



CHANGEMENT GLOBAL ET STRATÉGIES  
DÉMOGRAPHIQUES DES POPULATIONS PISCICOLES  
GLOBAL CHANGE AND DEMOGRAPHIC STRATEGIES OF  
FISH POPULATIONS

Programme APR GICC 2005  
Rapport de fin de contrat

**SYNTHÈSE**

Cemagref Antony UR HBAN.  
Hydrosystèmes et Bioprocédés

**Didier PONT**

Parc de Tourvoie, BP44,  
92163 Antony Cedex

Date : 23/01/2010

N° de contrat 0000767  
Date du contrat : 27/07/2007



Equipes de Recherche	Fonction	e-mail	% temps
<b>Cemagref Bordeaux EPBX</b> Rochard Eric Lassale Géraldine	DR1 Doctorante	<a href="mailto:eric.rochard@cemagref.fr">eric.rochard@cemagref.fr</a>	10% 23%
<b>Cemagref Antony HBAN</b> Pont Didier Hette Nicolas Mazeas L. Epissard J.	DR2 Doctorant CR1 T.	<a href="mailto:didier.pont@cemagref.fr">didier.pont@cemagref.fr</a>	20% 20% 5% 10%
<b>Cemagref Aix HYAX</b> Dumont Bernard Raymond Virginie	DR2 T	<a href="mailto:bernard.dumont@cemagref.fr">bernard.dumont@cemagref.fr</a>	50% 50%
<b>CNRS UMR 5558 Lyon</b> Charles Sandrine M.L. Delignette Muller Kielbassa Jannice	MCU MCU Doctorante	<a href="mailto:scharles@biomserv.univ-lyon1.fr">scharles@biomserv.univ-lyon1.fr</a>	30% 20% 100%
<b>Ecole d'Ingénieur Lullier (Genève)</b> Cattanéo Franck	MCU		5%
<b>UMR BOREA, MNHN, CNRS 7208, IRD 207, UMPC</b> Hugueny Bernard	CR1	<a href="mailto:hugueny@mnhn.fr">hugueny@mnhn.fr</a>	10%
<b>INRA St Pée UMR ECOPBIOP</b> Gaudin Philippe Beall Eddy Prévost Etienne Dumas Jacques Parade Michel Huchet Emmanuel Rives Jacques Glise Stépahne Lange Frédéric Piou Cyril	DR2 CR1 CR1 CR1 IE Technicien Technicien Technicien Technicien Post-Doc	<a href="mailto:gaudin@st-pee.inra.fr">gaudin@st-pee.inra.fr</a> <a href="mailto:beall@st-pee.inra.fr">beall@st-pee.inra.fr</a> <a href="mailto:eprevost@st-pee.inra.fr">eprevost@st-pee.inra.fr</a>	10% 40% 70% 50% 17% 17% 17% 50% 30% 100%
<b>INRA Rennes UMR ESE</b> Baglinière Jean Luc Roussel Jean Marc Rivot Etienne Huteau Dominique Bal Guillaume Perrier Charles	DR2 CR1 IR TR. Doctorant Doctorant	<a href="mailto:Jean-Marc.Roussel@rennes.inra.fr">Jean-Marc.Roussel@rennes.inra.fr</a> <a href="mailto:Jean-Luc.Bagliniere@rennes.inra.fr">Jean-Luc.Bagliniere@rennes.inra.fr</a> Etienne.Rivot@Agrocampus-ouest.fr	20% 15% 15% 15% 100 % 20 %
<b>UExp Eco-Ecotox INRA Rennes</b> Azam Didier Marchand Frédéric Jeannot Nicolas Tremblay Julien	I.E. AI Technicien Technicien	<a href="mailto:Didier.Azam@rennes.inra.fr">Didier.Azam@rennes.inra.fr</a> Frédéric. Marchand@rennes.inra.fr	10% 10% 20% 20%

# **SYNTHESE DES RESULTATS DU PROJET**

## **CONTEXTE GÉNÉRAL**

Les conséquences des changements climatiques planétaires sont susceptibles d'affecter de façon significative la plupart des écosystèmes tant du point de vue de leur fonctionnement que de la biodiversité qu'ils abritent. Dans ce cadre, l'un des challenges majeurs auxquels sont actuellement confrontés les écologues est leur capacité à prédire les impacts futurs sur les populations et les communautés, et ceci dans le cadre de systèmes par ailleurs déjà fortement anthropisés (dégradation et fragmentation des habitats, introductions d'espèces). De par leur poïkilothermie, les populations piscicoles seront fortement affectées. Si dans un premier temps, l'accent a été mis sur l'évaluation des modifications potentielles des aires de distribution des espèces par des approches relevant de la modélisation statistique, il est en maintenant nécessaire de s'intéresser aux mécanismes sous-jacents, et en particulier aux implications des modifications de la température de l'eau sur le métabolisme et les comportements individuels, ainsi que sur les paramètres démographiques.

## **OBJECTIFS GÉNÉRAUX DU PROJET**

Le projet a eu comme objectif d'étudier les capacités de réponses de deux modèles biologiques au CC, choisis pour leur caractère emblématique et les projets de restauration déjà engagés (saumon), et leur capacité à jouer un rôle d'espèce sentinelle d'état de la biodiversité dans les zones amont des bassins hydrographiques (chabot). En complément, une approche visant à modéliser l'impact du climat sur la dynamique de populations de poissons d'eau douce d'Afrique de l'ouest a été mise en oeuvre.

## **ÉLÉMENTS DE MÉTHODOLOGIE**

Le projet a eu recours à des approches de types variées en fonction des objectifs poursuivis : approches expérimentales au laboratoire (comportement) et in-situ (analyse des chaînes trophiques par isotopes stables), modélisation statistique classique (modification des aires de distribution du saumon) et bayésienne (relation entre température de l'air et de l'eau), modèles matriciel spatialisé de dynamique des populations de chabot, modèle individu-centré de dynamique des populations de saumon pour l'aide à la décision.

