 11, p. 30.

⁴ Patton T.M. & Hubert W.A., 1993. Reservoirs on a great plains stream affect downstream habitat and fish assemblages. *J. Freshwat. Ecol.*, 8 (4), 279-286.

⁵ Scheidegger K.J. & Bain M.B., 1995. Larval fish distribution and microhabitat use in free-flowing and regulated rivers. *Copeia*, 1, 125-135.

d'espèces peu exigeantes (Schiemer & Spindler 1989¹). Ceci, en partie, parce que de nombreuses espèces ne trouvent plus les conditions nécessaires à leur existence quotidienne mais, en particulier, parce qu'elles n'ont plus de lieux propices pour se reproduire. Parmi elles, les espèces d'eaux vives se reproduisant sur des substrats minéraux, comme la vandoise ou le barbeau, sont les plus menacées.

En Seine, dans de tels contextes aménagés, et contrairement aux secteurs amont moins perturbés, les annexes hydrauliques d'origine artificielle, ancien méandre rescindé ou carrière en eau, sont alors susceptibles d'abriter plus d'espèces que le chenal principal (Boët *et al.* 1998²).

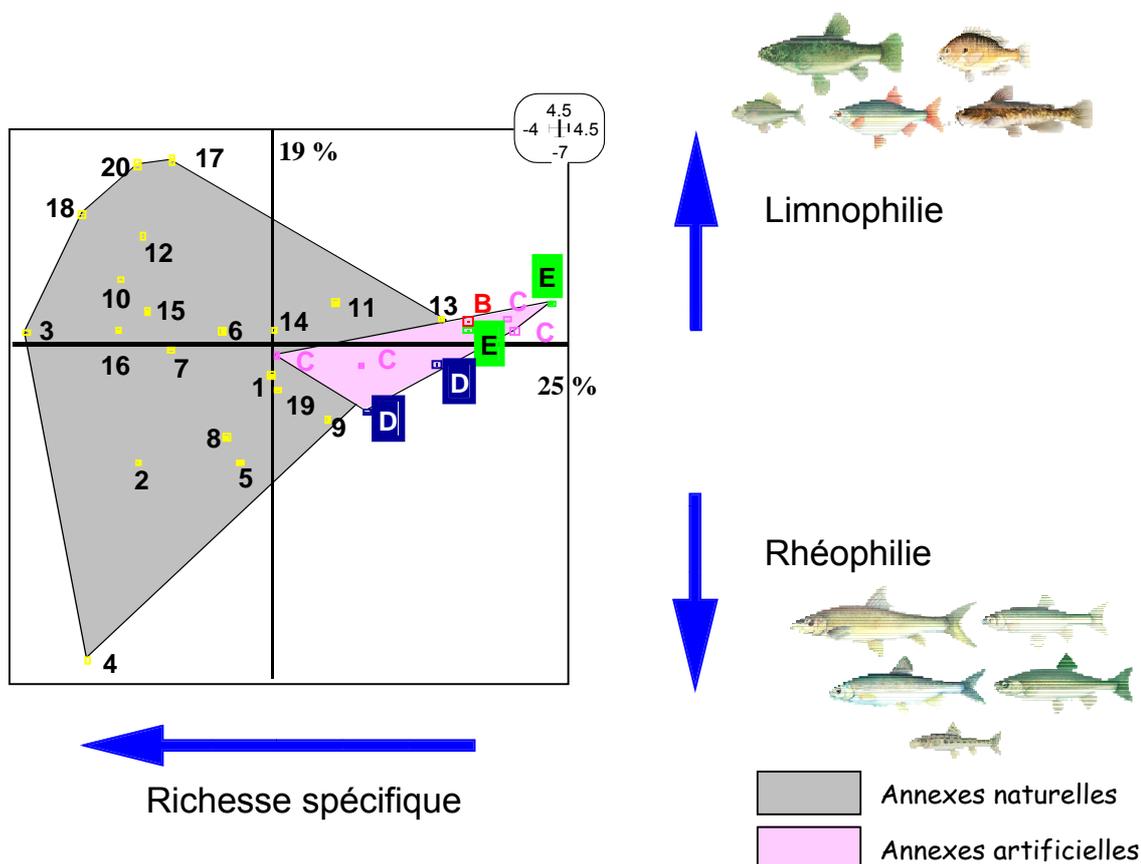


Figure 8. Structure des peuplements d'alevins selon l'origine, naturelle ou artificielle, de 29 annexes hydrauliques de deux biefs de la Seine (d'après Berrebi-dit-Thomas, 1999). Carte factorielle des sites dans le plan F1F2 de l'ACP normée du tableau des fréquences de 20 espèces capturées. La figure illustre la plus grande diversité des situations dans les annexes d'origine naturelle, comparé aux annexes d'origine artificielle (cf. code couleur Figure 7).

Paradoxalement, l'importance de ces annexes hydrauliques artificielles pour la reproduction et le recrutement des populations apparaît plus cruciale encore qu'en secteur naturel. La productivité en alevins y est en effet 10 fois supérieure à la productivité mesurée dans le chenal, tandis que ce rapport n'est que de 3 en secteur naturel. Cette appréciation doit toutefois être fortement nuancée car en réalité la densité d'alevins capturés dans les annexes artificielles est 10 fois moindre que dans les annexes naturelles (Figure 7 ; Berrebi-dit-Thomas 1999³). D'importantes différences de structure de peuplements sont en outre observées entre annexes naturelles et artificielles. Comparé aux annexes naturelles, le recrutement est en effet beaucoup moins diversifié dans les annexes artificielles (Figure 8).

¹ *Op. cit.* n. 4, p. 18.

² *Op. cit.* n. 4, p. 31.

³ *Op. cit.* n. 9, p. 34.

De fait, la plupart des annexes artificielles conviennent surtout aux espèces les plus limnophiles, en raison notamment de leur faible diversité d'habitats offerts, ainsi que leur faible ouverture sur le chenal. Seules les carrières les plus récentes, lesquelles présentent de nombreuses plages de gravier et une ouverture importante sur le chenal, relativement à leur taille, hébergent des peuplements de jeunes poissons de l'année, comparables aux peuplements observés dans les annexes naturelles (Berrebi-dit-Thomas & Boët 1997¹, Berrebi-dit-Thomas 1999²). Ceci réfute donc l'hypothèse selon laquelle les annexes artificielles générées par les aménagements se substituerait fonctionnellement aux annexes naturelles en remplissant un rôle comparable vis-à-vis des peuplements de juvéniles de poisson.

3.5.4 Gestion des barrages-réservoirs et reproduction du brochet

Dans le secteur de la plaine de La Bassée, la dynamique des inondations est fortement influencée par la gestion des barrages-réservoirs de l'Aube et de la Seine. Ceci pénalise sérieusement le succès de la reproduction du brochet. Ce poisson se reproduit lors des crues printanières, dans le lit majeur des fleuves, où il dépose ses œufs de préférence sur des prairies. Sa grande dépendance vis-à-vis du fonctionnement latéral du fleuve fait de sa présence un indicateur du bon fonctionnement de l'écosystème.

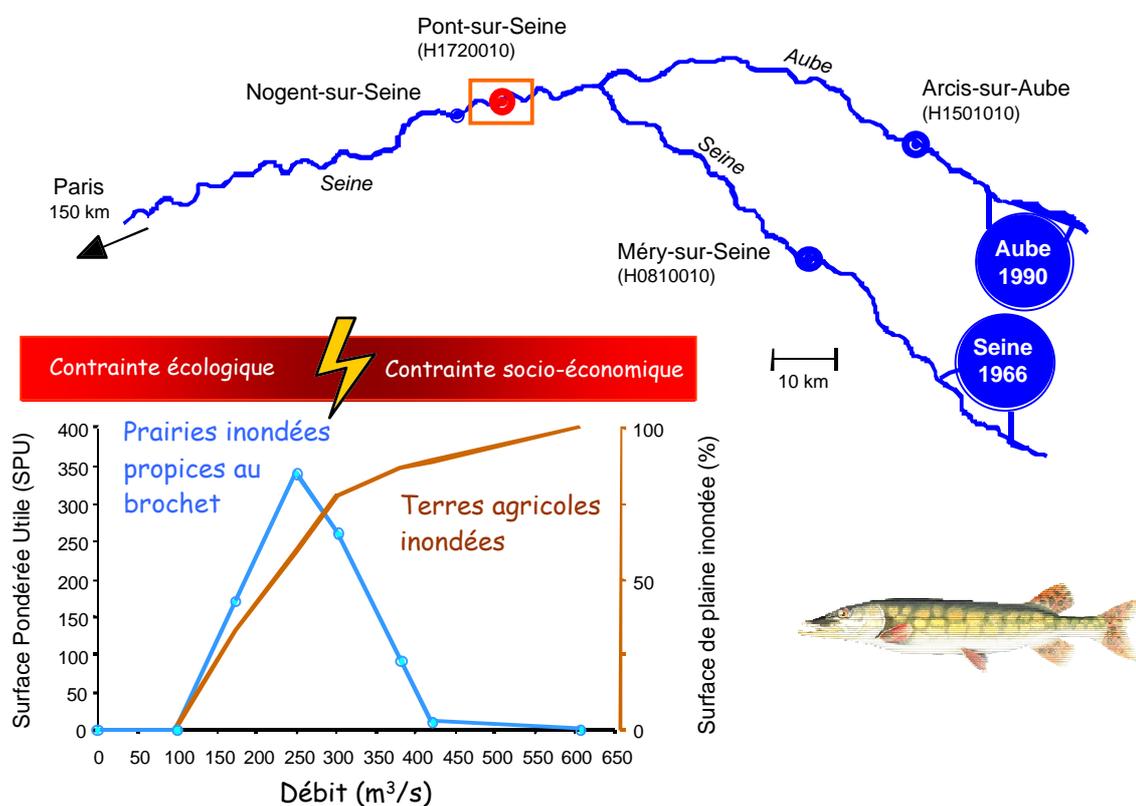


Figure 9. Modélisation de l'habitat de reproduction du brochet. Carte de situation de la zone d'étude et courbe d'évolution de la surface pondérée utile en fonction du débit dans la Seine (d'après Monfort et al. 1996).

¹ Berrebi-dit-Thomas R. & Boët P., 1997. Biodiversity of young-of-the-year fish assemblages from natural and artificial backwaters in the Seine River floodplain (France). Ninth Intern. Congress of European Ichthyologists (CEI9) "Fish Biodiversity", 24-29 August, Trieste, Italy.

² Op. cit. n. 9, p. 34

Afin de fournir des éléments d'aide à une meilleure « gestion écologique » des barrages-réservoirs, une modélisation de l'habitat de reproduction du brochet a été réalisée dans ce secteur de la plaine de La Bassée, potentiellement favorable à l'espèce (Monfort *et al.* 1996¹).

Un modèle biologique, traduisant les relations entre la densité relative de l'espèce et les valeurs de certaines variables d'habitat restituées par le modèle hydraulique, a été établi sur la base d'une expertise de la bibliographie existante. Trois critères sont retenus pour définir les courbes des préférences du brochet : la nature du couvert végétal, la hauteur d'eau et la vitesse ; bien qu'essentielle lors du développement embryonnaire, la température est écartée car considérée comme un processus non maîtrisable, soumis aux aléas climatiques. Pour chaque valeur de ces variables, des coefficients de préférence compris entre 0 et 1 sont attribués.

La zone d'étude a fait l'objet d'une cartographie afin, d'une part, de repérer les zones favorables à la fraie et, d'autre part, de déterminer les surfaces potentiellement inondées en fonction d'une gamme de débits.

