

PROGRAMME GICC – AQUABIO

**Conséquences potentielles du changement climatique sur les biocénoses
aquatiques et riveraines françaises**

RAPPORT FINAL

Novembre 2003

COORDINATEUR : **PONT Didier** Directeur de Recherche au CNRS
UMR CNRS 5023. Ecologie des Hydrosystèmes Fluviaux. Université Lyon I.
43, bd du 11 novembre 1918. 69622 VILLEURBANNE.
Tel : 04 72 44 82 18 Fax : 04 72 43 11 41 E-mail : dpont@biomserv.univ-lyon1.fr

LISTE DES PARTENAIRES:

CEMAGREF	UR Qualité et fonctionnement hydrologique des systèmes aquatiques. Grpt Antony
CEMAGREF	UR Qualité eaux. Grpt Bordeaux
CEMAGREF	UR Hydrobiologie. Grpt Aix en Provence
CEMAGREF	UR Hydroécologie Quantitative. Grpt Lyon
CEMAGREF	UR Ingénierie pour les systèmes complexes. Grpt Clermont-Ferrand
CNRS	UMR C5171 Laboratoire DYNamique de la BIODiversité, U. P. Sabatier (Toulouse)
CNRS	UMR 5601 Laboratoire d'Economie et de Gestion. U. de Bourgogne
CNRS	UMR 5023 Ecologie des Hydrosystèmes Fluviaux. Université Lyon 1
CNRS	UMR 5600 CRENAM. Université de St-Etienne
C.S.P.	Conseil Supérieur de la Pêche. Paris. Rennes

OBJECTIFS INITIAUX DU PROJET :

Les conséquences des changements climatiques planétaires sont susceptibles d'affecter de façon significative la plupart des écosystèmes. A l'échelle régionale, les modifications du climat auront de profondes répercussions sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes aquatiques et riverains.

L'objectif de notre programme de recherche est d'analyser dans quelle mesure les changements climatiques tels qu'actuellement attendus en France sont susceptibles :

- de favoriser la propagation des espèces végétales exotiques dans les milieux riverains et aquatiques, parfois au détriment des taxons autochtones,
- de modifier les peuplements de macro-invertébrés et de poissons des cours d'eau français,
- de générer de multiples enjeux socio-économiques

Les résultats attendus sont :

- de mettre en évidence les types d'habitats et/ou les zones géographiques pour lesquels les conséquences biologiques du réchauffement climatique seront les plus marquées,
- de préciser la sensibilité potentielle des espèces ou des taxons face aux changements climatiques à l'échelle de leurs aires de répartition sur le territoire national,
- d'analyser les conséquences liées à la perte d'habitats favorables sur des réseaux hydrographiques test,
- d'évaluer les risques d'expansion des espèces végétales exotiques,
- d'élaborer un cadre pour une réflexion cohérente autour des enjeux halieutiques et associés.

Notre méthodologie privilégie la modélisation à partir de l'exploitation de grandes bases de données existantes et la combinaison d'approches à différentes échelles (nationales et régionales). Ces objectifs sont accessibles dans la mesure où nous pourrions nous appuyer sur les scénarios et prévisions climatiques établis par les autres projets GICC et en particulier le programme GICC-Rhône (E. Leblois, prévisions hydrologiques) et le programme de Y. Polcher (scénarios globaux).

Le projet est structuré en 7 Actions :

ACTIONS DE RECHERCHE :

Action 1 : Spatialisation des données thermiques à l'échelon national. UMR 5600, UMR 5023

Action 2 : Analyse des réponses biologiques à la variabilité climatique par l'examen de chroniques temporelles. UMR 5023, CEMAGREF Aix et Antony

Action 3 : Modélisation des réponses biologiques à l'échelon national. UMR 5023

Action 4 : Chantier « Adour-Garonne » : Typologie des réponses des espèces végétales exotiques. UMR 5576, CEMAGREF-Bordeaux

Action 5 : Chantier « Bassin du Rhône ». Réponses à la variabilité hydrologique et fragmentation des habitats dans un réseau hydrographique. UMR 5023 CEMAGREF Lyon

Action 6 : Chantier « Bassin de la Seine ». Sensibilité à la température des arbres de décision pour la prédiction des peuplements piscicoles. CEMAGREF-Anthony et Clermont-Ferrand

Action 7 : Enjeux halieutiques et associés. Réponses des acteurs. UMR 5601

Résumé étendu

Action 1 : Spatialisation des données thermiques à l'échelon national. Rogers C. (UMR 5600 / UMR 5023)

Cette première action porte sur la mise en place et validation des données thermiques nécessaires à la réalisation d'autres actions du programme. Elle comprend trois parties : (1) l'interpolation spatiale de températures moyens mensuelles sur la France, (2) la vérification de la corrélation entre températures de l'eau et températures de l'air au pas de temps mensuel, et (3) l'intégration d'anomalies thermiques issues des simulations du changement climatique.

La création d'une base d'estimations des températures moyennes mensuelles 1980-99, soit 240 couvertures, présente un intérêt majeur : la possibilité de disposer d'une base homogène au niveau national, commun aux différents chantiers régionaux, et à partir de laquelle il a été possible d'élaborer des paramètres optimisés pour la modélisation écologique. L'interpolation a été effectuée à partir d'observations de 534 postes de la Météorologie Nationale, par le krigage des températures réduites au niveau de la mer en fonction du coefficient moyen du gradient thermique d'altitude en France. Les estimations furent ensuite transformées en estimations des températures vraies d'après les altitudes d'un M.N.T. kilométrique (EROS Data Center, USGS). Le contrôle indépendant sur une sélection aléatoire de 120 postes montre une erreur moyenne de $\pm 0,59$ °C et de $\pm 1,84$ °C à un intervalle de confiance à 95%, tandis que l'analyse par station de contrôle relève que certaines d'entre elles présentent des erreurs fortes, systématiquement positives ou négatives (situations atypiques). L'ensemble des estimations mensuelles a été constitué en base de données géoréférencée, diffusée aux équipes participant au programme AQUABIO.

Les températures de l'air sont souvent employées en hydrobiologie comme substitut des températures de l'eau, mais vu l'importance des variables thermiques dans le cadre du projet, la vérification du bien fondée de la démarche paraît nécessaire, notamment au pas de temps mensuelle et par rapport aux estimations du S.I.G. Une revue bibliographique sommaire et plusieurs analyses effectuées sur différentes séries de données montrent qu'en terme de la variabilité annuelle : (1) la corrélation entre températures de l'air et températures de l'eau s'optimise à partir des durées ≥ 10 jours sur chroniques continues ($R^2 > 0,9$), (2) que sur séries discontinues par bassin de gestion (données R.N.B.) la relation globale est assez bonne ($R^2 > 0,8$) et presque toujours meilleur sur stations individuelles ou sous populations régionaux ($R^2 > 0,85$), et (3) Les corrélations obtenus avec les estimations du S.I.G. sont aussi bonnes voir légèrement meilleurs que celles obtenus avec températures de l'air du R.N.B.

Cinq simulations climatiques ont été prises en compte pour l'évaluation des impacts des changements thermiques sur les biocénoses aquatiques et riveraines. Quatre simulations à base résolution ont été mises à disposition par le Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) du ISPL, Paris (modèles LMD6 A (Sechiba) et B (Bucket) et CNRM A et B). Une cinquième simulation à Haute résolution (simulation ARPEGE-ISBA sous HadCM3, à résolution variable) a été obtenue directement auprès du CNRM, Toulouse pour affiner la représentation spatiale. Alors que les anomalies thermiques des simulations à basse résolution ont été appliquées telles qu'elles au niveau des mailles de simulation (200 à 300 km de côté), les anomalies à haute résolution ont fait l'objet d'une interpolation régularisée (fonction Spline) pour assurer une certaine continuité spatiale. Les anomalies mensuelles ont été calculées par soustraction des

valeurs de référence aux valeurs de simulation, puis appliqués aux températures actuelles du S.I.G.

Action 2 : Analyse des réponses biologiques à la variabilité climatique par l'examen de chroniques temporelles.