## **RÉSULTATS OBTENUS**

Deux modèles biologiques (saumon atlantique *Salmo salar* et chabot, *Cottus gobio*) ont été choisis pour étudier les capacités de réponses au changement climatique de la communauté pisciaire. Leur choix a été dicté par plusieurs critères : *i*) un caractère emblématique et une histoire de vie très différente pour deux espèces sténothermes : le saumon est un grand migrateur amphihalal et le chabot une espèce très sédentaire et cryophile *ii*) leur capacité à jouer un rôle d'espèce sentinelle d'état de la qualité du milieu et de la biodiversité dans les bassins hydrographiques (espèces Natura 2000), *iii*) leur statut d'espèce vulnérable (saumon). Ce travail est complété par une approche visant à modéliser l'impact du climat sur la dynamique de populations de poissons d'eau douce d'Afrique de l'ouest.

## **Le saumon atlantique (*Salmo salar*)**

L'étude a pour objectif d'aborder sous l'angle analytique et prédictif l'influence du changement climatique global et local (conditions trophiques) sur les caractéristiques biologiques et écologiques, et la dynamique des populations. Elle vise à identifier les déterminants biologiques et environnementaux révélateurs de modifications de stratégies de vie et de reproduction, en vue d'évaluer en milieu naturel les capacités d'adaptation à plus ou moins long terme des populations de saumons (modifications des traits populationnels et/ou d'histoire de vie). L'ensemble de ces éléments sera ensuite intégré dans différents scénarios (changement climatique et gestion) afin de développer des outils d'aide à la décision pour la gestion des populations de saumon. Cette étude comporte deux axes : l'analyse macroécologique (aire de répartition) et l'analyse régionale et locale sur trois bassins versants. Les échelles temporelles vont du court / moyen terme (analyse de données et expérimentations) au long terme (analyse, projection selon des scénarios).

### ***Analyse macroécologique***

L'approche de modélisation statistique à large échelle que nous avons réalisée a permis à partir d'une base de données d'observations historiques de construire des modèles permettant d'expliquer la distribution historique (ca 1900) du saumon atlantique. Les deux types de modèles construits (présence absence et classe d'abondance) font appel à des variables explicatives similaires (dont une expression de la température).

Telle que réalisée, cette approche statistique ne démontre aucun lien causal entre la présence ou le niveau d'abondance de l'espèce et les variables décrivant le bassin versant. Mais par ailleurs, les courbes de réponse de l'espèce à la température présentent dans nos modèles une forme et des points caractéristiques tout à fait cohérents avec nos connaissances sur l'action de la température sur l'espèce. Il nous semble donc possible d'utiliser les modèles que nous avons établis dans d'autres contextes environnementaux et d'en déduire le niveau de favorabilité des bassins pour cette espèce dans ces autres contextes.

Les projections de l'aire de distribution potentielle du saumon atlantique, pour les deux types de modèle, dans le contexte 2100, selon plusieurs scénarios socioéconomiques fournissent des résultats cohérents. Dans tous les cas, les aires de distributions projetées pour cette espèce montrent une diminution très notable du nombre de bassins favorables, avec plus précisément, une diminution concernant les bassins versants du sud de l'aire de distribution ainsi que de l'est de la mer Baltique. Par ailleurs, les bassins des Iles britanniques constituent le cœur de l'aire de distribution potentielle de l'espèce. Selon le niveau de réchauffement climatique associé aux différents scénarios, la contraction de l'aire de distribution potentielle de l'espèce est plus ou moins marquée.

### ***Analyse régionale et locale***

#### *Changements à l'échelle locale et globale des caractéristiques biologiques des populations de saumon Atlantique*

Les petits cours d'eau côtiers du Massif Armoricaïn sont situées à la limite sud de l'aire de répartition du saumon atlantique, dans des zones souvent localement fortement anthropisées et dans lesquelles de petites variations climatiques sont susceptibles de conduire

rapidement à des conditions environnementales défavorables pour cette espèce. Ils constituent donc des milieux naturels intéressants pour analyser la variabilité spatio-temporelle des traits d'histoire de vie du saumon atlantique. Dans ces petits cours d'eau côtiers, la majorité des juvéniles de saumons smoltifient dès l'âge de 1 an (Smolt 1), et les adultes rejoignent leur cours d'eau après 1 ou 2 ans passés en mer. L'âge à la smoltification est connu pour être largement dépendant de la croissance des juvéniles pendant leur première année dans le cours d'eau. Au niveau des populations, l'âge moyen à la smoltification (AMS) apparaît comme un trait d'histoire de vie intégrateur des fluctuations environnementales pendant la période juvénile en rivière. Les variations spatio-temporelles de cet AMS ont été analysées sur 23 cours d'eau répartis dans trois régions (Basse Normandie, Bretagne Nord et Bretagne Sud) du Massif Armoricaire (MA) entre 1972 et 2005.

Dans un premier temps, des écailles de plus de 24500 saumons capturés par la pêche à la ligne entre 1972 et 2005 ont été analysées par scalimétrie pour estimer l'âge à la smoltification et le temps passé en mer par les adultes. Une analyse statistique à aide de régression logistique a montré que l'AMS a significativement diminué au cours de la période d'étude, quelque soit la région considérée, et indépendamment de l'âge de mer. De plus, une analyse des fluctuations temporelles de cours-moyen terme autour des grandes tendances (à l'aide d'outils statistiques d'analyse de séries chronologiques) a montré l'existence de fluctuations de moyen terme, qui se révèlent synchrones entre les cours d'eau des différentes régions. Cette synchronie à une large échelle régionale suggère fortement que les fluctuations observées dans l'AMS sont la réponse à une ou plusieurs variables de forçage environnementale. Les proportions de Smolt 1 ainsi que les températures moyennes de l'air pendant la période d'incubation et de croissance précoce de croissance des juvéniles (janvier-juin) montrent des tendances à la hausse significatives au cours de la période. Enfin, une analyse de séries chronologique (corrélation corrigée par l'autocorrélation dans les séries) a montré que la corrélation entre la température de l'air et l'AMS est significative et positive ( $R=0.74$ ,  $p=0.006$ ) à l'échelle de l'ensemble du MA..