À partir des mesures disponibles dans la banque HYDRO, une chronique des débits couvrant la période de 1965 à 1989 est reconstituée. Ces données sont exploitées par un modèle hydraulique couplé au modèle biologique. Les paramètres hydrauliques ainsi restitués sont utilisés pour le calcul des surfaces d'habitat utilisables par le poisson (Surfaces Potentielles Utiles : SPU).

Ce modèle conduit à situer les débits offrant des conditions optimales pour la reproduction du brochet aux alentours de 150 à 175 m³/s. À ces valeurs en effet, la plupart des prairies présentes dans la zone étudiée sont inondées et leur surface est largement suffisante au stock de géniteurs susceptibles d'être présents dans le lit mineur de la rivière (Figure 9).

Par ailleurs, la comparaison de l'ensemble des courbes obtenues pour différentes simulations de débits (naturel, 1 barrage, 2 barrages) entre 1966 à 1989, permet de juger des conséquences des aménagements. Comparé au régime naturel simulé, une diminution sensible et générale des valeurs des surfaces utiles au brochet est en effet enregistrée pour les régimes soumis à 1 et 2 barrages. L'actuelle gestion entraîne une baisse de la capacité d'accueil d'environ 30 %. En outre, indépendamment des événements climatiques, les conditions hydrauliques, qui étaient en moyenne favorables au brochet une année sur deux, en régime naturel, ne conviennent maintenant qu'une année sur cinq seulement, en raison de la régulation par les deux barrages-réservoirs. Enfin, avec deux barrages, apparaissent au cours de la période considérée quatre années nulles qui n'existaient pas auparavant (Monfort *et al.* 1996²).

¹ Monfort O., Breil P. & Boët P., 1996. *Selection of an ecological reference flow : support by modeling the habitat of a key species, the northern pike*. p. 133-146, In: M. Leclerc, H. Capra, S. Valentin, A. Boudreault & Y. Côté (Eds), "Ecohydraulics 2000" 2nd IAHR international symposium on hydraulics and habitats, Quebec City, June 11-14, 1996, INRS-Eau, B.

² *Ibid.*

4 Perspectives

4.1 Modélisation des relations milieux - peuplements

Pour approfondir la connaissance du peuplement piscicole et préciser davantage l'importance relative des variables de milieu dans les mécanismes de structuration des communautés, la modélisation est une étape indispensable. Une telle modélisation permettrait aussi de simuler ensuite l'impact de différents aménagements.

Ces travaux s'appuient sur l'exploitation d'une importante base de données qui couvre l'ensemble du bassin de la Seine. Ces données sont issues d'échantillonnages réalisés au moyen de pêches électriques. Elles sont hétérogènes et bruitées, d'une part parce qu'elles résultent d'échantillonnages répondant à des objectifs différents et, d'autre part, en raison de biais liés à la pêche électrique, dont l'efficacité est limitée dans les grands cours d'eau. Elles manquent de précision, mais elles ont l'avantage d'être comparables et de couvrir un vaste espace. Il faut donc trouver des méthodes d'analyse adaptées.

Une première synthèse a été réalisée au moyen d'analyses multivariées. Elle a permis de dégager les principaux facteurs qui conditionnent l'organisation actuelle du peuplement piscicole à l'échelle de l'ensemble du réseau hydrographique de la Seine (Belliard 1994¹). Les caractéristiques du milieu, liées à l'organisation longitudinale et aux spécificités régionales du bassin, se sont avérées déterminantes. Les communautés s'enrichissent progressivement de l'amont vers l'aval, ce qui confirme les schémas théoriques de la zonation piscicole. Des espèces s'ajoutent, d'autres sont remplacées. En dépit de la relative homogénéité du bassin de la Seine, des facteurs locaux influencent cette évolution. Les successions sont plus ou moins rapides selon les écorégions drainées par les cours d'eau, et la richesse en espèces diffère pour des tronçons de rivière comparables (Belliard *et al.* 1997²).

Pour aller plus loin dans l'analyse, il s'agit de modéliser les relations entre les poissons et les descripteurs physiques de l'habitat. Une telle modélisation se heurte toutefois à la complexité des systèmes étudiés. Ces derniers sont en effet constitués de nombreuses composantes dont l'ensemble des interactions est encore mal connu et les relations entre les poissons et les descripteurs physiques de l'habitat, par exemple, sont *a priori* non-linéaires. Il convient donc d'utiliser des méthodes adaptées : non-linéaires et robustes, c'est-à-dire peu sensibles au bruit des données, convenant mieux à nos données. Les réseaux de neurones fournissent un exemple de tels modèles.

Leur application à la prédiction de la présence ou de l'absence des espèces de poissons à l'échelle du bassin de la Seine s'avère en effet pertinente (Boët & Fuhs 2000³). La mise en œuvre effective de cette technique apparemment facile est toutefois délicate. C'est pourquoi, avec l'aide de collègues du LISC, je me suis orienté aujourd'hui vers une autre approche : les arbres de décision.

4.1.1 Les réseaux de neurones

Constitués de composants simples, les neurones formels, interconnectés en grand nombre, les réseaux de neurones permettent de représenter toute fonction calculable (McCulloch & Pitts 1943⁴). Ce qui fait le succès de ces modèles réside dans leur capacité à modéliser des phénomènes non-linéaires. Certes,

¹ *Op. cit.* n. 9, p. 23.

² *Op. cit.* n. 4, p. 32.

³ Boët P. & Fuhs T., 2000. *Predicting presence of fish species in the Seine River basin using artificial neural networks*. p. 131-142, in: S. Lek & J.-F. Guégan (Eds), *Artificial neuronal networks. Application to ecology and evolution*, Environmental Science, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg.

⁴ McCulloch W.S. & Pitts W., 1943. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5, 115-133.

les statisticiens classiques ne sont pas dépourvus devant ces non-linéarités (modèles linéaires généralisés, estimations non-paramétriques, etc.) mais, par leur simplicité d'utilisation, les réseaux de neurones constituent depuis leur avènement des compétiteurs crédibles. D'ailleurs, les ponts entre les deux communautés sont de plus en plus actifs (Cheng & Titterington 1994¹).

Nous avons testé l'efficacité de ces modèles pour prédire la présence ou l'absence de poissons à partir des caractéristiques du milieu. Le problème posé est un problème de discrimination, pour lequel l'utilisation de réseaux connexionnistes multicouches entraînés par l'algorithme de rétropropagation du gradient a montré son intérêt (Rumelhart *et al.* 1986²). Cette démarche a donc été privilégiée au cours de cette approche. Nous avons choisi d'utiliser l'implémentation MASS décrite par Ripley (1996³) et Venables & Ripley (1997⁴).

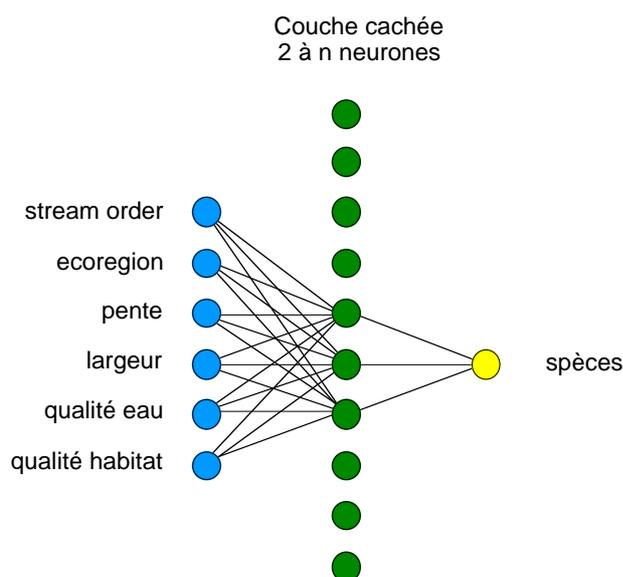


Figure 10. Schéma des réseaux mis en œuvre (d'après Boët & Fuhs 2000).

Éprouvée à l'échelle du bassin de la Seine et en fonction de descripteurs très globaux de la qualité du milieu aquatique (six variables synthétiques d'entrée, cf. Figure 10), la prédiction en termes de présence ou d'absence d'une espèce par des réseaux connexionnistes multicouches s'avère pertinente (Boët & Fuhs 2000⁵).

Vingt-six espèces sont testées, choisies parmi les plus représentatives présentes dans le bassin (ie occurrence $\geq 9\%$). Et alors que les données d'entrée sont assez fortement bruitées, les taux de réussite en généralisation varient de 67,6 à plus de 87 % selon les espèces, ce qui représente des performances très appréciables car une erreur de mesure de l'ordre de 10 à 20 % sur ce type de données est très probable.

Les meilleurs résultats sont obtenus pour la truite, le chabot, la loche franche et le vairon. Ces espèces sont aussi parmi celles dont les profils écologiques sont les plus nets sur le bassin de la Seine. Elles font partie du cortège faunistique classique rencontré dans les zones amont, où les habitats restent parmi les moins perturbés.

¹ Cheng B. & Titterington D.M., 1994. Neural networks: a review from statistical perspective. *Statistical Science*, 9 (1), 2-54.

² Rumelhart D.E., McClelland J.L. & the PDP Research Group, 1986. *Parallel distributed processing.*, MA:MIT Press/Bradford Books, Cambridge.

³ Ripley B.D., 1996. *Pattern recognition and neural networks.*, Cambridge University Press, Cambridge, 403 p.

⁴ Venables W. & Ripley B.D., 1997. *Modern Applied statistics with S-Plus.* (2nd Ed.), Springer-Verlag, New-York, 548 p.

⁵ *Op. cit.* n. 3, p. 40.

À l'inverse, les moindres performances s'expliquent par l'écologie particulière de certaines espèces dans le bassin de la Seine (cas du goujon ou de l'anguille).

Par ailleurs, pour certaines espèces, l'examen détaillé des résultats révèle des différences sensibles entre prédiction de présence ou prédiction d'absence. Celles-ci paraissent liées à des difficultés d'échantillonnage (brème, tanche) ou des manipulations humaines des populations (brochet). Néanmoins, il est bien sûr possible également que les variables prédictives d'entrée du modèle ne sont pas suffisantes pour prédire efficacement ces différentes espèces et que d'autres caractéristiques sont nécessaire pour affiner leur prédiction.

4.1.2 De la boîte noire à la boîte de verre...

Les prédictions obtenues à l'aide des réseaux de neurones sont donc de bonne qualité. Les taux d'erreur s'échelonnent en effet de 13 à 32 %, ce qui est tout à fait intéressant lorsqu'on les compare aux erreurs de mesure qui peuvent fréquemment atteindre 20 %. En ce sens, les réseaux de neurones se révèlent une technique non-linéaire tout à fait pertinente dans la prédiction de la faune ichtyologique à l'échelle du bassin versant.

Compte tenu de la nature des données traitées et du caractère très synthétique des variables d'entrée, ces modèles s'avèrent très satisfaisants. Ils sont déjà très proches de ceux obtenus à l'aide de méthodes classiques, comme les analyses discriminantes et les régressions multiples utilisées par exemple par Pouilly (1994¹) ou Capra (1995²). Mais ces derniers, travaillant à l'échelle du micro-habitat, disposent de données très fiables de description de l'habitat et d'échantillonnage de la faune en place.