2.1- Importance de la variabilité hydroclimatique régionale sur les peuplements de macroinvertébrés benthiques du Bas-Rhône. Bady P. & Dolédec S. (UMR CNRS 5023, Lyon1)

L'analyse de la réponse temporelle des macroinvertébrés benthiques à la variabilité hydrologique et thermique se base sur des séries de campagnes d'échantillonnage réalisées sur le Bas-Rhône par le Cemagref d'Aix-en-Provence et l'ARALEPBP (Université Lyon 1) entre 1985 et 1999. Des modèles couplant des variables thermiques et hydrologiques permettent d'expliquer en partie l'évolution temporelle de la richesse taxonomique et de la proportion de quelques familles. Dans le contexte multi-spécifique, multi-site et multi-date de l'étude, les analyses multitableaux encore peu utilisées en écologie telle que l'analyse de co-inertie multiple (ACOM) s'avèrent optimales dans exploration des tableaux faunistiques. Cette méthode est fondée sur la généralisation de la co-inertie à plus de deux tableaux. Elle permet de coordonner plusieurs analyses et de comparer la reproductibilité des organisations spatio-temporelles des assemblages de macroinvertébrés. Elle fournit une représentation claire des variations intra-sites des distributions annuelles des peuplements par rapport à une structure de référence. Nos résultats montrent l'existence d'une forte structure temporelle commune à l'ensemble des sites s'installant malgré la plasticité des réponses spatio-temporelles des descripteurs faunistiques. Ces résultats ouvrent un champ de réflexion sur la pertinence des descripteurs et des méthodes employées pour rendre compte de la complexité des structures des peuplements.

2.2- Variabilité inter-annuelle de la reproduction des poissons cyprinidae dans le Rhône à l'aval de Lyon : rôle de la température. Carrel G. (U.R. Hydrobiologie, Cemagref Aix-en-Provence), Olivier J.M. (UMR CNRS 5023, Lyon1), Poirel A. (EDF, DTG Grenoble) & Breil P. (U.R. Hydrologie – Hydraulique, Cemagref Lyon).

Sous nos latitudes, le succès de la reproduction des poissons des eaux courantes est largement contrôlé par la réalisation de conditions physiques favorables ; interaction complexe entre des variables environnementales périodiques et hautement prédictives telles que la durée du jour et la température, et d'autres facteurs abiotiques, nettement moins prévisibles, dépendants de l'hydrologie. La variabilité inter-annuelle du succès de la reproduction des poissons Cyprinidae a été étudiée à partir des données piscicoles collectées depuis 20 ans (1982 et 2001) au droit des sites nucléaires de la vallée du Rhône. Elle est mise en parallèle avec les données thermiques acquises dans le cadre de l'auto-contrôle de ces installations industrielles. L'analyse du régime thermique printanier et estival du Rhône à l'aval de Lyon a été réalisée à partir de 21 descripteurs de 4 chroniques journalières de températures enregistrées par Electricité de France depuis 25 années (1977-2001). Des modifications sensibles du régime sont intervenues depuis la fin des années 1980, traduites par un réchauffement, une précocité des différents seuils thermiques, une réduction de la durée de la période froide et une prolongation de la durée de la période la plus chaude. Si la température apparaît déterminante quant au succès de la reproduction des espèces étudiées, d'autres facteurs abiotiques tels que ceux associés à la variabilité hydrologique ne peuvent être ignorés dans l'étude de cette chronique piscicole.

2.4- Effet de la variabilité hydroclimatique sur les peuplements de poissons de la Seine. Tales E. (U.R. Qualité des eaux, Cemagref Antony).

Une approche similaire sur les peuplements piscicoles a été menée à partir des chroniques hydrobiologiques (1991-2001) du suivi du Centre Nucléaire de Production d'Electricité de Nogent-sur-Seine. Les variations du régime hydroclimatique (débit et température) ont été appréhendées par une ACP portant sur 10 variables environnementales. L'évolution temporelle du peuplement de poissons, disponible aux trois stations, a été analysée par une Analyse de COinertie Multiple (ACOM). La structure temporelle de référence du peuplement de poissons comptant 25 espèces est définie par six espèces. L'ablette et la brème caractérisent les premières années, le gardon, le goujon et la bouvière, les années intermédiaires et le brochet, l'année 2001. L'agencement des autres espèces ne présentent pas d'évolution temporelle caractéristique au cours des 11 années.

2.3- Facteurs climatiques et densité-dépendance. Grenouillet G. & Pont D. (UMR CNRS 5023, Lyon1).

A l'échelle populationnelle, les fluctuations d'abondance des juvéniles de gardon (*Rutilus rutilus*) ont été étudiées sur une période de 11 années (1987-1997) au niveau de quatre secteurs du Bas-Rhône. La reproduction apparaît comme un événement synchrone sur tout l'axe rhodanien, indépendant de la distance entre les populations, et directement liée aux facteurs hydro-climatiques. Les températures moyennes de l'eau en juin expliquent ainsi 55 % de la variabilité du recrutement en fin de période de croissance. A l'inverse, l'analyse de la survie apparente des juvéniles durant leur premier hiver (conditions défavorables) met en évidence une liaison significative entre ce taux de survie et leur densité à la fin de leur première année de vie, soit un mécanisme de régulation de type densité-dépendant. Ces résultats peuvent expliquer la disparition du synchronisme inter-sites chez les juvéniles de un an. Ces résultats démontrent que les interactions biotiques peuvent atténuer de façon significative les conséquences de la variabilité climatique sur le stock d'individus reproducteur chez cette espèce.

Action 3 : Modélisation des réponses biologiques à l'échelon national

3.1- Les espèces piscicoles. Pont Didier & Rogers Crane. (Univ. Lyon1-CNRS UMR 5023)

L'objectif est d'évaluer les conséquences potentielles du changement climatique sur les espèces de poissons dans les cours d'eau français en se focalisant plus particulièrement sur les aspects liés au réchauffement. De façon plus précise, il s'agit d'évaluer les modifications introduites par les différents scénarios thermiques dans la disponibilité en habitat favorable. Cette approche ne prend donc pas en compte les modifications hydrologiques, les influences des processus de dispersion et des interactions trophiques. Nous avons eu recours, en collaboration avec le Conseil Supérieur de la Pêche, aux données du Réseau Hydrobiologique et Piscicole pour construire des modèles probabilistes prenant en compte la température de l'air au droit des stations (cf Action 1), mais également le contexte hydro-morphologique et régional du tronçon de cours d'eau considéré.

Dans une première étape, et à l'aide de la méthode du Hierarchical Partitionning, nous avons évalué, pour les 13 espèces les plus communes, leur sensibilité relative à l'hydro-morphologie locale (pente et largeur mouillée), à la moyenne thermique annuelle et à l'appartenance à l'un des 4 grands bassins français (unité régionale limitant la dispersion). Pour la plupart des espèces, la pente locale du tronçon de cours d'eau est un paramètre majeur et induit une succession des taxons le long de ce gradient écologique. Pour toutes les espèces peuplant préférentiellement l'aval, on observe une réponse positive à l'accroissement de la superficie du bassin drainé, en accord avec la théorie d'un accroissement continu de la richesse le long du gradient longitudinal. La température est un facteur contributif important pour deux espèces (Chabot : 28%, Lamproie : 32%) et secondairement pour trois autres (Gardon : 22%, Truite : 20%

et Ablette 20%). Enfin, l'unité hydrographique est le facteur prépondérant pour le Chabot (42%). Il représente une part élevée de la contribution totale indépendante pour le Vairon (28%), la Lamproie (27%), la Truite (24%) et la Loche (21%), soit au total les espèces caractéristiques des parties amont des cours d'eau. L'un des résultats les plus intéressants est ainsi le fait que les espèces peuplant préférentiellement les zones amont des réseaux hydrographiques se distinguent par l'importance des facteurs opérant à l'échelle régionale. Pour le Chabot, la Truite, le Vairon et la Lamproie de Planer, les effets cumulés de la température et du bassin représentent 37% à 73% de la variabilité indépendante expliquée contre 21 à 35% pour les autres espèces. Les faibles contributions observées pour l'amplitude thermique laissent à penser que ce paramètre n'est pas un excellent descripteur de la variabilité thermique intra annuelle et qu'il y a nécessité de recourir à une prise en compte plus fine de cette dernière (variabilité mensuelle).

Sur la base de ces premiers résultats obtenus dans le chapitre antérieur (§ 3.1.2), nous avons cherché à calibrer et à valider des modèles prédictifs de l'occurrence des espèces incluant en tant que variables explicatives, une description de l'habitat physique des espèces et des descripteurs de la variabilité thermique inter-saisonnière. En fonction de la biologie des espèces, nous avons défini quatre saisons biologiques. Par ailleurs, nous avons déterminé que la période optimale de calcul des moyennes thermiques saisonnières à associer à chaque pêche correspondait à une période de cinq ans précédant l'échantillonnage, soit la durée de vie de la plupart des espèces. Les optimums thermiques saisonniers simples ont été calculés pour les 25 taxons. Puis, des modèles de régression logistiques multiples incluant les descripteurs environnementaux les plus significatifs ont été calibrés et validés (matrices de confusion, Indice de Kappa). 22 espèces sont finalement correctement modélisées.