Dans un second temps, l'hypothèse que la réduction dans l'AMS résulte de modifications dans les conditions de croissance des juvéniles a été testée dans le Scorff (Morbihan, Bretagne Sud). A partir de la lecture d'écailles archivées de plus de 720 poissons capturés à l'état adulte sur le Scorff entre 1972 et 2002, un retro-calcul a été réalisé pour estimer la taille des juvéniles au premier hiver. L'analyse de ces données de retro-mesure a montré une augmentation significative (+1.5 cm) de la taille des juvéniles au premier hiver au cours de la période. Pendant la même période, la température moyenne en Bretagne Sud sur les mois Mars-Juin a aussi augmenté de façon significative.

Dans un troisième temps, une étude comparative entre le Scorff (Bretagne, France) et la rivière Teno (Laponie, Finlande) a été conduite pour identifier le rôle de l'anthropisation locale des bassins versants sur l'écologie des rivières à saumons. Depuis les années 70, la charge en azote inorganique dissous était multipliée par 4 sur le Scorff depuis les années 70 alors qu'elle restait basse et constante sur la Teno. L'évolution du ratio des isotopes stables du carbone ( $\delta^{13}\text{C}$ ) et de l'azote ( $\delta^{15}\text{N}$ ) dans les deux écosystèmes a été retracée grâce à l'analyse des collections d'écailles de juvéniles de saumon disponibles. L'espèce, à ce stade de développement, est un consommateur secondaire dans le réseau trophique des cours d'eau. Des valeurs  $\delta^{15}\text{N}$  plus fortes sur le Scorff que sur la Teno confirment les différences d'anthropisation des deux cours d'eau, sans qu'aucune tendance temporelle ne se dessine depuis les années 70. Par contre, une augmentation des valeurs  $\delta^{13}\text{C}$  corrélée aux concentrations en nitrate est observée sur le Scorff, alors qu'aucune tendance n'est visible sur la Teno. Ce phénomène serait expliqué par un effet de l'enrichissement en nutriments sur la fixation de carbone atmosphérique par les producteurs primaires du cours d'eau, et des transferts de ce carbone atmosphérique vers les poissons par le réseau trophique. Ainsi,

comme déjà démontré dans les lacs et océans, l'azote d'origine anthropique pourrait avoir des effets à long terme sur l'écologie des cours d'eau en modifiant le cycle du carbone dans les réseaux trophiques.

En conclusion, les résultats suggèrent que la diminution de l'AMS pourrait refléter un changement dans les conditions de croissance des juvéniles en réponse à un réchauffement climatique. Néanmoins, deux types de biais possibles doivent être considérés 1) l'augmentation de taille rétro-mesurée du smolt peut être exacerbée par le fait que les adultes revenant en eau douce proviennent des juvéniles de plus grande taille lors de leur migration en mer, 2) la température de l'eau sur le Scorff a été estimée à partir de la température de l'air. Enfin, l'influence du changement climatique doit être considérée comme une hypothèse parmi un ensemble de causes possibles et notamment un possible enrichissement en nutriments de la chaîne trophique entraînant une augmentation de productivité des cours d'eau du MA.

### *Impact du réchauffement climatique sur la reproduction dans la Nivelle*

Une étude expérimentale sur l'influence de la température sur le comportement et le succès reproducteur du saumon atlantique a été menée en fluvarium (contrôle possible des principaux facteurs environnementaux) lors des hivers 2007 et 2008 à l'aide de saumons sauvages (castillons) issus de la population de la Nivelle (Pays Basque). De 7 à 15 couples selon l'année ont été repartis en lots expérimentaux (température variable entre 9 et 15°C) et témoin (température constante à 9°C). Les principaux comportements de frai de la femelle (creusements périphériques et précis, sondages) et du mâle (tremblements), ainsi que les sorties des deux sexes de la zone de frayère sont analysés classiquement par des éthogrammes. En outre, un modèle linéaire généralisé mixte (GLMM) a été utilisé pour analyser des séquences de 10 minutes choisies aléatoirement.

La reproduction des femelles a lieu normalement à la température de 9°C mais a été observée jusqu'à 14,7°C. La durée entre les pontes augmente considérablement (2 à 3 fois) à des températures élevées (12-14°C). De même, le GLMM indique que l'augmentation de température diminue significativement les fréquences d'apparition des quatre comportements considérés, cette diminution étant toujours plus forte le jour que la nuit.

Le succès reproducteur a pu être estimé en récupérant les œufs déposés par les femelles au moment de l'embryonnement (environ 250 degrés-jours après la ponte). Les œufs de la première femelle ont subis 4 chocs thermiques successifs en 3 semaines, alors que ceux de la dernière n'en ont subi aucun. Les mortalités au moment de la collecte des œufs, un mois après la ponte, sont directement proportionnelles au nombre de chocs thermiques. Il suffit de deux chocs thermiques pour avoir une mortalité totale à l'éclosion.

L'ensemble de ces résultats indique que des couples de saumon atlantique de la Nivelle sont capables de se reproduire malgré de fortes hausses de température (jusqu'à près de 15 °C). Le comportement de ponte est altéré et une forte hausse de température semble limiter la fréquence des principaux comportements de reproduction et de cour et donc leur efficacité dans les enchaînements de stimulus-réaction menant au frai. Mais il existe une réactivité individuelle variable à la hausse de température. Il semblerait que cette population de saumon située en limite sud de l'aire de répartition de l'espèce soit donc capable de supporter des variations climatiques modérées.