Ces essais sont donc encourageants si l'on considère qu'à l'heure actuelle il n'existe guère de modèles prédictifs de poissons à l'échelle d'un bassin fluvial. Oberdorff *et al.* (1999³, 2001⁴) viennent d'appliquer avec succès des procédures de régressions logistiques pour élaborer des modèles qui décrivent la présence des espèces piscicoles et la richesse des peuplements dans les grands cours d'eau français. La variabilité expliquée est dans ce cas autour de 73 %. Seuls, Mastrorillo *et al.* (1997⁵, 1998⁶) ou Guégan *et al.* (1998⁷) ont déjà démontré les capacités des réseaux de neurones artificiels pour prédire la richesse spécifique des communautés de poissons à large échelle.

Néanmoins, la mise en œuvre des réseaux de neurones n'est pas toujours aisée (Boët & Fuhs 2000⁸). En effet, ces modèles d'apprentissage offrent une très grande richesse de structure, mais n'apportent à l'utilisateur aucune aide méthodologique, même empirique, pour dimensionner correctement un réseau en fonction du problème à résoudre.

¹ Pouilly M., 1994. Relations entre l'habitat physique et les poissons des zones à cyprinidés rhéophiles dans trois cours d'eau du bassin rhodanien : vers une simulation de la capacité d'accueil pour les peuplements. *Thèse Doc. Univ. Claude Bernard - Lyon I*, 256 p.

² Capra H., 1995. Amélioration des modèles prédictifs d'habitat de la truite fario : échelles d'échantillonnage ; intégration des chroniques hydrologiques. *Thèse Doc. Univ. Claude Bernard - Lyon I*, 281 p.

³ Oberdorff T., Boët P., Chessel D., Huguény B., Pont D. & Porcher J.-P., 1999. Mise au point d'un indice Poisson sur l'ensemble du réseau hydrographique national. Rapport final de la phase II du programme national "Indice Poisson", 31 janvier 1999, 60 p. + annexes.

⁴ *Op. cit.* n. 11, p. 18.

⁵ Mastrorillo S., Lek S., Dauba F. & Belaud A., 1997. The use of artificial neural networks to predict the presence of small-bodied fish in a river. *Freshwater Biology*, 38, 237-246.

⁶ Mastrorillo S., Dauba F., Oberdorff T., Guégan J.-F. & Lek S., 1998. Predicting local fish species richness in the Garonne River basin. *C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la vie / Life Sciences*, 321, 423-428.

⁷ Guégan J.-F., Lek S. & Oberdorff T., 1998. Energy availability and habitat heterogeneity predict global riverine fish diversity. *Nature*, 391 (22), 382-391.

⁸ *Op. cit.* n. 3, p. 40.

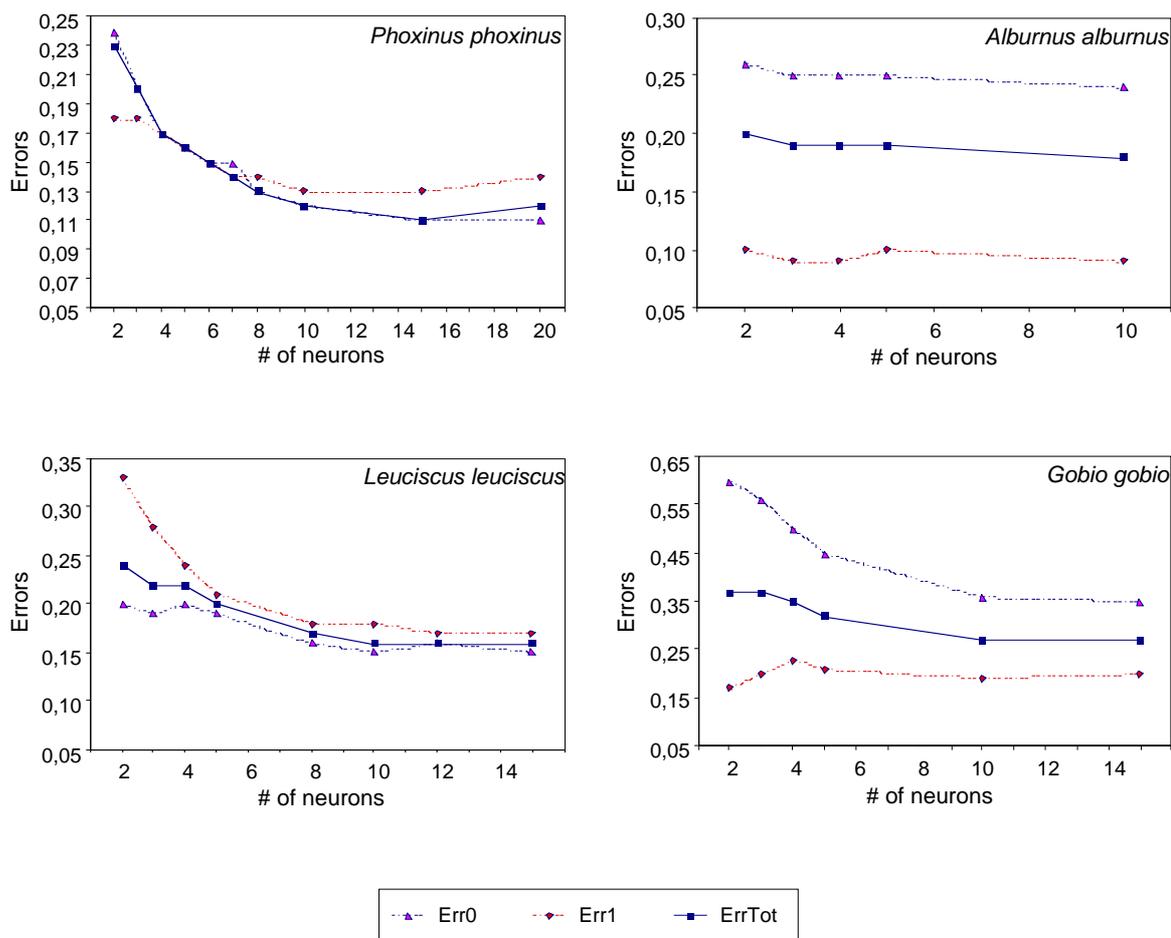


Figure 11. Comportement de l'erreur de prédiction en fonction du nombre d'unités dans la couche cachée des réseaux. Err0 : erreur de prédiction sur l'absence, Err1 : erreur de prédiction sur la présence, ErrTot : erreur de prédiction totale (d'après Boët & Fuhs 2000).

Le nombre d'unités de la couche d'entrée du réseau est lié aux variables prédictives choisies. Mais pour chacune des espèces, nous avons cherché à choisir le meilleur nombre d'unités en couche cachée et ceci s'est avéré plus délicat que prévu. La Figure 11 montre en effet le taux d'erreur de prédiction en fonction du nombre d'unités dans la couche cachée pour 4 espèces. Dans la plupart des cas, l'erreur décroît assez rapidement avec l'augmentation du nombre de neurones, mais on observe ensuite un plateau qui ne permet pas de sélectionner de façon rigoureuse la taille optimale des réseaux construits.

La gestion des variables qualitatives est également délicate. Dans le cas présent, l'écorégion est une variable purement qualitative, qu'il faut découper en autant d'unités d'entrée que de modalités moins un (ie 6 modalités - 1). Les variables quantitatives étant au nombre de 5, la couche d'entrée du réseau comprend donc en réalité 10 unités.

Enfin, les réseaux de neurones apparaissent comme une boîte noire au biologiste : les coefficients du réseau ne peuvent en effet avoir une interprétation biologique. Ce dernier point semble le plus préjudiciable dans la perspective d'une utilisation de ces modèles prédictifs pour l'aide à la gestion au niveau du bassin versant. Il est par exemple délicat de prédire l'impact d'un aménagement sur la présence d'une espèce particulière sans proposer « d'explication » à cet impact, et ce qu'il soit positif ou négatif.

C'est pourquoi, j'ai aussi testé une autre méthode de discrimination appelée « arbres de décision ».

4.1.3 Les arbres de décision

Les arbres de décision constituent une méthode statistique applicable aux domaines de la discrimination et de la régression. Le problème de la prédiction de la présence d'une espèce en fonction des caractéristiques du tronçon de rivière considérée étant un problème de discrimination, seul ce cas est présenté dans ce qui suit.

À partir d'un échantillon de données représentatives du phénomène considéré, la discrimination statistique consiste à construire un modèle permettant de prédire la classe d'une nouvelle observation. Les pêches électriques qui décrivent les caractéristiques physico-chimiques et morphologiques de la station ainsi que les espèces détectées sont un tel échantillon. La classe d'une observation (une variable qualitative) est ainsi la variable binaire indiquant la présence ou l'absence d'une espèce donnée.

➤ *Principe*

L'objectif de cette méthode est le partitionnement récursif de l'espace des observations en sous-domaines les plus homogènes possibles quant à la classe de leurs éléments. La construction se fait en partant de la partition triviale, contenant toutes les observations, à laquelle on attribue la classe majoritaire. On tente alors de séparer cet ensemble suivant une des variables de l'échantillon. Cette variable et la valeur de séparation sont déterminées de manière à engendrer des sous-ensembles plus homogènes quant à la classe de leurs éléments. Un nœud est alors construit qui contient le test sur la variable. Conventionnellement, si le test réussit, l'observation est affectée à la feuille gauche de l'arbre. Ce découpage est poursuivi récursivement sur chaque branche de l'arbre jusqu'à obtention de nœuds totalement homogènes ou d'effectifs trop faibles pour rester représentatifs.

➤ *Validation*

Comme toute méthode statistique inférentielle basée sur un échantillon de taille finie, les arbres de décision présentent une erreur sous-évaluée. En particulier, un arbre développé au maximum, c'est-à-dire dont toutes les feuilles sont homogènes, a une erreur nulle. Mais appliqué à un autre échantillon, il présentera une erreur certainement plus importante. C'est pourquoi il est nécessaire de choisir un arbre ayant de bonnes capacités de *généralisation*, c'est-à-dire un arbre qui reste pertinent vis-à-vis d'un nouvel échantillon.

Pour cela, les arbres de décision utilisent la validation croisée et un critère d'homogénéité pénalisant la taille de l'arbre (son nombre de nœuds). L'arbre retenu est alors celui qui réalise le meilleur compromis entre erreur et taille.

➤ *Construction*

L'algorithme de construction des arbres de décision se déroule en deux phases successives.

La **première phase** est un algorithme glouton de partitionnement récursif binaire. À chaque pas, est déterminée la meilleure séparation linéaire des observations de l'échantillon d'apprentissage, puis récursivement sur chaque sous-ensemble de l'échantillon ainsi formé. La récursion stoppe dès que le sous-ensemble est homogène (toutes les observations sont de même classe), ou si son effectif est trop faible, ce seuil étant décidé par l'utilisateur.

En d'autres termes cela consiste à effectuer une partition de l'espace X des observations vers l'ensemble C des différentes classes du problème. Cependant, la distribution des données dans l'espace des X induit fréquemment des chevauchements. Il n'existe donc pas de partition décrivant complètement les classes. Ainsi, pour chaque feuille de l'arbre, il y aura une probabilité de distribution

selon les classes et la règle de décision de Bayes choisira la classe avec la plus forte probabilité (Fuhs 1998¹). Il s'agit donc de faire des partitions en utilisant les probabilités de plus grande non-classification. La méthode utilisée pour effectuer la construction de l'arbre fait appel à une procédure « pas à pas ». Cela signifie qu'elle effectue la séparation suivante de manière optimale sans tenter d'optimiser les performances à l'échelle de l'arbre entier.