Sur cette base, nous avons simulé les réponses de ces taxons aux 5 scénarios de variabilité climatique disponibles afin d'évaluer les conséquences potentielles d'un doublement du CO₂ atmosphérique. En moyenne sur les 5 scénarios, 5 espèces présentent des réductions potentielles fortes de leurs occurrences sur les 792 stations concernées. Il s'agit de 4 espèces cryophiles (Truite, Chabot, Loche franche, Lamproie de Planer) et d'une espèce introduite, la Perche soleil. Pour la Truite, la Lamproie et la Loche, l'impact s'accroît progressivement en fonction de l'accroissement de l'anomalie thermique annuelle, avec des réductions d'occurrence nettes pour des anomalies supérieures à 2°C. Pour le Chabot, seul le scénario *ModMétéo* affecte de façon importante la distribution de cette espèce. A l'inverse, de nombreuses espèces de cyprinidés sont affectées positivement, et de façon continue avec l'accroissement de l'anomalie : Chevaine, Ablette, Perche, Hotu, Barbeau commun et Barbeau méridional. L'épinochette montre également une réponse similaire. Les modifications potentielles d'occurrence pour toutes ces espèces apparaissent importantes, en particulier pour les scénarios présentant des anomalies élevées, supérieures à 2°C (*ModCnrmA*, *ModMétéo*). Enfin, les modifications à attendre des aires de distribution sont fournies par bassin hydrographique et à l'aide de représentations cartographiques.

Les tendances décrites précédemment auraient ainsi des répercussions fortes sur les peuplements piscicoles avec de façon générale, une raréfaction des espèces actuellement caractéristiques des zones amont des réseaux et une extension des espèces de cyprinidés les plus rhéophiles vers ces zones amont. Pour de nombreuses espèces, les anomalies d'occurrence les plus faibles se situeraient dans les bassins côtiers de la Manche et en Bretagne. A l'inverse, l'occurrence de la truite serait gravement affectée sur le bassin de la Seine en raison de l'absence de zone d'altitude refuge.

Finalement, cette analyse montre que les réponses potentielles des espèces au changement climatique varient beaucoup d'une espèce à l'autre et démontre la nécessité de ne pas

entreprendre des approches directement au niveau des peuplements. En terme d'impact, les effets du réchauffement sur la distribution et l'abondance d'un grand nombre de taxons apparaissent comme important, pouvant entraîner pour certaines espèces comme la Truite et la Loche une réduction telle des présences que l'on peut émettre l'hypothèse d'un risque d'extinction dans certains bassins. D'autres espèces et notamment les cyprinidés rhéophiles, semblent par contre pouvoir bénéficier de ces modifications.

3.2- Réponses des macroinvertébrés. Doledec Sylvain. (Univ. Lyon1-CNRS UMR 5023)

L'évaluation des conséquences potentielles d'un changement climatique sur les peuplements de macroinvertébrés passe une étape exploratoire visant à coupler les données faunistiques et les données environnementales et à modéliser les relations par taxons. Les données utilisées dans cette action sont celles des réseaux nationaux de surveillance (RNB), l'idée sous-jacente étant de savoir si ces réseaux et les paramètres qu'ils intègrent sont à même de diagnostiquer des changements climatiques.

Au niveau peuplement la corrélation entre la faune de macroinvertébrés (présence/absence des familles) et les données environnementales comprenant les caractéristiques thermiques locales de l'eau (température moyenne), de l'atmosphère (écarts thermiques entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid), la distance à la source et les paramètres habituels de suivi de qualité des eaux (oxygénation et minéralisation) est égale à 0.32. Ceci laisse à penser qu'une part non négligeable de la variabilité des peuplements reste inexpliquée par ces données. Notons que l'ajout de l'altitude monte la corrélation à 0.35. Dans cette analyse, la température moyenne de l'eau ou les écarts thermiques contribuent à un peu moins de 50% sur les fonctions faunistiques élaborées, les facteurs principaux étant liés aux facteurs physico-chimiques associés au processus de minéralisation de la matière organique.

L'étude propose ensuite une base de données de modèles logistiques permettant de quantifier les facteurs conditionnant l'occurrence de 84 familles d'invertébrés habituellement rencontrées dans 213 situations dites de références des réseaux nationaux de bassin (qualité A et B). Trente familles sont influencées par la température moyenne de l'eau, parmi lesquelles 11 familles présentent uniquement cette influence (Hydroptilidae, Leptoceridae, Polycentropodidae, Limnephilidae, Caenidae, Dytiscidae, Hydraenidae, Atyidae, Limnionidae, Dendrocoelidae, Planariidae). Les 19 autres familles subissent en plus de manière significative les effets de la physico-chimie. La probabilité de présence de 10 familles décroît avec la température de l'eau. Parmi celles-ci 5 familles appartiennent à des groupes indicateurs élevés de la norme AFNOR (Perlidae, Odontoceridae, Glossosomatidae, Nemouridae, Sericostomatidae). Les 5 autres ne sont pas considérées comme indicatrices (Dytiscidae, Hydraenidae, Empididae, Limoniidae, Planariidae). Un total de 10 familles (Brachycentridae, Leptophlebiidae, Hydrobiidae, Planorbidae, Glossiphoniidae, Dryopidae, Haliplidae, Tipulidae, Oligoneuriidae, Lestidae) est influencé par les écarts thermiques atmosphériques en combinaison avec d'autres facteurs physiques et chimiques. Enfin, les Perlidae, Potamanthidae, Aphelocheiridae, Gomphidae et Platycnemididae sont influencés à la fois par la température moyenne de l'air et de l'eau. Le facteur biogéographique intervient dans 65% des cas et souligne la nécessité de spatialiser les prévisions par grand bassin hydrogéographiques au niveau national.

Enfin, la proportion psychrophiles (préférences thermiques $<15^{\circ}\text{C}$) et de taxons semi- et univoltins a été calculée dans chaque site d'étude. La température moyenne de l'eau figure dans les modèles à côté du gradient amont-aval (psychrophiles) ou de la minéralisation (voltinisme) et du facteur biogéographique. Si les modèles présentent une signification statistique leur pouvoir prédictif reste faible. On peut attribuer ceci au niveau taxonomique de la famille utilisé dans cette étude. Dans ce rapport, cette approche est basée sur le calcul de proportions de traits dans les sites

à partir des présences des taxons dans ces sites. Une approche non testée dans le cadre de ce travail consisterait à prédire la probabilité de présence de traits à partir des probabilités de présence des taxons.

En termes de perspective, la base de modèles proposée est susceptible d'être utilisée pour tester les scénarios de changements climatiques concernant les modifications thermiques. Les réseaux nationaux de bassin sont à l'heure actuelle les seuls outils d'échantillonnage standardisé à l'échelon français. Cette étude permettrait de tester si le RNB concernant les macroinvertébrés est à même de détecter un éventuel réchauffement climatique à travers les modifications de probabilités de présence des familles d'invertébrés habituellement prises en compte.

Action 4 : Typologie des réponses des espèces végétales exotiques (Adour-Garonne)

4.1- Réponses des espèces riveraines exotiques. Tabacchi E. & Planty-Tabacchi A.M. (Laboratoire DYnamique de la BIOdiversité, UMR C5171 Toulouse).

L'objectif de l'atelier 4 était de documenter la réponse des espèces riveraines et aquatiques du Sud-Ouest aux changements climatiques prévus. Notre hypothèse était que les espèces exotiques devaient être favorisées en relation avec leur caractère thermophile dominant. Une première modélisation de ces réponses a été initiée au travers de modèles logistiques, à partir de l'occurrence des 50 populations les plus fréquentes sur 245 sites distribués le long de huit cours d'eau du Bassin Adour-Garonne (données Planty-Tabacchi 1993). Les variables indépendantes retenues pour ce premier test ont été extraites de la base des Ecorégions de la France (Tabacchi et al. 1995). Elles présentent une résolution spatiale et une précision absolue faibles. Un quart des 250 modèles testés ne sont pas significatifs. Les restants traduisent trois types affirmés de réponse (type « C, cryophiles », type « TT, thermophiles forts », type « T, thermophiles faibles »). L'utilisation du jeu de données à hautes résolution et précision AQUABIO (Rogers & Lacaze) a fourni 100% de réponses significatives par rapport à la température moyenne sur l'année. On retrouve les trois groupes de réponses de la typologie précédente. Des simulations de réchauffement réalisées par paliers de +0,5°C montrent que les types C, d'origine essentiellement asiatiques, ne devraient pas voir leur occurrence significativement varier par rapport à ce facteur. En revanche, les types TT devraient saturer la plage actuelle 11-15°C sur le domaine géographique étudié dès une hausse de 1°C. Enfin, les groupes T traduisent une augmentation variable (en intensité et en localité) mais significative de leur occurrence au-delà de +1,5°C. A ce stade, les modélisations n'ont pu établir la part relative du facteur thermique dans le jeu de variables susceptible d'accroître à l'avenir l'occurrence des espèces. L'exemple de l'analyse des distributions locale et régionale de l'érable américain *Acer negundo* a démontré l'importance du régime de perturbation comme co-facteur de la dominance potentielle sur des espèces-cibles autochtones (saule blanc). On peut cependant prédire que cette occurrence va très significativement augmenter pour l'ensemble des espèces en aval du piémont des huit systèmes étudiés. Cette approche est poursuivie dans le cadre de deux projets INVABIO1 et INVABIO2 du MEDD).