Même si la reproduction semble se dérouler jusqu'à son terme dans les conditions de températures étudiées, la mortalité des œufs est totale au cours de la phase du développement des embryons lors de fortes variations de température. Ainsi, les possibilités de maintien du saumon atlantique par 43°N (Bassin de la Nivelle) sont étroitement liées à la capacité des œufs à surmonter ces variations de température.

*Température de l'eau : reconstitutions et projections, cas de la Nivelle*

La température de l'eau est un facteur clef influençant de nombreux processus physico-chimiques des cours d'eau et à travers ceux-ci contrôle la biologie de nombreuses espèces aquatiques. Dans un contexte de changement climatiques et d'évolution à la hausse de températures atmosphériques, le saumon est-il capable de se maintenir ? Pour répondre à cette question, l'analyse des séries chronologiques de températures de l'eau est nécessaire. Toutefois ces séries sont peu disponibles, relativement courtes et incomplètes. Au contraire les séries chronologiques de températures atmosphériques sont longues, largement disponibles et de meilleure qualité. Qui plus est, elles font l'objet de scénarios de prévision climatique. Pour ces raisons, établir des méthodes statistiques fiables et robustes permettant de prévoir les températures des cours d'eau à partir d'autres variables environnementales telles que les températures atmosphériques et les précipitations est un enjeu méthodologique majeur.

Les modèles actuels de corrélation entre températures de l'eau et températures de l'air à pas de temps fins sont intrinsèquement incorrects pour prévoir les évolutions futures de température. Du fait du signal saisonnier sinusoïdal fort commun aux deux séries, ces corrélations sont fortes et positives et cachent une réalité : les tendances à long terme reflétées par les moyennes annuelles sont plus faiblement corrélées voir à l'extrême peuvent être inverses.

En conséquence, nous avons créé un nouveau modèle dans le cadre d'une approche bayésienne pour analyser les températures de l'eau en fonction des séries chronologiques de température de l'air et en intégrant le débit. Cette approche est basée sur la décomposition des séries chronologiques en deux parties : une tendance à long terme, représentée par l'évolution de moyennes de températures par six mois, et un signal saisonnier sinusoïdal. Ce nouveau modèle présente l'avantage de refléter correctement les gammes potentielles d'évolution de la température des nos cours d'eau qui apparaissent plus importantes que celles initialement prévues. Cette incertitude devra être prise en compte dans nos scénarios de gestion des impacts des changements climatiques sur les peuplements aquatiques.

*Prise en compte du Changement climatique dans l'aide à la décision pour la gestion des populations de saumon*

Un modèle individu-centré démo-génétique a été développé pour évaluer l'évolution démographique de populations de saumon suivant différents scénarios de changements climatiques à moyen terme (30 ans) et suivant différentes pressions d'exploitation. Dans ce modèle, les variations climatiques modifient la croissance et la survie des individus en rivière et en mer. La structure du modèle considère que les choix de trajectoires d'histoires de vie individuelles sont fonction du taux de croissance. Ainsi, le climat influe potentiellement sur les décisions individuelles et donc sur les structures populationnelles. L'exploitation par pêche est intégrée au moment des retours de saumons adultes et l'évolution du climat en rivière est testée sous forme de différents scénarios. Trois scénarios climatiques (SC) sont projetés : 1) une température moyenne constante et une amplitude des débits constante (SC1) ; 2) une température moyenne augmentant de 2°C/100 ans et une amplitude des débits constantes (SC2) et 3) une température moyenne augmentant de 2°C/100 ans et une amplitude des débits augmentant de 25% sur 50 ans (SC3). Huit scénarios d'exploitation ont été testés avec un taux indifférencié d'exploitation des castillons et des individus à plusieurs hivers de mer allant de 0% à 70% des retours. Pour chaque croisement de ces scénarios climatiques et d'exploitation, l'évolution des populations du Scorff a été simulée avec un nombre moyen de remontés d'adultes à l'initialisation de ~350 individus et une surface de production de rivière de 50%.

Les résultats de ces simulations montrent que l'effet d'une augmentation de température pourrait être bénéfique pour la croissance en rivière et ainsi les risques d'extinction à taux d'exploitation importants sont plus bas pour les simulations utilisant le SC2 que celles utilisant le SC1. En revanche, l'effet additionné de l'augmentation de variabilité des débits est négatif sur le maintien des populations. Les simulations utilisant le SC3 ont des probabilités d'extinction plus hautes que les deux autres scénarios. Les simulations montrent aussi que malgré l'héritabilité des normes de réactions de maturation (contrôlant l'âge de retour de mer), les proportions de castillons et plusieurs hivers de mer ne sont pas modifiées par le changement climatique simulé en rivière. L'augmentation de la température et l'augmentation des variabilités des débits ne semblent pas être des pressions de sélection pour les stratégies d'histoires de vie marine dans notre modèle. De la même manière, la proportion de mâles précoces n'est pas modifiée par le réchauffement mais pourrait diminuer dans le temps à cause de l'augmentation des variations de débit.

Ces premiers résultats, montrent que les modifications des débits peuvent jouer un rôle important dans le maintien et la structure des populations. Ces résultats doivent être confirmés après analyse de sensibilité des différentes parties du modèle. Par ailleurs, il est nécessaire de poursuivre en évaluant les effets synergiques de pêches sélectives, de modification des conditions de croissance marine et des évolutions potentielles des cours d'eau.