La **seconde phase** est « l'élagage » de l'arbre. Il s'agit de nettoyer l'arbre de ses branches les moins significatives statistiquement. En effet, tout modèle statistique construit à partir d'un échantillon fini est sujet à ce qu'on nomme « le dilemme de l'apprentissage ». Cela signifie que si le modèle est très complexe (dans notre cas, un arbre avec de nombreuses feuilles et branches), il sera trop « proche » de l'échantillon ayant servi à le construire et généralisera mal à des observations étrangères. À l'inverse, un modèle trop fruste (peu de branches et de feuilles) ne distinguera pas suffisamment les contours de la surface de décision (frontière entre les observations des différentes classes).

Breiman *et al.* (1984²) ont montré qu'il existait un élagage optimal de tout arbre de décision. Cette propriété vient du fait qu'il est possible de classer les nœuds de tout arbre de décision suivant sa résistance à la pénalisation du critère d'erreur. Notons $R(T)$ ce critère non pénalisé, et $R\alpha(T)$ le critère pénalisé obtenu par $R\alpha(T) = R(T) + \alpha \text{NombreNœuds}(T)$. Il est immédiat que si nous faisons augmenter α , la taille de l'arbre le pénalisera de plus en plus. Breiman *et al.* ont alors montré qu'il existait une suite optimale d'arbres emboîtés issus de l'arbre construit dans la première phase et dont les éléments (des sous-arbres de cet arbre initial) correspondent à un α donné.

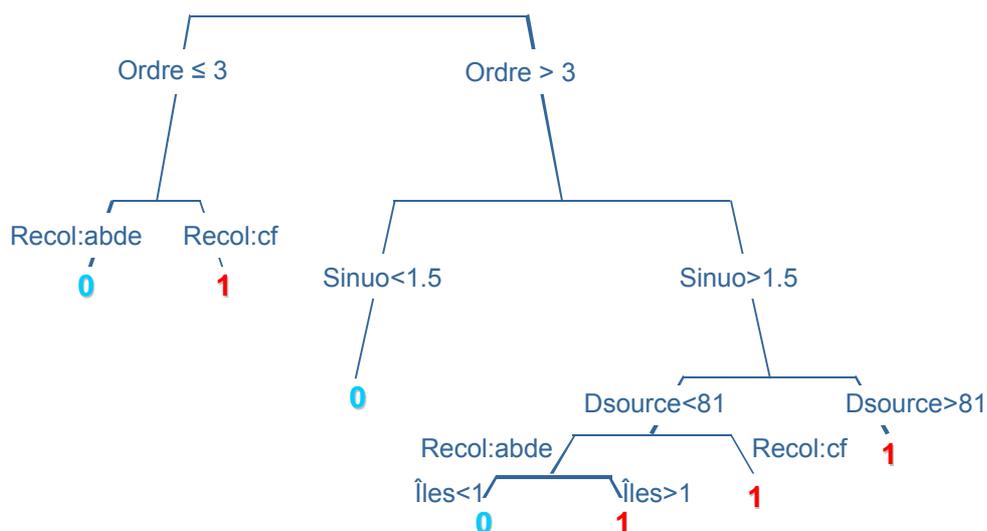


Figure 12. Modélisation de la présence-absence du brochet au moyen d'arbres de décision. Dans cet exemple, seules 5 variables sont retenues par le modèle parmi 19 variables possibles (d'après Boët *et al.* 2000³).

Muni de ce résultat théorique essentiel, il faut maintenant choisir le meilleur arbre de cette suite qui maximise la capacité de généralisation, c'est-à-dire la qualité du modèle sur de nouvelles données. Bien entendu, si nous estimons l'erreur à l'aide de l'échantillon initial, il est évident que c'est l'arbre

¹ Fuhs T., 1998. Les membranes linéaires par morceaux : une approche géométrique de la boucle abduction-induction dans les arbres et listes de décision. *Thèse Université Caen*, 192 p.

² Breiman L., Friedman J.H., Olshen R.A. & Stone C.J., 1984. *Classification and regression trees.*, Chapman & Hall, New York, 358 p.

³ Boët P., Fuhs T., & Gorges G., 2000. Modélisation prédictive des peuplements piscicoles, à l'échelle du bassin. Rapport d'activité PIREN-Seine, février 2000, Paris, 10 p.

initial qui est optimal par sa construction même. Mais l'erreur ainsi calculée appelée erreur empirique n'est qu'une approximation qui sous-évalue la véritable erreur de discrimination donnée par l'arbre.

Une meilleure estimation de cette véritable erreur consiste à utiliser la « validation croisée ». Cette méthode consiste à découper l'échantillon initial en N parties égales (N=2, 3, 5, 10 sont des valeurs fréquemment choisies), à construire un arbre et la suite de ces arbres élagués sur chacun des N échantillons constitués de N-1 des parties ci-dessus. Alors, au lieu de calculer l'erreur empirique sur ces échantillons, nous la déterminons sur la N^{ième} partie non utilisée dans le développement de l'arbre. En moyennant ensuite sur les N suites d'arbres, nous obtenons une estimation meilleure du critère pénalisé $R\alpha(T)$ pour tout α . Breiman *et al.* ont montré que celui-ci est une fonction linéaire par morceaux de α , laquelle, hormis les cas pathologiques, est convexe : elle diminue tout d'abord lorsque α augmente pour atteindre un minimum, puis augmente à nouveau. Le paramètre α correspondant au minimum est le paramètre déterminant finalement le meilleur arbre élagué.

Un exemple d'un tel arbre est montré par la Figure 12 qui modélise la présence-absence du brochet.

➤ *Avantages*

Les avantages de la technique des arbres de décision sont multiples.

En premier lieu, les paramètres sont tous explicites : les tests aux nœuds de l'arbre portent chacun sur une seule variable. Si celle-ci est quantitative, le test indique un seuil ; si elle est qualitative, le test indique l'appartenance à un sous-ensemble des modalités possibles de la variable. Dans les deux cas, ceci est immédiatement interprétable par le biologiste. Ainsi, le modèle s'apparente beaucoup plus à une boîte de verre !

En deuxième lieu, les arbres de décision font la sélection des variables les plus pertinentes. Si une variable n'apparaît en aucun nœud de l'arbre, c'est qu'elle est peu pertinente pour la discrimination recherchée. Cette sélection se fait automatiquement lors de la construction de l'arbre, puisque seules les variables discriminantes y sont retenues.

Enfin, la qualité de la prédiction est généralement bonne, voire meilleure que celle des réseaux de neurones. Ceci apparaît sur le Tableau I, lequel recense les résultats obtenus pour la présence du brochet. L'erreur de prédiction y est très comparable à celles des réseaux de neurones, mais l'arbre est plus compact que le réseau correspondant qui contient 8 unités sur la couche cachée.

Tableau I. Prédiction de la présence-absence du brochet : comparaison des méthodes réseaux de neurones et arbres de décision (d'après Boët et al. 2000).

Méthode	Variabes	Err. moy	Err. min	Err. max	Taille
R.N.	6	20,8	13,1 (0)	32 (1)	8 cachés
Arbres	6 sur 6	20,3	13,4	40	15 feuilles
Arbres	5 sur 19	20,1	10	28,5	7 feuilles

4.1.4 Vers des modèles prédictifs géo-référencés

Il s'agit de bâtir un modèle d'organisation et de structuration des peuplements piscicoles à l'échelle globale du bassin. Ce dernier est intégré à un système d'information géographique, afin d'explicitier les contraintes spatiales par la prise en compte de la topologie arborescente du chevelu hydrographique.

Des développements récents de modèles d'arbres de décision, couplés à une base de données spatialisées au moyen d'un SIG, ont conduit aujourd'hui à un outil expérimental permettant de prédire les espèces de poissons en fonction des caractéristiques des habitats aquatiques (Boët *et al.* 2001¹).

➤ *Données géoréférencées*

La base géographique sur laquelle reposent les modèles est actuellement constituée de 6 couches d'informations :

- le réseau hydrographique (échelle 1 : 50 000), fourni par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie ;
- les stations de pêches, localisées et spatialisées ;
- les bassins versants, définis et numérisés sur la base de la couverture IGN du bassin (1 : 100 000) ;
- l'occupation du sol, définie par la base de données Corine Land Cover (1 : 100 000) ;
- un modèle numérique de terrain (Gtopo 30) de résolution 650 m ;
- les écorégions de Dupias et Rey (1985) à l'échelle 1 : 100 000.

Grâce à cet outil, il est ainsi possible de calculer des variables dérivées caractérisant les cours d'eau à l'échelle de l'ensemble du bassin (rang fluvial, pente des tronçons de cours d'eau, surface des bassins versants, distance entre les stations de pêche, distance de chaque station de pêche à l'exutoire final, etc.). Peuvent également être pris en compte des descripteurs extérieurs au cours d'eau lui-même caractérisant le bassin versant. Corine Land Cover est par exemple une façon d'intégrer le degré d'anthropisation et une nouvelle couverture plus détaillée, d'une meilleure résolution, doit bientôt être disponible.

➤ *Constitution d'une base de données Oracle™*

L'ampleur des données ainsi rassemblées a conduit à la nécessité d'optimiser leur gestion au moyen d'une base de données relationnelle. Toutes sont maintenant rassemblées dans une base Oracle™ : variables dérivées du système d'information géographique, données physiques décrivant localement les caractéristiques des stations de pêche et données biologiques afférentes. L'intérêt de la constitution d'un tel outil est de disposer maintenant d'un référentiel validé et sécurisé ; celui-ci est en outre conçu pour être consulté et interrogé à distance via un navigateur Internet.

Une centaine de variables, réparties en 7 tables, sont aujourd'hui renseignées. Les données biologiques sont constituées des résultats de plus de 1000 pêches électriques, réalisées sur 578 stations.

➤ *Mise en œuvre*

Les routines mises en œuvre utilisent la bibliothèque RPART de S-Plus (Therneau & Atkinson 1997²). Le meilleur arbre élagué est choisi par validation croisée en découpant le tableau initial des observations en 20 parties égales.

Sur cette base, des modèles préliminaires de prédiction de présence-absence des espèces piscicoles sont construits à l'échelle de l'ensemble du bassin de la Seine. À titre illustratif, une généralisation de prédiction du brochet est présentée (Figure 13).

¹ Boët P., Fuhs T., Gorges G. & Toupotte L., 2001. Modélisation prédictive des peuplements piscicoles, à l'échelle du bassin de la Seine. Rapport d'activité Piren-Seine, février 2001, Paris, 9 p.

² Therneau T.M. & Atkinson E.J., 1997. An introduction to recursive partitioning using the RPART routines. Technical report Mayo Foundation, September 3, 1997, [Distributed in Poscript with the rpart package], 52 p.