Une approche expérimentale de l'effet combiné des conditions de vernalisation et de germination sur le succès de 5 populations exotiques et de 5 populations congénériques a été entreprise. Il apparaît que les conditions les plus chaudes (dans le domaine des températures actuellement constatées en bordure de la Garonne) ne se traduisent pas par un avantage des espèces exotiques sur les autochtones, les premières étant même plus performantes si leurs graines sont vernalisées. Ces premières conclusions ne peuvent pourtant pas être généralisées à l'ensemble des

700 populations riveraines et aquatiques du Sud-Ouest, eu égard aux plages thermiques testées et au nombre restreint d'espèces analysées.

4.2- Réponses des Jussies (*Ludwigia* sp.) Alain Dutartre et Karine Ankrenaz (Unité de Recherche Qualité des Eaux, Cemagref, Bordeaux)

L'analyse de la dynamique d'invasion des Jussies (*Ludwigia* spp.), espèces sub-tropicale surtout invasives en eau calme, sur le Territoire national à partir de données bibliographiques et d'une enquête publique révèle une apparente progression rapide vers le Nord. Après analyse, cependant, il est difficile de dégager une logique de progression strictement associée aux facteurs géographiques et climatiques. D'autres facteurs interviennent en effet, notamment les possibilités d'introduction à partir du réseau hydrographique ou de petits bassins d'agrément. La modélisation des réponses se poursuit dans le cadre d'un projet INVABIO2 du MEDD.

Action 5 : Chantier Bassin du Rhône. Réponses à la variabilité hydrologique

5.1- Réponse des macro-invertébrés à la variabilité temporelle de l'habitat physique. Doledec S. (UMR CNRS 5023, Lyon1).

28 stations du bassin du Doubs ont fait l'objet de description de l'habitat physique conformément au protocole proposé par Lamouroux (1997). A l'aide de chronique de débits la distribution des contraintes au fond (F0 à F19) a été reconstituée pour différents déciles de débit (Q1 à Q90). Pour les stations ne présentant pas de jaugeage, les déciles ont été estimés à l'aide de relation de puissance liant la taille du bassin versant et le débit. La variabilité hydraulique a été estimée par la variabilité intra-station des distributions des contraintes au fond. Cette nouvelle variable hydraulique a été intégrée aux autres facteurs physiques disponibles (Altitude, Pente, Distance à la source, Débit moyen minimum, Surface mouillée à l'étiage). On montre que les assemblages des trois groupes d'espèces d'insectes pris en compte (Plécoptère, Ephéméroptères et Trichoptères) sont largement influencés par l'habitat physique. De même, les caractéristiques biologiques de ces groupes montrent une structure reliée à l'habitat physique. Mais de manière surprenante, la variabilité hydraulique reconstituée n'est pas un paramètre décisif de l'organisation des communautés dans cet exemple. Deux hypothèses peuvent être faites. La première concerne le type de réseau étudié. En effet, la région de prospection est une région karstique et les mesures de débit et de tailles de bassin versant peuvent être sous-estimées. La seconde concerne le large écart temporel d'échantillonnage entre la faune et l'habitat physique. Des précautions ont été prises pour considérer des stations n'ayant pas subi de modifications de morphologie. Cependant, des interventions sur le bassin versant modifiant les écoulements ne sont pas totalement exclues.

5.2- Préférences hydrauliques des macroinvertébrés benthiques. Doledec Sylvain (UMR CNRS 5023, Lyon1) & Lamouroux Nicolas (UR Hydroécologie Quantitative, Cemagref- Lyon)

Cette approche s'appuyait entièrement sur des données existantes comprenant 580 prélèvements unitaires effectués dans 9 cours d'eau allemands à 2 ou 3 saisons. Chaque prélèvement unitaire comprend une liste faunistique et correspond à la valeur d'un hémisphère FST mesurant la contrainte hydraulique au fond au point de prélèvement. Trois modèles emboîtés non linéaires à effets mixtes ont permis d'établir et de tester les courbes de préférences hydrauliques de 151 taxons. Le modèle moyen par taxon explique 25% des variations de densités entre campagnes. Ces valeurs sont respectivement de 20% et de 48% pour des jeux de données indépendants. Les espèces montrent donc des réponses contrastées aux variations de valeurs des hémisphères FST. On observe un lien de type curvilinéaire entre les préférences moyennes des taxons et la variance de ces préférences moyennes de ceux-ci ($R^2 = 0.68$). Cette relation indique une amplitude réduite de la niche hydraulique pour les valeurs extrêmes de FST. Les préférences

moyennes montrent une relative stabilité intra-genres. Au niveau de la famille, on observe des gammes de variations importantes (ex. Baetidae) et de nombreux chevauchements.

Il existe une relation forte entre les préférences moyennes des taxons du jeu de données ayant servi à l'établissement des courbes de préférences hydrauliques et des jeux de données indépendants ($R^2 = 0.70$ et $R^2 = 0.62$, respectivement). Par contre aucun lien significatif n'a été décelé entre les amplitudes de niche hydraulique des taxons communs aux différents jeux de données. La variabilité spatio-temporelle des préférences hydrauliques est significative. Tous taxons confondus, le modèle le plus complexe, par taxon et par campagne, explique 38% de la variance intra-campagne des densités. Sur les 38% de variance expliquée des variations intra-campagnes, 2/3 sont liées aux préférences moyennes des taxons et 1/3 à la variabilité entre campagnes d'échantillonnage. Les préférences hydrauliques exprimées à travers le modèle par taxon et par campagne présentent un effet taxonomique significatif ($R^2 = 0.5$). Par contre les autres variables : la saison, le site, le FST moyen de la campagne, la densité moyenne du taxon dans une campagne intégrée comme cofacteur dans l'ANOVA n'augmente pas significativement le pourcentage de variance expliquée.

Les résultats de ces deux approches sont susceptibles d'être utilisés pour tester l'impact des changements climatiques liés aux différents scénarios climatiques. De plus, les modèles développés pour les espèces sont susceptibles d'être étendus aux caractéristiques biologiques (taille, physiologie, mobilité, etc.) de celles-ci.

5.3- Sensibilité écologique des poissons aux anomalies hydrauliques. Lamouroux Nicolas (UR Hydroécologie Quantitative, Cemagref- Lyon)

Cette contribution est ciblée uniquement sur l'impact des changements hydrauliques (vitesses, hauteurs d'eau ...) sur les poissons. L'hydraulique est une caractéristique majeure de l'habitat des espèces aquatiques, qui guide leur choix d'habitat comme leur stratégie évolutive à plus long terme. Une raison supplémentaire du choix de se focaliser sur les changements hydrauliques liés au climat est qu'il existe sur ce bassin des modèles quantitatifs validés reliant les peuplements aux conditions hydrauliques, modèles dont on peut estimer l'incertitude. Notre démarche se base sur le couplage d'une série de modèle reliant les anomalies biologiques aux anomalies hydrauliques, d'une part, et les anomalies hydrauliques aux anomalies hydrologiques mise en évidence par le GICC Rhône en réponse à des scénarios de doublement du CO2 atmosphérique.

La première leçon de cet exercice de modélisation est que nous sommes maintenant capables de réaliser des exercices quantitatifs de modélisation d'impacts biologiques de modification de débits à large échelle. Ce n'était pas possible il y a quelques années où les modèles d'habitat nécessaires pour cet exercice étaient trop complexes et trop peu validés. Répétons toutefois que l'utilisation de modèles d'impact biologiques 'agrégés' ne doit pas faire oublier qu'il impliquent un fonctionnement non-altéré de mécanismes biologiques, à l'échelle des individus, qui peuvent également être sujets à anomalies. C'est le côté 'dangereux' des modèles d'habitat simplifiés que nous utilisons à l'échelle des tronçons de cours d'eau.