## **Le chabot (*Cottus gobio*)**

Les travaux ont été menés à partir de 2002 dans le cadre notamment d'un premier projet financé par l'Institut Français de la biodiversité et le programme GICC du MEEDDAT (2004-2006). Les travaux se poursuivent dans le cadre de ce projet. Ils consistent en une poursuite du suivi d'une population fragmentée dans le bassin de la Drôme (7 années) et le développement du modèle de dynamique des populations spatialisé. En complément, nous cherchons également à mieux comprendre les conséquences d'une modification thermique sur les interactions entre macro-invertébrés et poisson: structure des réseaux trophiques, modification de la niche trophique du chabot.

### ***Modélisation température-dépendante de la dynamique de population du Chabot (*Cottus gobio*)***

#### *Un premier modèle multirégional de population*

Dès 2003, les modèles matriciels de populations de type Leslie spatialisés (modèles multirégionaux) se sont avérés de bons candidats (Chaumot et al., 2006). Outre la possibilité qu'ils offrent de prendre en compte différents types d'hétérogénéité (hétérogénéité spatiale, temporelle, environnementale) et leur très large utilisation en écologie de la conservation, ils permettent à la fois de *prédire le devenir des populations*, et de guider les décideurs dans la *gestion des populations naturelles*. Plus particulièrement, les modèles matriciels de populations sont très pratiques pour les analyses de viabilité de populations (Caswell, 2001<sup>1</sup>).

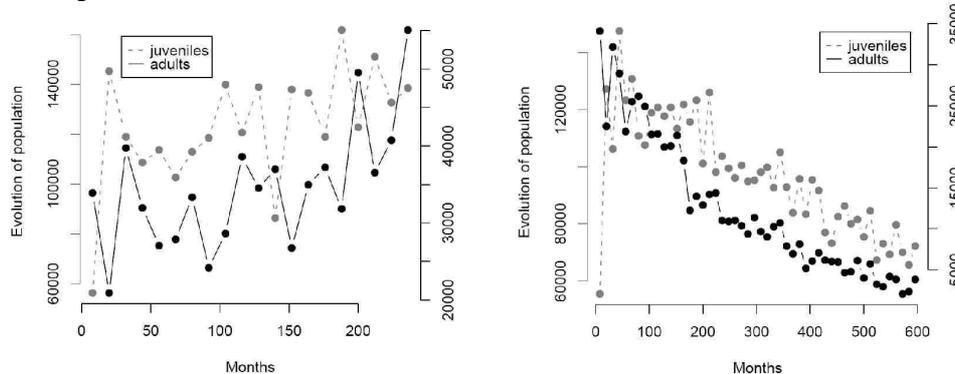
Caswell, H., 2001. Matrix Population Models - Construction, analysis, and interpretation. Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts, 722 p.

---

<sup>1</sup> Caswell, H., 2001. Matrix Population Models - Construction, analysis, and interpretation. Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts, 722 p.

### *Une approche individu-centré*

En 2007, nous avons construit un modèle individu centré stochastique spatialisé pour tenter non seulement d'intégrer les variations saisonnières de température, mais aussi de prendre en compte la variabilité des individus face aux variations environnementales.



*Simulation de la dynamique de population du chabot dans le Bez avec le modèle individu centré [Charles et al., 2008]. A gauche, sans réchauffement climatique, à droite avec réchauffement climatique.*

Ce nouveau modèle (Charles et al., 2008) prend en compte l'hétérogénéité spatiale, l'influence de la température sur la survie, la croissance et la fécondité, ainsi que l'effet de la densité dépendance sur la survie, la fécondité et la dispersion des individus au sein du réseau hydrographique. Le modèle a été écrit en C++, avec un pas de temps mensuel. Les statistiques pour l'analyse de sensibilité ont été réalisées avec le logiciel R (R Development Core Team, 2007<sup>2</sup>). Grâce à ce modèle, nous avons notamment simulé l'effet d'un réchauffement climatique, correspondant à +2°C sur 50 ans, soit 4% d'augmentation par an (Figure ci-dessus).

En septembre 2007, pour exploiter au mieux les données accumulées sur le terrain depuis 2002, et parce qu'aucun des deux modèles précédents ne donnait entièrement satisfaction vis-à-vis de la réalité observée, nous avons, dans le cadre de la thèse de Janice Kielbassa (2007-2010, financement mobilité européenne du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche), engagé de nouvelles recherches avec l'objectif d'une meilleure intégration de la température à la fois dans les sous-modèles décrivant les traits d'histoire de vie (et notamment le modèle de croissance), et dans le modèle populationnel.

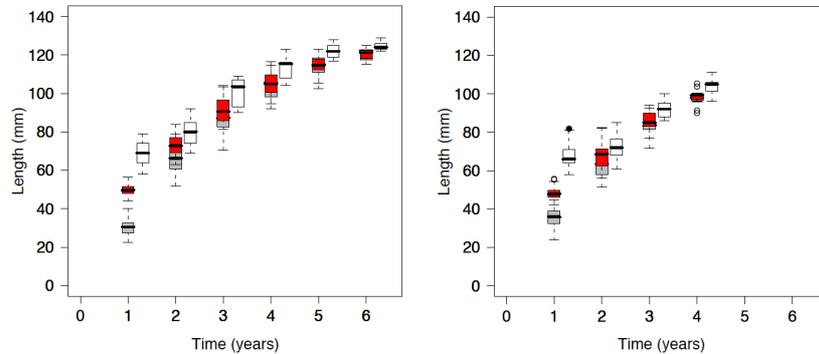
### *Revisite de l'analyse des données d'otolithes*

Dans un premier temps, nous avons revisité la méthode de rétrocalcul des longueurs des poissons à partir de la mesure du rayon des otolithes et du comptage des anneaux. En effet, dans la littérature, les auteurs se réfèrent le plus souvent à la méthode, ancienne, de Fraser-Lee qui suppose qu'à partir de la longueur à la formation de l'otolithe, celui-ci croît proportionnellement à la longueur totale de l'individu. En pratique, la plupart des auteurs estiment les paramètres de cette relation par régression linéaire sur les données à la capture, mais aucun consensus n'a pu être trouvé ni sur le choix de la variable dépendante, ni sur le choix du modèle d'erreur.