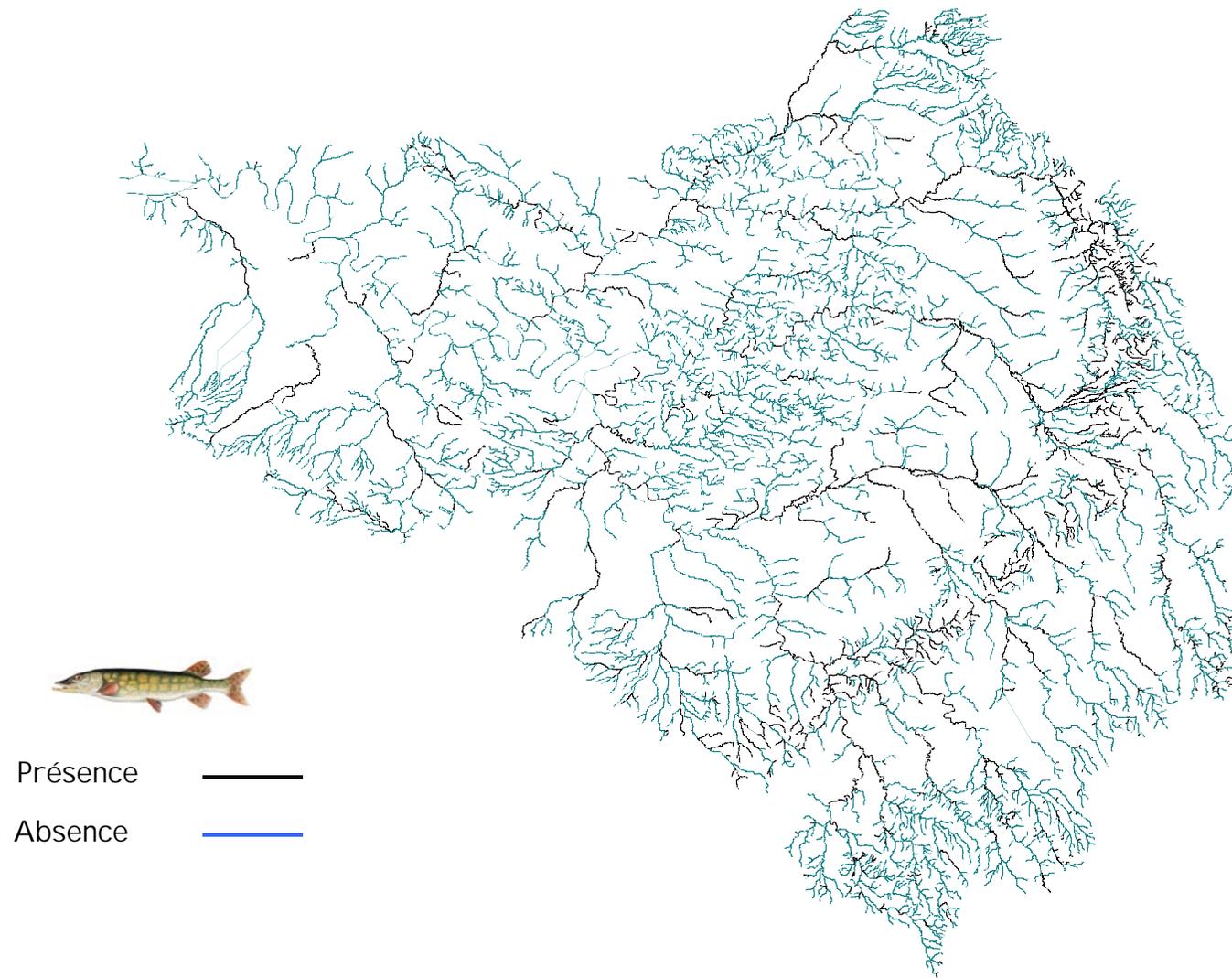


Figure 13. Exemple de généralisation de la prédiction du brochet à l'ensemble du réseau hydrographique de la Seine (d'après Boët et al. 2001).

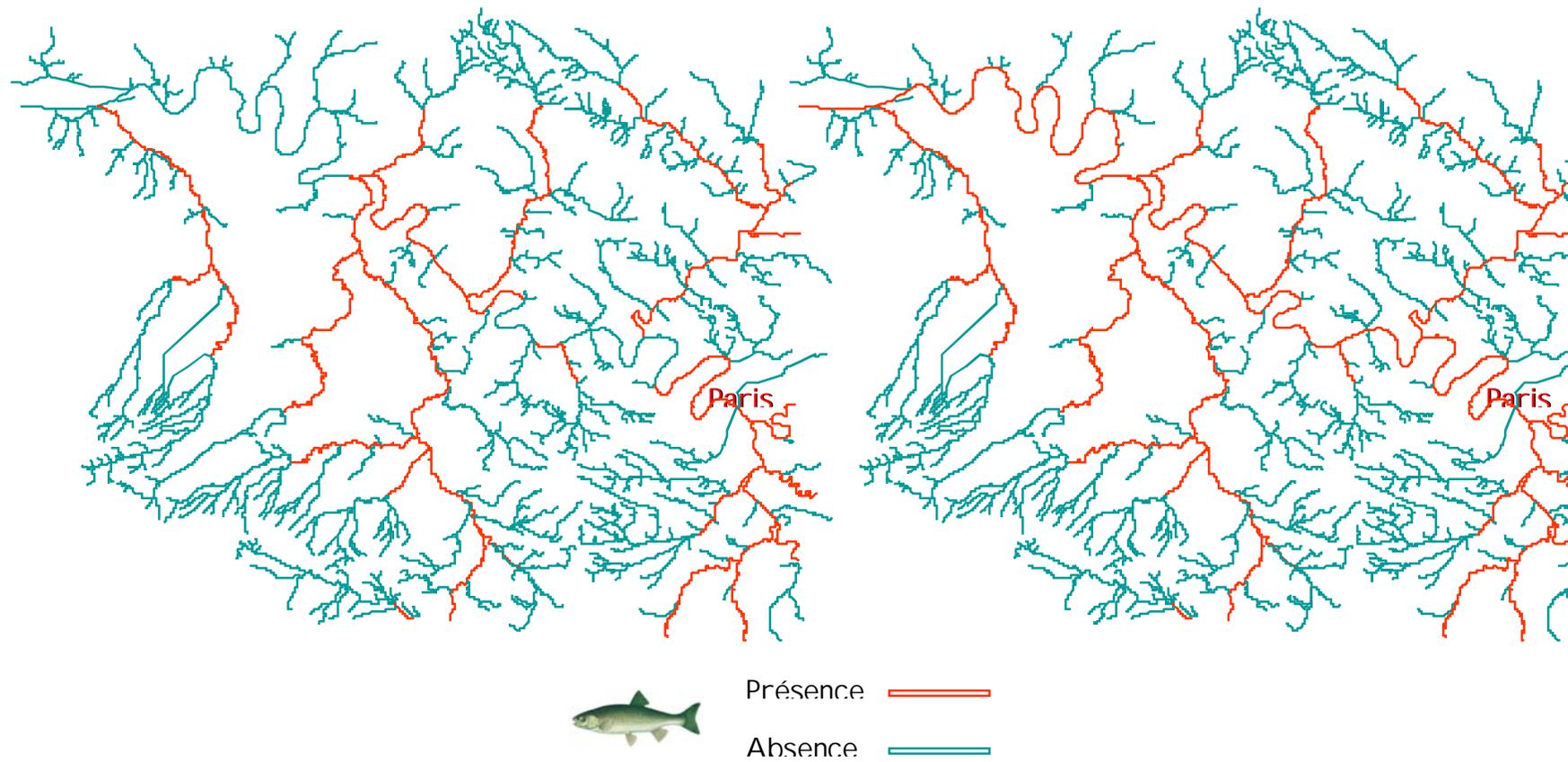


Figure 14. Exemple de prédictions du chevesne : dans les conditions de milieu actuelles (à gauche) ; en simulant des conditions idéalisées d'un traitement optimal des phosphates et des nitrates (à droite). L'espèce est alors prédite sur tout le cours aval de l'agglomération parisienne (d'après Boët et al. 2001)

Dans un même esprit, un essai de simulation de scénario est également montré : il s'agit de la prise en compte de données de qualité de l'eau fournies par le modèle SENEQUE (Poulin *et al.* 1998¹) considérant des conditions optimales de traitement des eaux usées sur le bassin (abattement des phosphates et des nitrates). Une telle amélioration des conditions de milieu se traduit bien par une modification sensible, prédite par le modèle, de la répartition du chevesne à l'aval de l'agglomération parisienne, comparé à la situation actuelle (Figure 14).

Cet exercice ne vise toutefois qu'à montrer les possibilités susceptibles d'être offertes par cet outil encore en cours de réalisation, de nombreuses mises au point restant en effet nécessaires.

➤ *Perspectives*

Une « architecture » générale est donc actuellement en place, qu'il convient en partie de consolider mais dont il faut surtout maintenant aménager « l'intérieur », afin de finaliser nos modèles de prédiction des peuplements de poissons à l'échelle du bassin de la Seine.

Quelques variables explicatives doivent encore compléter cet ensemble, comme la température et l'hydrologie notamment, ou la carte des rejets de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie et celle des barrages de la DIREN Île-de-France.

Les données récentes du suivi du Réseau Hydrobiologique et Piscicole du Conseil supérieur de la pêche sont en cours d'intégration et seront utilisés à des fins de validation des modèles.

Nous envisageons également de figurer l'incertitude des prédictions dans la représentation spatialisée des résultats. Doivent aussi être prises en compte, les abondances relatives des espèces afin de prédire les peuplements piscicoles.

L'essentiel du travail encore à fournir doit toutefois porter maintenant sur l'analyse systématique et détaillée des réponses de chacune des espèces piscicoles aux variables de milieu des modèles, afin de préciser l'importance relative de chacune dans les mécanismes de structuration des communautés.

Plus fondamentalement, il s'agit maintenant de prendre en compte les corrélations spatiales le long du réseau hydrographique. Cette question n'est pas classique, puisqu'il convient de mettre en œuvre des statistiques spatiales gérant les relations de voisinages dans la topologie particulière du réseau hydrographique (graphe orienté). Diverses méthodes doivent être explorées : treillis, corrélogrammes, variogrammes, etc. (cf. p. ex. Ripley 1981², Arnaud & Emery 2000³). Ce travail particulier fait actuellement l'objet d'une thèse qui vient de démarrer (École doctorale E2M2 ; Dir. Alain Pavé). Il est entrepris également en collaboration avec le LISC (François Goraud).

➤ *Conclusions*

Ces travaux devraient conduire à une meilleure connaissance des relations milieu-peuplements, par l'identification et la hiérarchisation des variables caractérisant non seulement le cours d'eau, mais son bassin versant.

Un tel outil pourrait aussi permettre une première analyse des aires de répartition des espèces, susceptibles de fournir des éléments préliminaires concernant la fragmentation éventuelle de l'aire de

¹ Poulin M., Even S., Billen G., Mouchel J.-M., Garnier J., Levassor A. & Leviandier T., 1998. *Modèles : des processus au bassin versant* p. 679-720, in: M. Meybeck, G. de Marsily & E. Fustec (Eds), *La Seine en son bassin. Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé*, Elsevier, Paris.

² Ripley B.D., 1981. *Spatial statistics*, John Wiley & Sons, New York.

³ Arnaud M. & Emery X., 2000. *Estimation et interpolation spatiale - méthodes déterministes et méthodes géostatistiques*, Hermes Sciences Publications, Paris, 221 p.

certaines espèces menacées sur le bassin de la Seine, comme la lote de rivière par exemple qui semble en régression actuellement.

Au plan appliqué, il s'agit de bâtir un outil d'aide à l'évaluation des choix en matière de gestion du territoire, capable de fournir une simulation cartographique dynamique permettant de prédire les peuplements en fonctions de scénarios d'aménagements, de gestion d'ouvrages, ainsi que de pollutions.

Notre maquette logicielle est en effet conçue de manière modulaire et évolutive afin de pouvoir s'enrichir ultérieurement de nouvelles fonctionnalités, tant par la prise en compte de nouveaux compartiments biologiques (algues, invertébrés) que de descripteurs du milieu fluvial (typologie des zones humides en cours d'élaboration par le PIREN-Seine) ou de types d'intervention humaine (rejets ponctuels, pollution diffuse, changement d'occupation du sol).