Si l'on considère comme plausible une réduction des débits mensuels secs sur le bassin de l'ordre de 30% - 40 % (plusieurs scénarii s'accordant la dessus), une réduction moyenne de la proportion des espèces d'eau courante de 20% est également plausible. Elle pourrait concerner le nord-nord-est du bassin en particulier. Sans être 'catastrophique', cette évolution pourra renforcer la régression générale de ces espèces en Europe (en particulier hotu, ombre commun, vandoise, barbeau), due à l'aménagement des cours d'eau.

5.4- Structure en réseau et Richesse piscicole. Pont D. & Grenouillet G. (UMR CNRS 5023, Lyon1).

Dans le cadre d'un bassin test (la Haute-Saône), entièrement renseignés des points de vue physiques et biologiques, nous avons montré que la richesse spécifique locale (*LSR*) des assemblages piscicoles dépend à la fois de conditions locales d'habitat et du positionnement spatial du cours d'eau. Nous avons abordé les effets relatifs de facteurs locaux d'habitat et de facteurs spatiaux (amont et aval) sur la richesse spécifique. Parmi les variables locales d'habitat, seules la largeur et la pente du cours d'eau influencent significativement *LSR*. Des facteurs spatiaux interviennent également dans la distribution de *LSR* et induisent une autocorrélation spatiale, révélant ainsi des processus biotiques contagieux qui structurent les communautés piscicoles. Cependant, nous n'avons pas pu vérifier les prédictions selon lesquelles des cours d'eaux de tête de bassin se jetant directement dans de grands cours d'eaux devraient avoir des richesses spécifiques plus élevées. L'autocorrélation spatiale ne concernait que les cours d'eau aval (ordre 4 à 7), suggérant ainsi que l'importance relative de l'habitat local et des processus biotiques pourrait dépendre de la position le long du gradient longitudinal.

Dans le cadre de notre problématique, ces résultats, qui démontrent plus faible importance des processus d'immigration opérant de l'amont vers l'aval par rapport aux flux aval-amont et leur moindre influence dans les têtes de bassin tend encore à renforcer l'ampleur potentielle des impacts du réchauffement sur les communautés piscicoles de l'amont. Ce processus tendrait donc à faciliter la colonisation des zones intermédiaires des cours d'eau par les cyprinidés rhéophiles, détriment des espèces rhitroniques (Truite, Chabot, Loche franche).

Action 6 : Chantier Régional « Bassin de la Seine». Test de la sensibilité des modèles d'arbres de décision de prédiction de la faune piscicole aux variables hydro-climatiques

Philippe Boët, Guillaume Gorges, Olivier Ledouble. U.R. Qualité et Fonctionnement Hydrologique des Systèmes Aquatiques, Cemagref Antony

Des modèles prédictifs de la présence-absence des espèces piscicoles les plus fréquentes sur le bassin de la Seine sont établis au moyen d'une technique statistique non-linéaire et robuste, dite arbre de décision.

Ces modèles spécifiques sont spatialisés au moyen d'un système d'information géographique (SIG), qui permet d'en visualiser les résultats à l'échelle de l'ensemble du réseau hydrographique.

Les prédictions sont faites en fonction des caractéristiques des cours d'eau. Les modèles sont construits en privilégiant le recours aux données existantes. Ces dernières sont directement issues de bases de données (Corine Land Cover, banque Hydro, etc.) ou dérivées, calculées, par le SIG et/ou un modèle numérique de terrain (pente, superficie de bassin, sinuosité).

Les performances sont évaluées à l'aide de courbes ROC, dont l'usage tend à se généraliser en matière de diagnostic médical. Elles sont bonnes dans l'ensemble. Mais parmi les différentes variables considérées, il s'avère que celles hydro-climatiques (température et débit) n'apportent pas de gain particulier de performance, statistiquement significatif.

La température étant néanmoins retenue dans les arbres de plusieurs espèces, une simulation de modification des niveaux moyens est réalisée, qui n'indique que de faibles changements d'occurrence des espèces, alors prédits par les modèles, en modifiant ce seul paramètre.

Action 7 : Enjeux socio-économiques. Réponses des acteurs

Pierre-Marie COMBE, UMR 5601.Laboratoire d'Economie et de Gestion. U. de Bourgogne

Les résultats de simulation produits dans l'Action 3 en matière de distribution spatiale des espèces de poissons sur les rivières françaises en réponse à des hypothèses données de réchauffement laissent entières de nombreuses questions de nature « non technique », se situant à trois niveaux successifs :

- comment s'adapteront les politiques de gestion piscicole : curativement ? préventivement ?
- comment ensuite s'adapteront les politiques de gestion halieutique - question dérivée de la précédente, mais en partie seulement [une situation, au moins locale, peut comporter un enjeu piscicole mais pas d'enjeu halieutique ; et inversement],
- enfin (question dérivée à son tour de l'une ou/et l'autre des deux précédentes) quelles seraient les conséquences socio-économiques associées à ces changements, ou encore à leur prise en compte adaptative (dans un sens plus ou moins curatif ou préventif) ?

Ces questions, ainsi que toutes les sous-questions qui peuvent en découler, intéressent les sciences sociales, principalement à travers les jeux d'acteurs, et la confrontation de bénéfices et de coûts (pour la collectivité dans son ensemble et ses différentes composantes catégorielles) associés à des programmes d'action alternatifs.

D'autre part, il importe de prévenir une tendance de non-scientifiques à tirer, de tels résultats, des « prédictions » simples concernant les pertes économiques et traumatismes sociaux en découlant, masquant des hypothèses implicites sur les comportements adaptatifs des individus, des acteurs économiques et des gestionnaires de la pêche, des milieux aquatiques et de diverses politiques publiques.

Une première partie de ce volet socio-économique a consisté à élaborer un cadre conceptuel destiné à identifier méthodiquement, dans chaque cas, les catégories d'enjeux (piscicoles, halieutiques et autres économiques dérivés), avec leurs interrelations ; il associe une vision systémique et une méthode d'identification conjointe (économiste-écologue) de problème, inspirée des recommandations EPA en matière d'évaluation économique des bénéfices écologiques, dont les enjeux piscicoles-halieutiques du réchauffement climatique peuvent être considérés comme un cas parmi d'autres.

La seconde partie du projet, visant à localiser des zones d'enjeu sur la France entière et à les hiérarchiser en combinant enjeu piscicole et enjeu halieutique, n'a pû être menée que partiellement. Par contre, l'exploitation par département des données de contextes piscicoles a permis d'élaborer une image de référence de la France piscicole « hors hypothèse climatique », dans la perspective d'une intégration, dans le calcul des contextes, des impacts potentiels d'un réchauffement. Si cette démarche se réalisait dans l'avenir, elle ouvrirait la voie à une prise en compte des enjeux piscicoles et halieutiques en termes de choix économiques à travers les PDPG.

Dans le même sens, on suggère que des recherches économiques appliquées soient menées sur une base plus pérenne et en connexion avec différentes étapes de la mise en oeuvre de la DCE.

Méthodologies

Les méthodologies utilisées dans le cadre de cette étude relèvent :

- de l'usage des Systèmes d'Information Géographique en relation avec des techniques relevant de la géostatistique (Actions 1 et 6)
- de l'analyse exploratoire des données par des outils d'analyse multivariée (analyse de co-inertie multiple, Action 2), des procédures de lissage (Action 1,2 et 3), de la technique du hierarchical partitioning (Action 3)
- de la modélisation : modèles non linéaires mixtes (Action 5), modélisation logistique (Actions 3 et 4), arbre de décision (Action 4)
- du couplage de modèles décrivant des processus hydrologiques, hydrauliques et biologiques
- et, plus secondairement, de techniques d'enquêtes et d'expérimentation (Actions 4 et 7).

Conclusions

En terme d'évaluation des impacts du changement climatique sur les biocénoses riveraines et aquatiques des cours d'eau français, nous nous sommes focalisés sur trois types de matériel biologique (macroinvertébrés, poissons, végétation) et sur les conséquences du réchauffement et des modifications de l'hydrologie. Pour les poissons, nos travaux aboutissent à la modélisation des réponses des espèces à des anomalies thermiques (selon 5 scénarios de changement global fournis par Le Laboratoire de Météorologie Dynamique et Météo-France) et hydrologiques (en collaboration avec le programme GICC-Rhône). Pour les végétaux, nous avons également pu rendre compte de la sensibilité des taxons au réchauffement. Enfin, pour les macro-invertébrés, il s'agissait d'une première étape qui visait à modéliser les réponses écologiques.

De façon générale, il faut rappeler que notre objectif est de décrire les modifications potentielles susceptibles d'être introduites par différents scénarios climatiques sur la disponibilité en habitat favorable de différentes espèces ou communautés, et ce, indépendamment d'autres altérations des biocénoses liées aux pressions anthropiques s'exerçant à l'échelle locale (aménagements, pollution des eaux). De même, l'essentiel de nos approches, qui relèvent de la modélisation statistique, ne considèrent pas l'influence des processus biotiques (modes de dispersion, interactions trophiques).