A partir des mesures d'âge, de longueur et de rayon d'otolithe recueillies par Asghar Abdoli sur les 544 poissons capturés en 2002, nous avons comparé cinq modèles différents construits par inclusion successive de facteurs explicatifs, comme le sexe et le site géographique, et de la variable âge, pour modéliser la relation longueur-otolithe. C'est le modèle le plus complet, incluant les deux facteurs explicatifs (sexe, site) et la variable âge, qui s'est révélé le plus pertinent pour expliquer les données. Nous avons alors construit une nouvelle méthode de rétrocalcul qui a permis de compléter les données observées de manière

<sup>2</sup> R Development Core Team, 2007. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3- 900051-07-0

beaucoup plus satisfaisante que ne le permettaient les méthodes « classiques » notamment pour les individus les plus jeunes puisque les longueurs calculées sont désormais plus proches des valeurs mesurées à la capture (Figure ci-dessous). Ce travail fait l'objet d'une publication soumise (Kielbassa et al., submitted [a]).

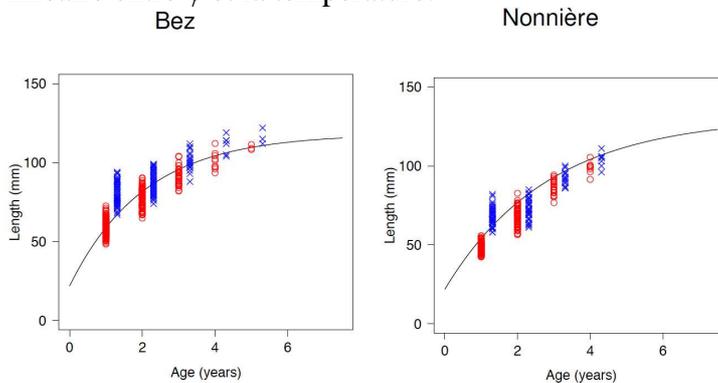


Comparaison des données rétrocalculées par la méthode classique de Fraser-Lee (en gris) avec notre nouvelle méthode (en rouge). En blanc, les données mesurées à la capture.

*Un nouveau modèle de croissance température-dépendant*

Sur la base de ces données rétrocalculées nous avons alors construit un nouveau modèle de croissance. Le modèle de von Bertalanffy est le plus étudié et le plus utilisé des modèles de croissance chez les poissons. Bien que l'équation de von Bertalanffy soit un descripteur approprié pour des données de tailles qui dépendent de l'âge, l'étape de prédiction n'est pas possible dans des conditions environnementales variables. L'objectif principal était donc de proposer une équation de von Bertalanffy dépendant de la température. Nous avons inclus les températures moyennes de l'eau en corrélant le coefficient de croissance ( $k$ ) et la performance de croissance ( $\phi$ ) à la température de l'eau. Les relations utilisées font intervenir des paramètres qui ont tous une signification biologique évidente, ce qui a facilité leur identification. La longueur asymptotique ( $L_{inf}$ ) a aussi été reliée à la température de l'eau par la relation de Pauly qui corrèle  $k$  à la longueur asymptotique par le paramètre  $\phi$ . Nous avons alors posé différentes hypothèses pour décrire les relations entre la température et les paramètres ci-dessus, ce qui nous a finalement conduit à comparer quatre modèles concurrents :

- 1) Le modèle  $M_B$ , avec l'hypothèse de non dépendance à la température : aucun des paramètres du modèle ne dépend de la température.
- 2) Le modèle  $M_{T0}$  qui fait l'hypothèse d'une dépendance à la température uniquement sur  $k$ , via une relation en cloche dissymétrique.
- 3) Le modèle  $M_{T1}$  qui fait l'hypothèse d'une dépendance à la température sur  $k$  et d'une relation linéaire entre  $\phi$  et la température.



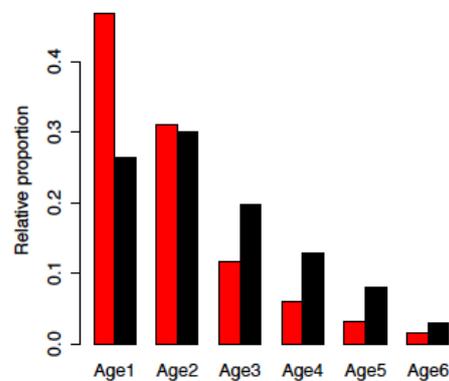
Ajustement du modèle de croissance température-dépendant (courbe noire) aux données expérimentales observées (en bleu) et rétrocalculées (en rouge).

Nous avons montré par l'ajustement simultané des trois modèles pour tous les sites géographiques du réseau du Bez, que le modèle  $M_{TI}$  est le plus adapté pour décrire l'ensemble des données. La Figure ci-dessus donne un aperçu de la bonne adéquation du modèle aux données, à la fois observées et rétrocalculées.

L'intérêt d'un tel modèle dépendant de la température peut encore s'étendre à l'étude des données expérimentales sur d'autres réseaux de rivière ou pour d'autres espèces. Il pourrait par ailleurs servir à évaluer l'impact de différents scénarios de réchauffement climatique, comme par exemple une augmentation future de la température de l'air et donc de la température de l'eau, comme prédit par Météo France dans les prochaines années. Ce travail fait l'objet d'une publication soumise (Kielbassa et al., submitted [b])

### *Un nouveau modèle multirégional température-dépendant*

Depuis septembre 2009, nous avons entrepris d'actualiser le modèle multirégional initial en y incluant la dépendance à la température sur les différents traits d'histoire de vie. Les données de dénombrements obtenues entre 2002 et 2004 ont servi pour la calibration du modèle. Une relation allométrique longueur-fécondité est désormais utilisée sous la contrainte du modèle de croissance température-dépendant précédent. Les probabilités de survie d'une classe d'âge à la suivante ont été ré-estimées à partir des données de terrains de 2002- 2004, ce qui a permis de montrer que les survies dépendent de la température (selon une relation exponentielle décroissante) mais pas de l'âge. Le modèle multirégional permet donc, à partir de la condition initiale définie par les observations de 2002, de simuler la dynamique de la population de chabots dans le Bez sur la base d'un scénario thermique, observé (2005-2008) ou prédit (> 2008). La figure ci-dessous montre l'adéquation du modèle avec les données observées pour 2008 (comparaison des proportions relatives des différentes classes d'âge à l'échelle du réseau).