L'objectif est bien de rendre opérationnel un outil capable d'évaluer à large échelle les effets positifs ou négatifs d'éventuelles modifications de milieu, susceptible de fournir des critères d'analyses et d'anticipation à la disposition de la décision publique, permettant d'améliorer la portée et la pertinence des études d'impact de grands aménagements (barrage, canalisation, etc.), voire d'opérations de restauration.

À terme il pourrait s'appliquer à d'autres contextes. En soulignant bien que par la prise en compte explicite de variables descriptives extérieures au cours d'eau proprement dit, cet outil a bien vocation à s'adresser aux territoires.

À cet égard, dans le cadre du programme Caphyr (Cadre physique de référence) interne au *Cemagref* qui vise à établir les référentiels physiques des cours d'eau, il est prévu d'appliquer les modèles d'arbres de décision au bassin de la Loire.

Un très important travail d'analyse morphologique et hydrologique a en effet été réalisé sur ce bassin (Cohen *et al.* 1998¹, Andriamahefa 1999²) conduisant à caractériser et affiner le découpage hydro-écorégional initialement proposé (Wasson *et al.* 1993³). Toutes ces informations, spatialisées et intégrées dans un SIG, ont encore peu été confrontées à la composante biologique (Ivol-Rigaut 1998⁴, Cattaneo & Breil 2000⁵).

Or, la réponse des communautés de poissons au découpage *a priori* des hydro-écorégions s'est déjà avérée très forte (Ivol *et al.* 1996⁶). Il s'agirait maintenant d'explicitier davantage ces différences. Les données disponibles permettent également de définir maintenant des « conditions de référence ». Couplées à la composante piscicole, pourraient alors être enfin établis des référentiels faunistiques régionalisés.

4.2 Structure spatiale du paysage fluvial et dynamique des populations piscicoles

À l'état naturel, la structure complexe des milieux aquatiques fluviaux et leur connectivité génère une hétérogénéité spatio-temporelle dont dépend la diversité piscicole. Cette structure spatiale du milieu

¹ Cohen P., Andriamahefa H. & Wasson J.-G., 1998. Towards a regionalization of aquatic habitat: distribution of mesohabitats at the scale of a large basin. *Regulated Rivers*, 14, 391-404.

² Andriamahefa H., 1999. Les hydro-écorégions du bassin de la Loire. Morphologie, hydrologie, pressions anthropiques sur les cours d'eau et les bassins versants (vol. 1 et 2). *Thèse Univ. Jean Monnet - Saint Etienne*, 272 + annexes.

³ *Op. cit.* n. 2, p. 27.

⁴ Ivol-Rigaut J.M., 1998. Hydro-écorégions et variabilité des communautés du macrobenthos sur le bassin de la Loire. Essai de typologie régionale et référentiel faunistique. *Thèse de Doctorat Université Claude Bernard Lyon I*, 271 p.

⁵ Cattaneo F. & Breil P., 2000. *A quantification of representative water use effects on natural flow regimes in the Loire River basin, France.*, EISORS (Eight International Symposium On Regulated Streams), Toulouse, France, 17-21 Juillet 2000.

⁶ Ivol J.-M., Belliard J. & Wasson J.-G., 1996. Constitution d'un référentiel régionalisé de bioindicateurs des écosystèmes d'eau courante du bassin de la Loire. Rapport intermédiaire Agence de l'Eau Loire Bretagne Cemagref Lyon BEA/LHQ et Paris QE/FEA, janvier 1996, 66 p.

joue un rôle déterminant dans le fonctionnement des populations, dont le cycle de vie nécessite une mosaïque d'habitats interconnectés. En particulier, la connectivité des différents sites apparaît particulièrement cruciale pour les peuplements de poissons qui utilisent les milieux de plaine alluviale pour accomplir leurs fonctions vitales (Schiemer *et al.* 1995¹ ; cf. Figure 15). Or, dans les secteurs anthropisés, en revanche, les aménagements des cours d'eau fragmentent cette mosaïque (Ward & Stanford 1995²) et induisent une diminution de la diversité et de la densité de poissons (Welcomme 1995³).

Il devient donc crucial de savoir relier les éléments fonctionnels de l'espace aquatique, sachant que la restauration de potentiel écologique va, dans la réalité, forcément devoir composer avec la persistance des enjeux d'usage et d'occupation et donc une certaine stabilité prévisible du paysage physique.

Cependant, la caractérisation et la quantification de l'hétérogénéité et de la connectivité de la mosaïque du paysage fluvial nécessaires à son bon fonctionnement sont encore peu connues (Cooper *et al.* 1997⁴, Cooper *et al.* 1998⁵).

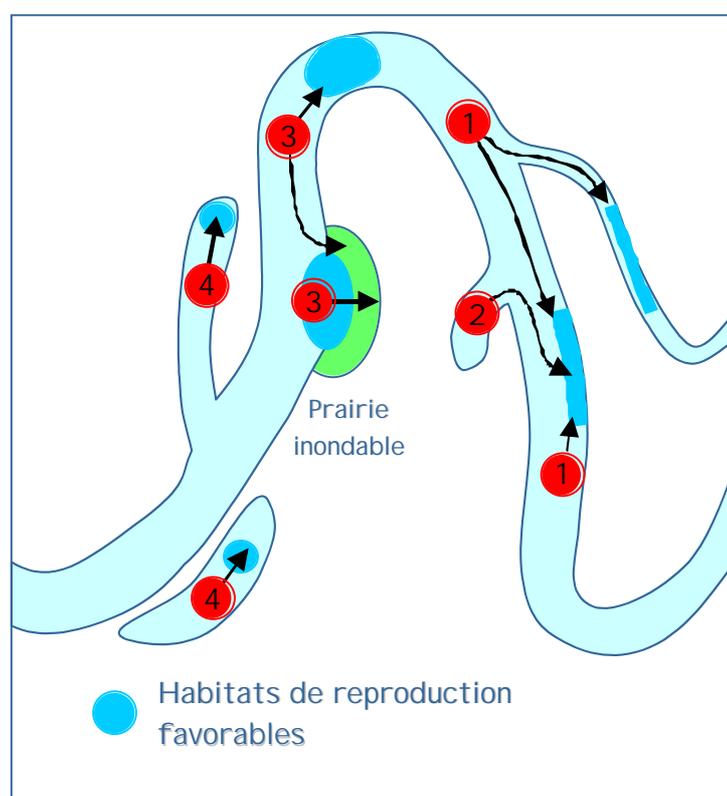


Figure 15. Exemple de la diversité des habitats de reproduction et des déplacements effectués par les principales espèces de poissons des cours d'eau européens (d'après Schiemer & Waidbacher 1992). 1 et 2 espèces rhéophiles ; 3 espèces eurytopes ; 4 espèces limnophiles.

¹ Schiemer F., Zalewski M. & Thorpe J.E., 1995. Land/inland water ecotones : intermediate habitats critical for conservation and management. *Hydrobiologia*, 303, 259-264.

² Ward J.V. & Stanford J.A., 1995. Ecological connectivity in alluvial river ecosystems and its disruption by flow regulation. *Regulated Rivers*, 11 (1), 105-119.

³ *Op. cit.* n. 7, p. 33.

⁴ Cooper S.D., Barmuta L., Sarnelle O., Kratz K. & Diehl S., 1997. Quantifying spatial heterogeneity in streams. *J. N. Am. Benthol. Soc.*, 16, 174-188.

⁵ Cooper S.D., Diehl S., Kratz K. & Sarnelle O., 1998. Implications of scale for patterns and processes in stream ecology. *Australian Journal of Ecology*, 23, 27-40.

À cet égard, l'écologie du paysage qui s'intéresse à la répartition et la connectivité des habitats favorables au sein de la mosaïque du paysage, ainsi qu'à son influence sur la distribution des organismes terrestres, semble une piste intéressante. L'objectif est ainsi d'utiliser les concepts et les méthodes de l'écologie du paysage en les adaptant au milieu aquatique fluvial et de tester leur pertinence vis-à-vis de la diversité piscicole observée.

Ce travail s'appuie sur les deux secteurs, « sub-naturel » et aménagé, de la plaine de la Bassée, qui ont déjà fait l'objet de plusieurs études. Dans un premier temps, l'analyse porte sur les habitats de reproduction des différentes espèces sur lesquels nous avons acquis une bonne expérience.

Pour prendre en compte la structure spatiale du paysage fluvial, nous utiliserons en les adaptant éventuellement des indices issus de l'écologie du paysage (O'Neill *et al.* 1988¹, Turner 1989², Plotnick *et al.* 1993³), relatifs aux problèmes de répartition et de connectivité des différents types d'habitats au sein de la mosaïque du paysage (Burel & Baudry 1999⁴).

Ces indices seront confrontés aux densités de juvéniles en place. Les relations entre la structure des habitats piscicoles et la répartition des juvéniles des différentes espèces seront ensuite modélisées.

Nous avons en effet choisi de coupler l'approche expérimentale à l'approche de modélisation, et d'utiliser le modèle construit, à l'aide de simulations, pour explorer qualitativement les évolutions possibles du système.

Ce simulateur permettra, d'une part, d'étudier la sensibilité du modèle aux différents paramètres, et, d'autre part, de tester la réaction qualitative du système à des scénarios théoriques d'action sur les zones de reproduction (destruction, réhabilitation), en particulier en termes de diffusion des juvéniles, en faisant des hypothèses fortes sur les comportements.

Une caractérisation de la structure du paysage fluvial pour deux niveaux distincts d'anthropisation sera donc établie. Elle permettra d'évaluer le degré d'altération des habitats et de leur connectivité afin de fournir des éléments pour leur réhabilitation. Ces outils de caractérisation de la mosaïque des habitats piscicoles pourront *a priori* être transposés à d'autres secteurs de cours d'eau pour évaluer certains aménagements en matière de restauration.

En outre, ce travail constitue une première étape indispensable pour pouvoir étendre les modèles statiques de relation habitat-peuplements en cours d'élaboration (Boët *et al.* 2001, voir ci-dessus), vers des modèles dynamiques.

Il s'agit donc d'un projet interdisciplinaire, à la frontière entre l'hydro-écologie, l'écologie du paysage, la modélisation et les statistiques spatiales. Ce projet fédère trois équipes qui apportent leurs compétences complémentaires : l'équipe « *qualité et fonctionnement hydrologique des systèmes aquatiques* » (Cemagref Antony) en hydro-écologie, l'équipe « *Système Agraire et Développement* » (INRA Rennes) en écologie du paysage, et le « *Laboratoire d'Ingénierie pour les Systèmes Complexes* » (Cemagref Clermont-Ferrand) en modélisation et statistiques spatiales. Il s'appuie également sur les collaborations déjà réalisées dans le cadre du PIREN-Seine.

4.3 Restauration d'un ancien méandre

Dans la partie canalisée à l'aval de La Bassée, en l'absence de dynamique morphogène la gestion des milieux péri-fluviaux représente un enjeu pour la pérennité de nombreuses espèces piscicoles pour

¹ O'Neill R.V., Krummel J.R., Gardner R.H., Sugihara G., Jackson B., De Angelis D.L., Milne B.T., Turner M.G., Zygmunt B., Christensen S.W., Dale V.H. & Graham R.L., 1988. Indices of landscape pattern. *Landscape Ecology*, 1 (3), 153-162.

² Turner M.G., 1989. Landscape ecology : the effect of pattern on process. *Annual. Rev. Ecol. Syst.*, 20, 171-197.