Pour les poissons, les modèles élaborés prennent en compte à la fois la variabilité thermique saisonnière et d'autres co-variables environnementales caractérisant les tronçons de cours d'eau. Les réponses aux anomalies thermiques diffèrent beaucoup selon les espèces. Elles sont en accord avec les données antérieures issues de la littérature en particulier pour les Salmonidae, soit un impact potentiel important du réchauffement. Les incertitudes restent bien sûr fortes, en liaison avec les modèles biologiques eux-mêmes et avec la forte variabilité des anomalies thermiques selon les scénarios globaux établis. Il reste cependant que les effets mis en évidence sont suffisamment importants pour pouvoir affirmer que les peuplements piscicoles et, par là-même, les activités halieutiques seront fortement affectés, en particulier dans les zones amont des cours d'eau ou dans les bassins hydrographiques ne présentant pas ou peu de refuges altitudinaux. En comparaison, les conséquences d'une réduction des débits sur le bassin rhodanien semblent à priori plus limitée, sans être toutefois négligeable.

Pour les végétaux (Action 4), les simulations réalisées sur le Bassin Adour-Garonne tendraient à démontrer que l'expansion massive de ces espèces ne concernerait qu'un nombre très limité d'entre elles. Ceci est cohérent avec le patron d'invasion observé, puisque sur plus de 100000 espèces végétales potentiellement introduites (volontairement ou non) dans notre région, 10000 se retrouvent naturalisées, seulement une centaine sont susceptibles d'être abondantes et, enfin, tout au plus une trentaine posent actuellement des problèmes environnementaux. Cependant, il semblerait que le nombre d'espèces moyennement représentées tendrait à augmenter, suggérant des répercussions possibles sur la biodiversité. Hormis le piémont, qui représente une transition majeure pour la diversité des communautés riveraines, nous n'avons pas pu établir de zone à risque particulière le long des huit cours d'eau étudiés. Aucun gradient régional prononcé n'apparaît dans les risques d'invasion en réponse à une élévation de la température moyenne. Dans le cas particulier des Jussies, il ne nous semble pas encore possible, dans le contexte actuel de proposer un modèle de dispersion de ces taxa en fonction des évolutions climatiques récentes ou sur la base d'hypothèses ou de modèles climatiques prévisionnels.

Pour les macroinvertébrés, il a été possible pour la première fois en France de modéliser leurs réponses à la variabilité hydraulique. Les sensibilités des différents taxons sont très contrastées et il est probable que seuls des changements hydrauliques de grande ampleur sont susceptibles de modifier de manière profonde ces communautés benthiques. La température apparaît comme un facteur déterminant pour un grand nombre de famille. On peut donc envisager de tester la réponse aux anomalies thermiques dans le futur. Par contre, l'approche utilisant les traits biologiques reste décevante. Ceci peut être attribué au niveau taxonomique de la famille, seul disponible dans les données du Réseau National de Bassin (RNB), et aux variations « contradictoires » des probabilités d'occurrences liées à un changement thermique.

Au total, nous pouvons considérer nos modèles de réponses comme relativement fiable et nos résultats sont globalement cohérents avec la méta-analyse réalisée par Root et al. (2000) et Parmesan et Yohe (2003) à l'échelle planétaire sur de nombreuses populations animales et végétales. D'après ces travaux, deux tiers des espèces fourniraient une réponse significative au facteur thermique du CC en terme d'abondance et de distribution. Selon Parmesan et Yohe, 100% des espèces analysées répondraient de façon significatives en termes de changement de distribution au niveau des extrêmes (Nord et Sud pour la plupart) de leur répartition. En l'état actuel, il semble nécessaire, pour obtenir des modèles prédictifs fiables, de sélectionner les processus / traits biologiques-clefs au niveau des populations, mais également d'établir des scénarii quantifiés des co-variables importantes du régime thermique. Il apparaît également clairement qu'il faut tenir compte des saisons thermiques et qu'il est nécessaire de travailler à l'échelle des espèces, les communautés aquatiques se composant de taxons présentant des optimums thermiques différents.

Ces travaux mettent l'accent sur l'intérêt de pouvoir coupler SIG et modèles statistiques. Ceci autorise l'interfaçage entre les simulations issues des modèles climatiques et les données des modèles biologiques, conçus à des échelles spatiales beaucoup plus faibles. L'étape suivante consisterait à prendre réellement en compte la structure spatiale des données biologiques et les processus d'autocorrélation. De même, il faut noter l'intérêt des couplages maintenant possible entre anomalies climatiques, modèles hydrologiques et modèles de réponses biologiques à la variabilité hydraulique.

Bien que la température de l'eau soit enregistrée depuis plus d'un siècle dans quelques grands cours d'eau, en Autriche notamment, l'existence de séries longues et de haute qualité pour l'analyse de tendance sont rares. Les données thermiques et biologiques collectées sur le Rhône et la Seine présentent donc un intérêt majeur, à la fois par leur durée et le nombre de stations implantées sur un seul cours d'eau. Elles doivent impérativement être associées aux chroniques hydrologiques. L'interprétation des fluctuations temporelles des effectifs de poissons et d'invertébrés sur ces grands fleuves met en évidence l'importance de l'hydrologie et de la température comme facteurs de contrôles de ces communautés. Cependant, il reste souvent difficile de faire la part de chacun de ces facteurs. En regard de l'ampleur de la variabilité hydrologique, la durée de ces chroniques reste souvent trop faible pour pouvoir bien distinguer les conséquences du réchauffement sur le long terme. Il faut donc impérativement maintenir ces suivis dans les décennies à venir. Un effort d'homogénéisation des méthodes de suivis entre les producteurs de données doit impérativement être encouragé (en particulier pour les invertébrés) afin de permettre une validation des tendances observées entre sites géographiquement distants.

Une remarque similaire peut être émise pour les réseaux de suivis nationaux utilisés dans ce projet : Réseau Hydrobiologique Piscicole du Conseil Supérieur de la Pêche, Réseau National de Bassin. Dans un contexte de pressions anthropiques fortes et de modifications du climat global,

ces suivis apparaissent comme des outils incontournables pour rendre compte de l'évolution de la biodiversité dans nos cours d'eau.

Nous avons également cherché à mieux définir les variations des aires de distribution des espèces à l'échelle d'un bassin versant (la Seine) par la mise en place d'une base de données géoréférencée décrivant le réseau hydrographique en continu. Il apparaît cependant nécessaire, pour caler correctement des modèles sur ce type de données, de disposer d'un outil couvrant un espace plus vaste et plus contrasté en terme de conditions environnementales, soit l'échelle de la France entière.

Comme exposé au début de cette conclusion, nous n'avons pas pris en compte les modulations possibles de ces impacts climatiques par la prise en compte des interactions biotiques. Nous avons cependant fournis deux exemples de tels effets : l'un relatif à des processus de densité-dépendance, l'autre au rôle de la dispersion. Cette prise en compte des interactions biotiques est bien entendu nécessaire si l'on cherche réellement à décrire les niches écologiques des espèces et à prédire des modifications d'abondance et/ou d'occurrence. Il est alors nécessaire de choisir des espèces que l'on pourra qualifier de sentinelles (modèles biologiques) afin de décrire plus finement les interactions entre ces dernières et leurs environnements physique et biologique.

Les changements introduits par la DCE dans la méthodologie de la planification des milieux aquatiques sont nombreux et certains d'entre eux, intéressant directement les analyses économiques, paraissent susceptibles d'interférer, au moins à terme, sur la manière d'intégrer les enjeux climatiques sur les cours d'eau et le patrimoine piscicole et halieutique. Etant donné que l'objectif principal de l'analyse des impacts et des « utilisations de l'eau » préconisée dans la DCE est d'évaluer leur importance pour le développement socio-économique du bassin, il y a lieu de se demander si l'identification de zones d'enjeu à fort potentiel piscicole, halieutique et économique dérivé, d'origine climatique, ne devrait pas être prise en compte dans cette procédure. Enfin, il conviendrait de rechercher si le « problème » potentiel d'une zone d'enjeu piscicole et halieutique fort lié à un réchauffement climatique gagnerait à être intégré dans le traitement de la question du coût disproportionné, notamment à travers une évaluation économique des bénéfices notamment non marchands, comme une application parmi d'autres des méthodes standards de l'économie de l'environnement

Finalement, il faut également rappeler que nous n'avons pas ici considéré les interactions possibles entre conséquences du réchauffement et dégradations des habitats locaux (aménagements, pollution). Dans le cas des invertébrés, les familles les plus sensibles à la température sont aussi en général les plus sensibles aux altérations de l'habitat. Dans le cas des poissons, notre expérience acquise par ailleurs (mise en place d'un indice poisson pour l'évaluation de la qualité des cours d'eau) nous laisse à penser que les implications biologiques des anomalies thermiques ici décrites ne sont pas négligeables en regard des altérations anthropiques. Par rapport à la mise en place de la Directive Cadre sur l'Eau, qui préconise une évaluation de l'état des milieux par comparaison à une situation dite de référence, il importe donc de bien garder à l'esprit que cet état de référence n'est pas immuable. La variabilité climatique annoncée va induire des modifications profondes des communautés dans des sites reconnus comme « non altérés » et seul une approche recourant à la modélisation permettra d'en tenir compte.