*Comparaison des proportions relatives des classes observées en 2008 (en rouge) et calculées par le modèle multirégional (en noir).*

### *Structures trophiques et régimes thermiques*

L'objectif de cette partie de l'étude consistait à tester l'action thermie→trophie au niveau de la population de Chabot du bassin versant du Bez, affluent de la Drôme. Le questionnement était donc double: (i) **évaluer la niche trophique du chabot** tout en la **relativisant** (ii) **au contexte** d'organisation du réseau trophique.

En **2007**, une première campagne a permis d'adapter la **méthodologie** aux besoins de l'étude et un plan d'échantillonnage a été établi. Par ailleurs, les premiers résultats ont montré que les distances trophiques inter-taxon sont plus courtes sur le site aux températures les plus

élevées. Concernant le peuplement benthique, les stations présentent une similitude fonctionnelle importante (entre 91.3 et 95.7%), aspect qualitatif, tandis que l'expression des traits de vie (aspect quantitatif) présente des différences semblant être en relation avec les différences de régimes thermiques qui existent entre stations.

Les résultats de **2008** montrent un **décalage général** des signatures isotopiques en  $\delta^{13}\text{C}$  entre les stations ayant un régime hydrologique d'origine karstique et un régime thermique froid (Archiane et Nonnières) et les stations ayant un régime hydrologique pluvial et un régime thermique chaud (Bez, Borne, et Gats) durant l'été 2008. Jusqu'à présent les résultats ne permettent pas de déterminer l'origine (régime hydrologique ou régime thermique) de ce décalage avec certitude.

Au niveau de la **structure du réseau trophique**, l'examen des biplots ( $\delta^{13}\text{C} - \delta^{15}\text{N}$ ) ne révèle **pas d'influence directe** des régimes thermiques sur la structure des réseaux trophiques : l'énergie se transfère des consommateurs primaires aux invertébrés carnassiers puis aux truites et chabots, sans qu'aucune des deux voies (détritique ou photosynthétique) ne puisse être privilégiée. Une **influence indirecte**, par le biais d'une **modification des assemblages de populations**, a néanmoins été observée. Par ailleurs, la station Archiane se distingue par une continuité du réseau trophique très marquée, reflet probable d'une omnivorie plus développée. Les **chaînes trophiques** sont **plus courtes** sur les stations les **plus chaudes**, révélant une plus grande omnivorie (effet direct) ou des assemblages de peuplement différents, notamment couvrant une plus grande gamme de taille (effet indirect).

A l'**échelon de l'écosystème**, le calcul des métriques développées par Layman et al. (2007) montrent que les stations les **plus froides** possèdent la **plus grande diversité trophique**. En particulier la niche trophique occupée par la biocénose est plus étendue sur les stations froides. De plus, cette observation reste valable que l'on tienne compte de tous les individus présents sur la station ou que seuls les individus communs à toutes les stations soient inclus dans le calcul. La plus grande richesse trophique observée sur les stations les plus froides ne s'explique donc pas uniquement par la plus grande richesse des assemblages de population sur ces stations (effet indirect) et le régime thermique exerce également une action directe sur la trophie des stations. Cette action consiste probablement à limiter la disponibilité des sources de matière organique (photosynthétique ou détritique) sur les stations les plus froides, entraînant une augmentation de la compétitivité trophique et donc le développement de l'omnivorie.

Ce résultat laisse penser que l'allongement des chaînes trophiques sur les stations froides est la conséquence d'une modification des assemblages de peuplement et non d'une réduction de l'omnivorie.

A l'**échelon du chabot**, l'**influence** des régimes thermiques est **plus subtile** et seule la station froide (Archiane), dont la température est la plus éloignée de la température des autres stations, se distingue par une plus grande richesse trophique. Ceci est également observé pour la population d'invertébrés carnassiers de *Dinocras*.

Il semble donc que des **écarts de température restreints** (maximum de 4.3 °C en moyenne durant 51 jours en 2008) entraînent des **modifications** (directe ou indirecte) du **réseau trophique**. A l'**échelon de l'écosystème**, une station **plus chaude** conduirait à une simplification des relations trophiques et par suite à un **appauvrissement du réseau**. Par contre, à l'**échelon des populations**, une **augmentation de température** semblable aux différences observées entre nos stations n'entraînerait **pas de réduction de la niche trophique du chabot**. Cela signifierait que la réduction de la niche trophique occupée par la biocénose n'est pas due à la réduction des niches trophiques des différents taxons mais à la concentration de chacune de ces niches sur un nombre de sources d'énergie plus limité.