³ Plotnick R.E., Gardner R.H. & O'Neill R.V., 1993. Lacunarity indices as measures of landscape texture. *Landscape Ecology*, 8 (3), 201-211.

⁴ Burel F. & Baudry J., 1999. *Ecologie du paysage. Concepts, méthodes et applications.*, Tec & Doc, Paris, 359 p.

lesquelles ils constituent d'indispensables zones de reproduction et de nourricerie des alevins. Dans ce secteur en particulier, le vieillissement naturel des bras-morts, dû au manque de connectivité avec le chenal actif, réduit leurs potentialités piscicoles à un petit nombre d'espèces de faible valeur (poissons-chats et perches-soleil).

Dans un tel contexte, seule une réhabilitation des milieux annexes existants peut permettre de maintenir de manière durable un peuplement piscicole diversifié à l'échelle d'un secteur de cours d'eau. D'après nos études antérieures, deux actions complémentaires apparaissent nécessaires : rétablir leur degré de connectivité avec le chenal et améliorer la qualité de leurs habitats.

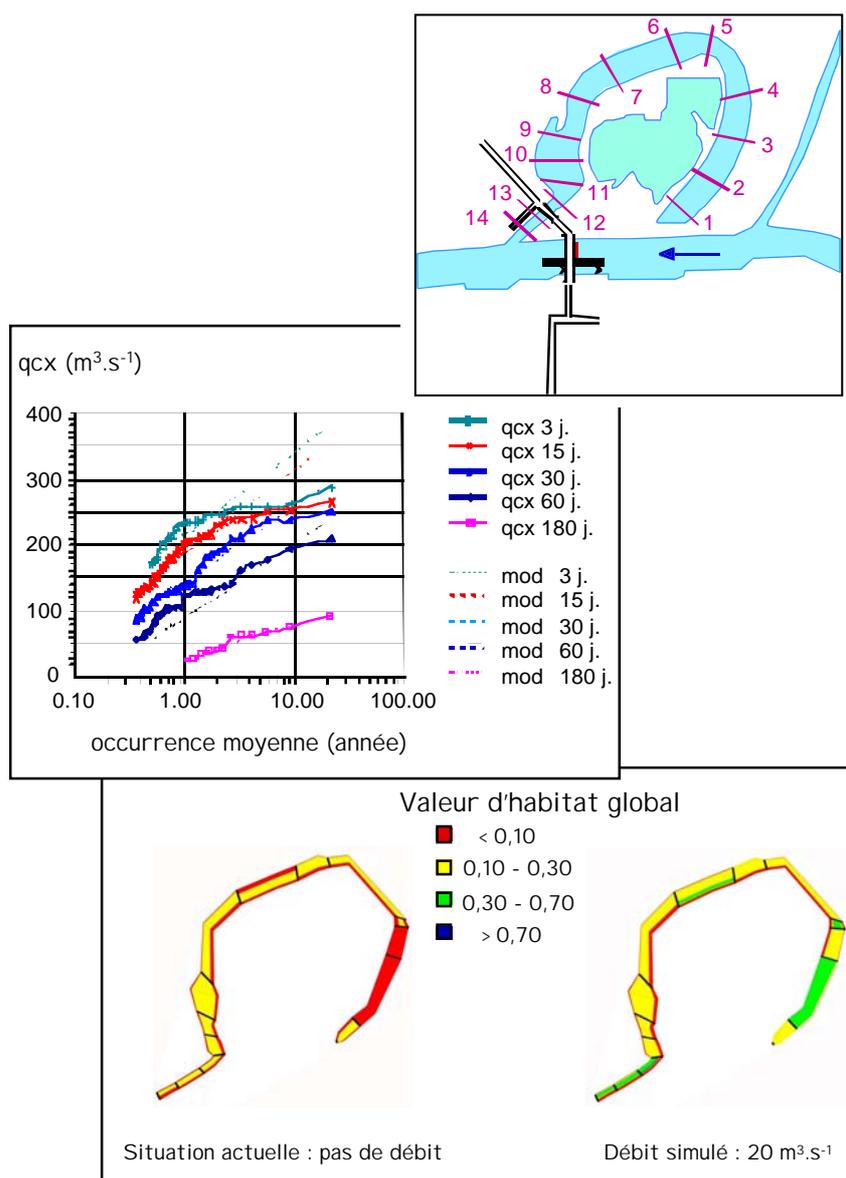


Figure 16. Étude de faisabilité de la restauration d'un ancien méandre de la Seine rescindé : le bras de La Grande-Bosse (aval de Bray-sur-Seine, 77). Schéma du site et des transects du modèle hydraulique ; valeurs des débits-seuils sur la chroniques 1961-1976 ; modélisation de l'habitat du barbeau fluviatile pour deux gammes de débit (d'après Tales et al. 2001).

Ancien méandre rescindé de la Seine, situé dans le secteur aménagé de Bray-sur-Seine (77), le bras de la Grande-Bosse constitue un site potentiellement favorable à une telle expérimentation (Figure 16). Il se trouve en effet au droit d'un barrage-écluse d'une hauteur de chute de 3 m. Ce différentiel de

hauteur d'eau entre la partie amont et aval de ce bras pourrait ainsi être mis à profit pour dériver, par une réouverture à l'amont, un débit créant des zones courantes. La morphologie de ce site est en outre très peu modifiée ce qui est aussi un atout.

Il s'agirait donc de rétablir une connexion amont avec le chenal principal de manière à recréer un chenal secondaire présentant des habitats diversifiés, courants et calmes, potentiellement favorables à la reproduction de la plupart des espèces présentes sur l'ensemble du secteur. Le suivi scientifique de cette opération pour évaluer son efficacité fournirait des règles directement applicables en matière de réhabilitation de milieux similaires.

Préalablement, une étude de faisabilité a été réalisée (Tales *et al.* 2001¹).

En introduisant comme contrainte les gammes de vitesse définies par les exigences biologiques des espèces piscicoles, une modélisation hydraulique a calculé la valeur du débit requis, ainsi que les impératifs techniques de l'ouvrage de dérivation de ce débit à partir du chenal principal ; soit 20 m³/s obtenus par une ouverture de 4 m² de section, placée au fond.

La disponibilité de ce débit sans créer de conflit d'usage, notamment vis-à-vis de la navigation dans le chenal principal, a ensuite été vérifiée par une analyse des chroniques hydrologiques (1961 à 1976). Des valeurs de débits-seuils à 3, 15, 30, 60 et 180 jours, ont été déterminées et calées à une loi de probabilité de réalisation sur l'échantillon de la chronique pour évaluer les occurrences des gammes de débits selon les durées envisagées.

Une validation biologique de la valeur de débit optimal à réintroduire a été établie en quantifiant l'habitat favorable de plusieurs espèces piscicoles, par simulation de l'impact de différents débits sur l'habitat physique du bras, au moyen de modèles de microhabitats (Souchon *et al.* 1989², Pouilly *et al.* 1995³, Ginot *et al.* 1998⁴). Ces simulations confirment l'intérêt de rétablir du débit dans le bras mort. L'habitat des espèces sensibles de ce secteur de la Seine serait en effet amélioré, sans nuire aux autres composantes du peuplement. Ces simulations permettent en outre de préciser la gamme de débit optimal à réintroduire dans le bras mort. Pour certaines espèces en effet, des seuils sont constatés et un effet positif sur l'habitat n'est obtenu que pour des valeurs supérieures à 10-15 m³/s.

Enfin, afin de mettre en place une véritable démarche d'évaluation de l'efficacité de l'opération (Kondolf & Micheli 1995⁵), un protocole de suivi pré-réhabilitation et post-réhabilitation, intégrant un site témoin, a été établi (Henry & Amoros 1995⁶) et démarré depuis 1999. Ce protocole comprend la définition des indicateurs biologiques et physico-chimique de suivi, ainsi que l'instrumentation du site pour mesurer en continu la température par des enregistreurs autonomes immergés, et la hauteur d'eau par un limnimètre.

4.4 Conclusions

Ces actions considèrent donc trois échelles spatiales emboîtées : un bassin dans sa globalité, un secteur perçu comme paysage, un site étudié dans sa fonctionnalité. Toutes trois concernent en cohérence des questions principalement relatives aux poissons ; elles sont ainsi susceptibles de se compléter, de s'alimenter et s'enrichir mutuellement. Au-delà, cet ensemble devrait permettre d'apporter des

¹ Tales E., Boët P., Gorges G. & Le Pichon C., 2001. Réhabilitation piscicole du méandre de la Grande Bosse. Rapport d'activité Piren-Seine, février 2001, Paris, 9 p.

² Souchon Y., Trocherie F. & Fragnoud E., 1989. Les modèles numériques des microhabitats des poissons : application et nouveaux développements. *Sciences de l'Eau*, 2 (4), 817-841.

³ Pouilly M., Valentin S., Capra H., Ginot V. & Souchon Y., 1995. Microhabitat methodology: Principles and procedures. *Bull. Fr. Pêche et Pisciculture*, (336), 41-54.

⁴ Ginot V., Souchon Y., Capra H., Breil P. & Valentin S., 1998. EVHA 2.0. Evaluation de l'habitat physique des poissons en rivière. Guide méthodologique. Cemagref, Ministère de l'Environnement, 82 + annexes.

⁵ Kondolf G.M. & Micheli E.R., 1995. Evaluating stream restoration projects. *Environmental Management*, 19 (1), 1-15.

⁶ Henry C.P. & Amoros C., 1995. Restoration ecology of riverine wetlands .1. A scientific base. *Environmental Management*, 19 (6), 891-902.

éléments de connaissances utiles, susceptibles d'aider à mieux gérer la co-évolution des activités économiques, au sens large, et des systèmes ou des milieux aquatiques, pour conserver dans le futur des capacités d'adaptation à des usages non prévisibles aujourd'hui.

5 Rendre son hospitalité à la Seine

L'ensemble de ce travail permet donc de mieux comprendre quelles sont les conséquences des multiples actions de l'homme sur l'écosystème fluvial et comment réagit la faune aquatique face aux nombreuses agressions qu'elle subit.

Situés au sommet de l'édifice biologique, les peuplements de poissons sont susceptibles de constituer un outil de gestion efficace permettant d'apprécier la qualité des écosystèmes fluviaux et leur évolution. Leur analyse nécessite cependant la prise en compte de différentes échelles de perception spatiales et temporelles. En particulier, la richesse spécifique, c'est-à-dire le nombre d'espèces - à tort souvent confondu avec la diversité dont la signification en écologie est bien différente (p. ex. Shannon 1948¹) -, est un critère délicat à manier. Dans le cas de perturbations majeures, elle tend effectivement à diminuer, parfois de façon drastique. Mais dans certains contextes, en revanche, les perturbations anthropiques sont susceptibles au contraire d'augmenter localement la richesse en espèces. C'est ce qui arrive par exemple lors de la création d'étangs ou de barrages modifiant les écoulements. Cette augmentation locale du nombre d'espèces masque en réalité la banalisation de la faune à l'échelle globale du bassin et des critères comme la structure en terme de guildes s'avèrent alors plus pertinents pour déceler d'éventuelles modifications du peuplement. Le contexte régional est aussi important à prendre en compte.

Nous venons de voir également à quel point le peuplement piscicole actuellement en place est le fruit d'une longue histoire co-évolutive dans laquelle l'Homme occupe une place centrale. Ceci pose le choix délicat d'un état de référence, en soulignant d'emblée, comme le préconisent Boon (1992²) et Wasson (1992³), qu'une référence n'est pas un objectif, mais une situation repère, correspondant aux potentialités intrinsèques du milieu - la « bonne santé » de l'écosystème - qui permet de définir un objectif réaliste de conservation ou de restauration.