Valorisations de l'étude

Publications et Rapports

- Bady P., Dolédec S., Dumont B. & Fruget J.F. (sous presse). Multiple co-inertia analysis: a tool for assessing synchrony in the temporal variability of aquatic communities. *Comptes-rendus de l'Académie des sciences de Paris*.
- Bady P. (2001). Stabilité spatiale des structures temporelles des peuplements de macroinvertébrés benthiques sur le Bas-Rhône : impacts potentiels des facteurs climatiques. *DEA Rapport technique. Université Lyon 1, Villeurbanne*.
- Hérissé C. Influence des environnements locaux et régionaux sur l'ichtyofaune : structure en réseau et relation de voisinage. Approche exploratoire. Application au bassin de la Haute-Saône. *DEA Rapport technique. Université Lyon 1, Villeurbanne*.
- Combe P.M. (à soumettre) « De l'évaluation économique des bénéfices écologiques, à l'identification des problèmes : le rôle d'un modèle conceptuel. Exemple des enjeux piscicoles et halieutiques du réchauffement climatique sur les rivières françaises ». *Revue d'Economie régionale et urbaine*.
- Grenouillet, G., Pont, D. & C. Hérissé (sous presse). Within-drainage fish community structure : the relative influence of habitat versus stream spatial position on local species richness. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*.
- Grenouillet G., Hugueny B., Carrel G., Olivier J.M. & D. Pont (2001). Large-scale synchrony and inter-annual variability in roach recruitment in the Rhône River: the relative role of macro-climatic factors and density-dependent processes. *Freshwater Biology* 46: 11-26.
- Planty-Tabacchi A.M., Tabacchi E et Salinas Bonillo M.J. 2001. Invasions of river corridors by exotic plant species: patterns and causes. In G. Brundu et al. (eds) *Plant Invasions, Structure and functions*. Backhuys Publ., Amsterdam, The Netherlands.
- Pont D., Hugueny B. & Oberdorff T. (soumis). Modelling habitat requirement of European fishes: do species have a similar response to the hierarchical organization of their environment? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*.
- Tabacchi, E. et Planty-Tabacchi A.M. (sous presse). Recent changes in riparian vegetation: possible consequences on dead wood processing along rivers. *River Research and Applications*.
- Tabacchi E., Planty-Tabacchi A.M., Roques L., et Nadal E. (sous presse). Seed inputs in riparian zones : implications for invasion. *River Research and Applications*.
- Tabacchi, E. et Planty-Tabacchi A.M. (2003). Recent changes in riparian vegetation: possible consequences on dead wood processing along rivers. *River Research and Applications* 19 : 251- 263.
- Tabacchi E. et Planty-Tabacchi A.M. 2001. Functional significance of species composition in riparian plant communities. *J. Am. Wat. Res. Assoc*, 37(6): 1629-1637.
- Tales E., Keith P. et Oberdorff T. (sous presse). Density-range size relationships in French riverine fishes. *Oecologia*.

Communications orales

- Grenouillet G., Hugueny B., Olivier J.M. & Pont D. (2001). Fish habitat preferences in a large European river: inter-annual variability and density dependence. Symposium of European Freshwater Sciences - 2, Université Paul Sabatier, Toulouse. 8-12 July 2001.
- Pont D. (2002). Conséquences potentielles du changement climatique sur les biocénoses aquatiques et riveraines françaises. *Séminaire Scientifique GICC, Météo-France*, Toulouse, 25 Et 26 Avril 2002
- Pont D., Oberdorff T., Hugueny B. & Porcher J.P. (2000). Modelling ecological requirement of european fishes: the importance of thermal conditions and large-scale effects. Freshwater Biological Association Annual Scientific Meeting. Birmingham, United Kingdom. 13-15 September.
- Rogers, C.F. (2003) - Interpolation des températures moyennes mensuelles en France métropolitaine avec l'extention Geostatistical Analyst d'ArcGIS 8. Communication présenté à SIG 2003, Conférence d'utilisateurs ESRI. Issy-les-moulineaux, le 1&2 octobre.
- Tabacchi E. 2002. Hydraulic events and plant community connectivity within riparian systems. First International Workshop on Biological Responses to Hydraulic Constraints. Lyon (communication orale).
- Tabacchi E. et Piégay H. 2003. Le rôle de la ripisylve dans la dynamique des écoulements de l'eau. Séminaire sur la Forêt Méditerranéenne. Saint-Laurent-du-Var. (communication orale, sur invitation).
- Tabacchi E., Planty-Tabacchi A.M., Roques L. et Nadal E. 2003 Seed Inputs in Riparian Zones: Implications for Plant Invasion. Ninth International Conference on River Research and Applications. Albury, Australie (communication orale).
- Tabacchi E. et Planty-Tabacchi A.M. 2002. Changes in Alien and Native Weedy Vegetation along Rivers: What's New? 13th International Conference on Aquatic Weeds. Moliets-et-Maà. (communication orale).
- Tabacchi E. et Planty-Tabacchi A.M. 2003. Seed banks and riparian community invasions. Invasive Plants in Natural and Managed Systems: Linking Science and Management- 7th international conference on Ecology and Management of Alien Plant Invasions. Fort Lauderdale, Florida (communication orale).
- Tabacchi E. , Planty-Tabacchi A.M. et Maria Jacoba Salinas, 2001. Space-Time Interactions in Patterns of Invasions of Riparian Plant Communities: the example of the Middle Garonne River. 26th International Conference Ecology and Management of Alien Plant Invasions, EMAPi Loughborough, G.B.(affiche)

Disponibilités des données

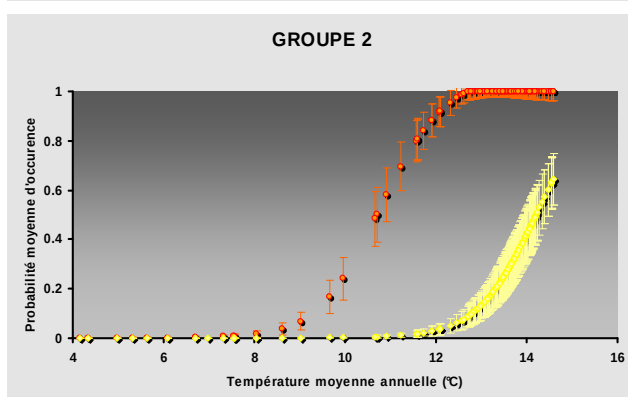
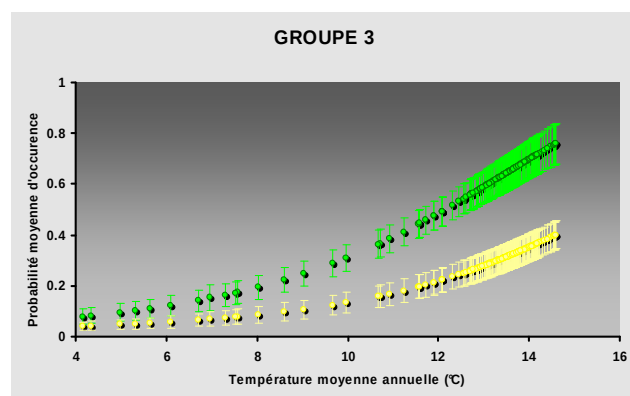
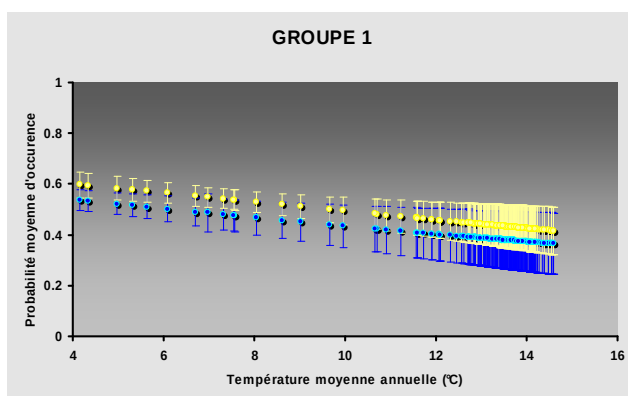
- Spatialisation des températures moyennes mensuelles en France de 1980 à 1999. (Disponibilité à venir sur un site internet dans les deux ans à venir).
- Mise en forme sous SIG (arc-view shapefile) des anomalies climatiques issues des scénarios mis à disposition par le Laboratoire de Météorologie Dynamique et Météo-France, sous réserve d'autorisation de ces organismes.
- Les données relatives aux invertébrés (Réseau National de Bassin) et aux Poissons (Réseau Hydrobiologique Piscicole) sont disponibles auprès du Ministère de l'Environnement.
- Ventes de timbres piscicoles (ordinaires, supplément) par département et par an de 1950 à 2002 (sur base des statistiques annuelles publiées par le Conseil supérieur de la Pêche) [Excel].
- Contextes piscicoles par département (par traitement des données de base du CSP, 2002, op.cit.). [Excel]