Dans le cas de la Seine, il ne paraît guère réaliste d'envisager une restauration *sensu stricto* laquelle sous-entend le retour à l'état originel « pristine » présumé, le rétablissement des fonctions et des processus sans lesquels les communautés d'organismes ne peuvent subsister. L'artificialisation est en effet telle, que c'est davantage une reconquête ou une réhabilitation qui est nécessaire, c'est-à-dire une restauration *sensu lato* qui cherche simplement à arrêter et à redonner à l'écosystème dégradé une trajectoire ressemblant à celle supposée qui prévalait avant l'apparition de perturbations. Certes, des seuils d'irréversibilité ont été franchis, les principales espèces migratrices ont disparu, mais tout ne semble pas perdu, comme en témoigne par exemple la présence de la quasi totalité des espèces, qui semble traduire dans la situation présente l'extraordinaire résistance de l'hydrosystème fluvial. Il est néanmoins urgent d'intervenir et, s'agissant des poissons, quelques éléments sont susceptibles de servir de guide pour orienter l'action en vue de la préservation d'un patrimoine essentiel, le but ultime étant de restaurer l'ensemble de l'écosystème, même si parfois l'accent peut porter sur un composant ou un attribut particulier.

Pour accomplir l'ensemble de leur cycle vital les poissons doivent pouvoir circuler librement dans les cours d'eau entre les zones de nourrissage, de reproduction et de repos qui satisfont leurs exigences biologiques. Celles-ci sont très variées selon les espèces et évoluent au cours de leur développement individuel. Assurer la totalité de ces besoins implique la préservation de l'intégrité des écosystèmes aquatiques à l'échelle du bassin.

¹ Shannon C.E., 1948. A mathematical theory of communications. *Bell System Technical Jour.*, 27, 379-423, 623-656.

² Boon P.J., 1992. *Essential elements in the case for river conservation*. p. 11-33, in: P.J. Boon, P. Calow & G.E. Petts (Eds), *River conservation and management*, John Wiley & Sons, Chichester.

³ Wasson J.-G., 1992. La rivière et l'homme : vers une gestion par bassin intégrant la dimension écologique. *Revue de Géographie de Lyon*, 67 (4), 333-343.

Toutefois, beaucoup d'éléments indiquent que le goulot d'étranglement du recrutement, et donc du maintien de nombreuses populations, est lié au succès de leur reproduction ainsi qu'aux capacités de survie des jeunes alevins. Garantir le maintien de conditions favorables à leur reproduction est donc une exigence essentielle pour l'ensemble des espèces.

Ceci est manifeste pour les grands migrateurs, dont l'accès aux frayères a été définitivement coupé, entraînant ainsi leur disparition. Ces poissons migrateurs sont une « référence » et, à cet égard, il paraît toujours souhaitable qu'une espèce hautement symbolique comme le saumon reste un étendard de la qualité du milieu fluvial. Bien sûr, il peut paraître aujourd'hui peu réaliste d'espérer rétablir sur la Seine les conditions nécessaires au maintien de populations autonomes et auto-suffisantes (self-sustaining). Mais ceci doit cependant rester un objectif car toute action visant à satisfaire les exigences biologiques de cette espèce, comme par exemple rétablir la libre circulation ou améliorer la qualité physico-chimique de l'eau, profitera également aux autres, voire plus globalement à l'ensemble de l'écosystème fluvial.

Dans les petits cours d'eau des têtes de bassin, ce sont les travaux liés aux opérations d'aménagement hydraulique (drainage, recalibrage...) ou la multiplication des étangs, constatée dans certaines régions comme le Morvan par exemple, qui se sont traduits par la disparition physique ou le libre accès impossible des zones de reproduction d'une espèce comme la truite, et auxquels il faut remédier.

Dans les secteurs plus aval, la plupart des cyprinidés d'eaux vives ont régressé. Pour ces poissons, en particulier, mais aussi pour tous les autres, il est d'abord indispensable de préserver les secteurs amont où l'action de l'homme ne s'est pas encore manifestée de façon irréversible, notamment là où la rivière n'est pas encore transformée en voie navigable. Ces secteurs sont actuellement les seuls où la variété des habitats de la plaine alluviale est encore propice au maintien d'une faune diversifiée.

Toutefois, il convient également de dépasser maintenant la stricte logique « débit » et de raisonner davantage en termes de « régime » hydraulique, intégrant ainsi une nécessaire variabilité tant saisonnière qu'inter-annuelle.

Dans le cas du brochet par exemple le maintien de crues est essentiel en fin d'hiver ou début de printemps, selon les conditions de la température de l'eau. Pour les autres poissons, qu'ils soient cyprinidés d'eaux vives ou non, il est crucial de veiller à la bonne mise en eau des annexes péri-fluviales en période estivale, lors de leur reproduction et des premiers stades de développement des alevins. Cela implique qu'il faut maintenir des niveaux d'eau suffisants et aussi éviter d'éventuelles fluctuations journalières, comme celles que semblent entraîner certaines manœuvres des barrages de navigation, qui risquent d'exonder les pontes et de compromettre irrémédiablement la reproduction.

Mais il serait en outre nécessaire de recréer les conditions d'une dynamique fluviale structurante et morphogène que n'autorise pas actuellement la régulation des débits. Cette question constitue un enjeu majeur pour les années futures car les annexes hydrauliques encore fonctionnelles aujourd'hui vis-à-vis de la reproduction des espèces sont menacées à plus ou moins court termes.

À l'aval des barrages-réservoirs, en effet, les différents types d'annexes hydrauliques d'origine naturelle, issus des déplacements latéraux du fleuve dans sa plaine alluviale, s'ensavent aujourd'hui progressivement et sont à terme voués à l'atterrissement. Ce vieillissement des milieux qui composent la plaine alluviale est un processus évolutif normal mais il s'inscrit ordinairement dans une dynamique au cours de laquelle se créent simultanément d'autres milieux similaires.

Dans la partie canalisée à l'aval de la Bassée, c'est l'entretien des anciens méandres rescindés qui pose problème. Le plus souvent, la communication amont avec le chenal actif a été supprimée pour éviter l'envasement rapide de ces milieux en raison des fortes teneurs en MES apportées par la rivière et des faibles vitesses d'écoulement (Hervé, *com. pers.*). Cependant le vieillissement de ces milieux est malgré tout en cours... la sédimentation y est importante et les végétaux deviennent envahissants.

Dans les deux cas, cette dégénérescence se traduit par un peuplement caractéristique, essentiellement dominé par des espèces à faible valeur halieutique comme le poisson-chat et la perche-soleil. Concomitamment, ces milieux deviennent moins propices à la reproduction d'autres espèces plus intéressantes.

L'évolution de ces milieux, voués au comblement progressif, pourrait cependant être évitée si une reprise des dépôts était encore possible occasionnellement, en période de forts débits. L'importance de tels « resets » régénérateurs a déjà été soulignée dans des conditions naturelles comme le secteur tressé du Haut-Rhône (Amoros, 1991¹).

De même, des aménagements visant à rétablir la communication d'anciens bras délaissés ont également été préconisés pour le Danube par exemple (Schiemer & Waidbacher 1992²). Dans la partie de la Seine aménagée, de telles actions semblent envisageables.

Il est clair que dans un tel contexte aménagé, c'est bien un véritable génie écologique qu'il s'agit de mettre en œuvre.

Soulignons enfin que ces considérations délibérément orientées sur les mesures de protection ou de réhabilitation physique des milieux afin de garantir des conditions favorables à la reproduction des espèces ne sauraient bien entendu faire oublier la nécessité impérieuse de veiller à la bonne qualité physico-chimique des eaux. Cette question pourtant essentielle n'a guère été abordée en détail au cours de nos travaux. La pollution des eaux est cependant à l'origine de nombreux déséquilibres des peuplements piscicoles. Les sources diffuses de substances toxiques sont actuellement les plus préoccupantes. Leurs conséquences sont réputées majeures dans les petites rivières des têtes de bassin mais restent encore mal connues, ainsi qu'à l'aval de l'agglomération parisienne. S'agissant des rejets urbains, les progrès accomplis en matière d'assainissements ont conduit à une amélioration sensible (Boët *et al.* 1999³). Rappelons qu'il y a quelques années en effet, l'extrême pauvreté du peuplement piscicole, liée au déficit chronique et prolongé en oxygène dissous des eaux entre Paris et Méricourt, rendait moins visible au grand public le problème de la Seine aval. Néanmoins, les efforts en matière d'assainissement doivent à l'évidence être encore poursuivis et concerner également la limitation des rejets toxiques. Ceci, d'autant plus que ces substances sont susceptibles d'agir entre elles de façon conjuguée et en synergie avec la faible oxygénation liée à la dégradation bactérienne de l'importante charge organique des surverses d'orage.

¹ Amoros C., 1991. Changes in side-arm connectivity and implications for river system management. *Rivers*, 2 (2), 105-112.

² *Op. cit.* n. 11, p. 30.

³ Boët P., Belliard J., Berrebi-dit-Thomas R. & Tales E., 1999. Multiple human impacts by the City of Paris on fish communities in the Seine River basin, France. *Hydrobiologia*, 410, 59-68.

Annexe : sélection de publications

- A1. Belliard J., **Boët P.** & Tales É. (1997). Regional and longitudinal patterns of fish community structure in the Seine River basin, France. *Environ. Biol. Fish.*, 50 (2): 133-147.
- A2. Berrebi-dit-Thomas R., Belliard J. & **Boët P.** (1998). Caractéristiques des peuplements piscicoles sensibles aux altérations du milieu dans les cours d'eau du bassin de la Seine. *Bull. Fr. Pêche et Pisciculture*, 348: 47-64.
- A3. Berrebi-dit-Thomas R., **Boët P.** & Tales E. (2001). Macrohabitat characteristics influencing young-of-the-year fish assemblages in connected lentic backwaters in the Seine River (France). *Arch. Hydrobiol.*, 135 (2-4): 119-135.
- A4. **Boët P.**, Akopian M., Belliard J., Berrebi-dit-Thomas R., Pourriot R., Tales É. & Testard P. (1998). Une faune aquatique sous pressions multiples. pp. 627-678, in: M. Meybeck, G. de Marsily & E. Fustec (eds), *La Seine en son bassin. Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé*. Elsevier, Paris.
- A5. **Boët P.**, Belliard J., Berrebi-dit-Thomas R. & Tales É. (1999). Multiple human impacts by the City of Paris on fish communities in the Seine River basin, France. *Hydrobiologia*, 410: 59-68.
- A6. **Boët P.** & Fuhs T. (2000). Predicting presence of fish species in the Seine River basin using artificial neural networks. pp. 131-142, in: S. Lek & J.-F. Guégan (eds), *Artificial neuronal networks. Application to ecology and evolution, Environmental Science*. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg.
- A7. Mouchel J.-M., **Boët P.**, Hubert G. & Guerrini M.-C. (1998). Un bassin et des hommes : une histoire tourmentée. pp. 77-125, in: M. Meybeck, G. de Marsily & E. Fustec (eds), *La Seine en son bassin. Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé*. Elsevier, Paris.
- A8. Tales É., **Boët P.** & Berrebi-dit-Thomas R. (1996). Les peuplements de poissons de l'année de quelques types d'annexes fluviales dans la plaine de la Bassée (Seine). *Bull. Fr. Pêche et Pisciculture*, 343 (4): 189-202.

Disponibles en ligne [<http://cemadoc.cemagref.fr>]