Résultats à valoriser sur le site internet GICC

Réponses des espèces végétales exotiques

Auteurs : Tabacchi E. , Planty-Tabacchi A.M. ; UMR CNRS C5171 Laboratoire DYNAmique de la BIODiversité, U. P. Sabatier (Toulouse)

Réponse régionale d'espèces végétales exotiques riveraines et aquatiques



Evolution des probabilités d'occurrence moyenne ($\pm$ IC 95%) de plantes exotiques riveraines et aquatiques en fonction de la température moyenne annuelle observée actuellement.

En jaune : probabilités observées. Autres couleurs : probabilités résultant de simulations (+3,5°C) pour trois groupes caractéristiques d'espèces :

groupe 1 : tendance mesocryophile (bleu)

groupe 2 : tendance thermophile (orange)

groupe 3 : tendance mesothermophile (vert)

#####

Approche socio-économique. Schéma conceptuel

Auteur : Combe P.M.. UMR CNRS 5601 Laboratoire d'Economie et de Gestion. U. de Bourgogne

Schéma d'Identification des enjeux piscicoles, halieutiques et économiques associés à une hypothèse de réchauffement des milieux aquatiques. Voir Action 7, Annexe 1. Contacter l'auteur pour les commentaires

Réponses des espèces piscicoles

Auteurs. Pont D. & Rogers C. UMR CNRS 5023. Ecologie des Hydrosystèmes Fluviaux. Université Lyon1. Villeurbanne.

Modélisation des probabilités d'occurrence des espèces piscicoles. Exemples du Chevaine (*Leuciscus cephalus*) et de la Truite (*Salmo trutta fario*).

Mod.INIT : Probabilités d'occurrence de l'espèce pour les conditions thermiques observées durant la période de référence (1980-1989). (Stations du Réseau Hydriobiologique Piscicole du CSP, sous l'hypothèse d'absence de perturbations des cours d'eau)

Mod.LMD et Mod.METEO. Anomalies prédites sur les occurrences selon deux scénarios climatiques ((modèle LMD6 A (Sechiba) et simulation ARPEGE+ISBA sous HadCM2, à résolution variable du CNRM). Sur les 792 stations considérées, les anomalies moyennes annuelles sont de 1.70°C et 3.66°C pour Mod.LMD et Mod.Météo. La température moyenne pour la période de référence est de 11.24°C.

Simulation des impacts thermiques sur la distribution de l'habitat favorable des espèces...

Chevaine

Mod.INIT

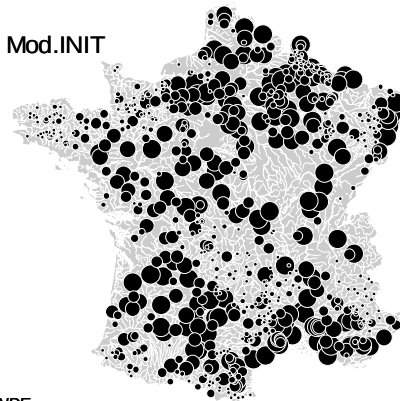
LEGENDE

Scores [0 : 1]

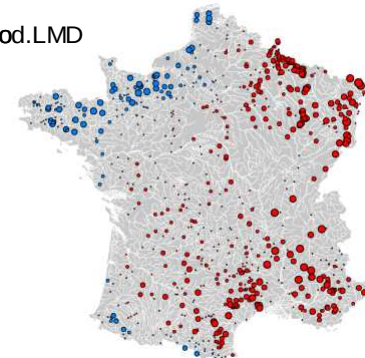
Probabilités d'Occurrence actuelles

Anomalies Positives

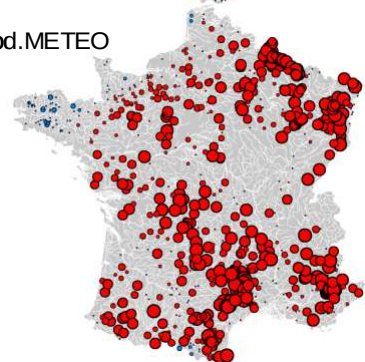
Anomalies Négatives



Mod.LMD



Mod.METEO



Simulation des impacts thermiques sur la distribution de l'habitat favorable des espèces...

Truite Fario

Mod.INIT

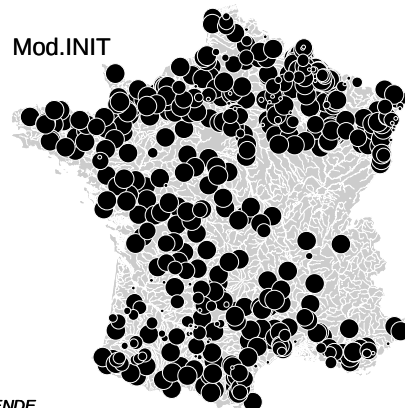
LEGENDE

Scores [0 : 1]

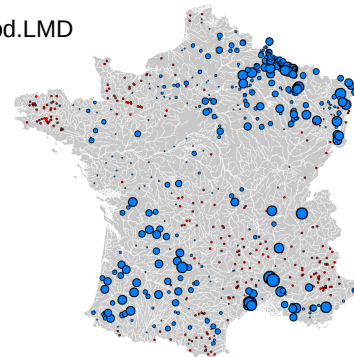
Probabilités d'Occurrence actuelles

Anomalies Positives

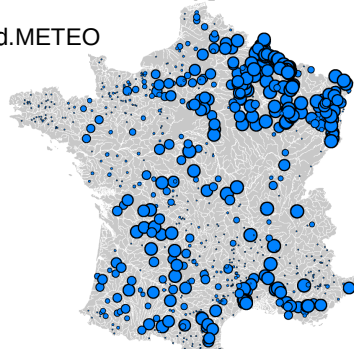
Anomalies Négatives

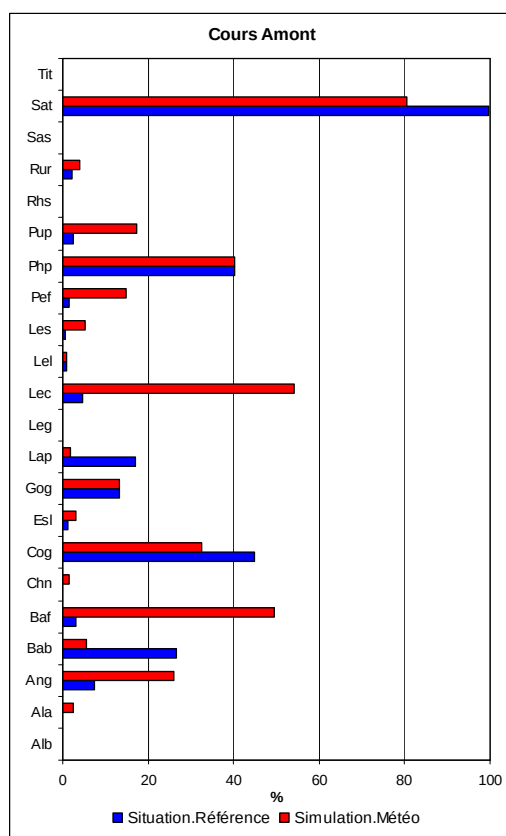


Mod.LMD



Mod.METEO





Modélisation des occurrences moyennes des espèces piscicoles dans les parties apicales des réseaux hydrographiques français : situation initiale (1980-89) et simulation selon le scénario ModMétéo. Les résultats mettent en évidence l'accroissement d'occurrence des espèces de cyprinidés rhéophiles (Lec : chevaine, Baf : Barbeau commun) et la raréfaction des espèces cryophiles (Trf : truite fario ; Cog : Chabot ; Bab : Loche franche).

Résultats