## **Climat et dynamique des peuplements de poissons d'eau douce d'Afrique de l'Ouest**

Le but de cette étude est d'utiliser des séries temporelles de suivi de communautés de poissons d'eau douce d'Afrique de l'ouest pour quantifier le rôle de variables climatiques dans la dynamique inter-annuelle de ces peuplements. Une première étape pour prédire les conséquences du « global warming » est d'analyser les effets du climat actuel sur les systèmes écologiques et dans cette perspective l'existence de suivis à long terme est un atout précieux. Dans le cadre d'un programme de lutte contre l'onchocercose en Afrique de l'ouest (OCP) les communautés de poissons ont été échantillonnées durant une vingtaine d'années et dans différentes rivières de Côte d'Ivoire pour évaluer l'impact des campagnes insecticides anti-vectorielles sur la faune non-cible. Trois sites situés dans deux bassins versants différents (Comoe et Bandama) ont été retenus pour cette étude. Le jeu de données a été découpé en deux périodes. Pour la première période, 1976-1989, les variables climatiques utilisées sont un indice d'hydrologie régional et la température de l'air. Les données hydrologiques n'étant pas disponibles après 1989, l'ensemble des données (1976-1997) a été analysé en utilisant les précipitations à la place de l'hydrologie. Outre l'abondance totale du peuplement, ont été considérées des variables liées au pourcentage de jeunes stades, à la taille moyenne des individus, à celle des espèces (taille à première maturité) et à leur type de reproduction (toute l'année vs. saisonnière).

Dans les rivières tropicales à régime hydrologique saisonnier de nombreuses espèces se reproduisent au début de la crue pour bénéficier des conditions favorables à la croissance et à la survie des jeunes. En effet les plaines d'inondations offrent des milieux peu profonds où la prédation est réduite et ont une forte production zooplanctonique. On s'attend donc à un effet positif de l'intensité de la crue annuelle sur l'abondance totale par le biais d'un meilleur succès de la reproduction et de la survie des individus. Le lien positif entre intensité de la crue et abondance totale observé dans cette étude va dans ce sens. On s'attend aussi à ce qu'une hydrologie importante favorise les espèces se reproduisant durant la crue (espèces saisonnières), et c'est ce que les analyses montrent. Les espèces utilisant la crue pour se reproduire sont généralement des espèces de grande taille à maturité tardive, observation elle aussi cohérente avec les résultats. Quand les précipitations sont utilisées à la place de l'hydrologie, les mêmes tendances sont préservées mais ne sont généralement pas significatives suggérant que cette variable n'est qu'un estimateur très grossier de l'hydrologie.

A notre connaissance aucune étude n'avait évalué auparavant si, en plus du débit, la température pouvait contribuer à la dynamique inter-annuelle des peuplements de poissons dans des rivières inter-tropicales. Nos résultats montrent un effet négatif de températures élevées sur l'abondance totale, sur la représentation des espèces à maturité tardive et à reproduction saisonnière. Les données sur l'écologie thermique des espèces manquent malheureusement pour interpréter finement ces résultats. De manière générale on sait qu'une température élevée augmente la mortalité naturelle des populations de poissons ce qui serait cohérent avec nos résultats. On sait aussi qu'une augmentation de température accélère, chez les ectothermes, les processus biologiques et résulte en une augmentation du taux d'accroissement maximum des populations. Dans ces conditions les espèces les plus à même de présenter les plus forts taux d'accroissement sont les espèces dont la biologie, maturité précoce et reproduction continue, les prédisposent à des dynamiques rapides, ce qui est conforme à nos résultats. Nos résultats peuvent également s'interpréter par un décalage des peuplements vers haut le long du gradient aval-amont (ou S-N). En effet les espèces à

reproduction continue, en Côte d' Ivoire, se rencontrent préférentiellement dans les bas cours. Notre étude ne confirme pas toutes les tendances observées sur les peuplements de poissons tempérés quant aux relations entre taille corporelle et température. Si effectivement on observe que les espèces de petite taille sont favorisées si la température augmente, on n'observe pas d'augmentation du pourcentage de jeunes stades ni de diminution de la taille moyenne des individus.

Dans l'ensemble nos résultats montrent un effet significatif du climat sur la dynamique des peuplements de poissons d'un point de vue quantitatif (abondance totale) et qualitatif (composition en traits biologiques) avec hydrologie et température ayant des effets essentiellement antagonistes. Dans le cas de la Côte d' Ivoire pour laquelle les modèles climatiques prévoient une augmentation des précipitations et de la température il est possible que les effets d'une augmentation de la température soient en partie compensés par ceux d'une augmentation des débits. Quoiqu'il en soit, cette étude souligne la nécessité d'intégrer ces deux composantes pour évaluer les conséquences du climat futur dans ces régions. Elle souligne de plus la nécessité de mieux comprendre comment la température affecte la dynamique des populations et des peuplements, si le lien négatif observé dans les rivières ivoiriennes entre abondance totale et température devait se révéler être représentatif de milieux similaires.

### **Remarques finales**

\* De façon générale, nous manquons cruellement de données concernant la température des cours d'eau.

\* La traduction des scénarios climatiques globaux à une échelle locale et pour les cours d'eau (température et débit) est un défi scientifique majeur.

\* Il importe de faire le point et/ou actualiser les connaissances concernant les mécanismes expliquant les effets de la température qui peuvent être directs ou indirects. Ceci passe par :

+ Une amélioration des connaissances écophysiologiques générales des espèces de façon à caractériser leurs normes de réaction thermiques ou au moins celles de certaines phases (croissance, maturation sexuelle) ou stades clés de leur cycle biologiques. Cette connaissance passe également par une meilleure appréhension des interactions entre régimes thermiques et qualité de l'eau.

+ L'analyse de l'impact de la température sur les chaînes trophiques. Cette analyse doit se faire via les changements de structures de taille (une des expressions du taux de croissance) et des régimes alimentaires en les reliant à la quantité limitante ou non des ressources disponibles.

\* L'utilisation des séries de données déjà acquises présente avant tout un grand intérêt car elle permet de disposer d'un recul historique intéressant et dans le cas présent pour le saumon sur plus de trente ans. Cependant, la série de données utilisées sur le Scorff dans le cadre de l'étude régionale et locale provient de captures par pêche à la ligne de saumon adultes. Leurs écailles ont été utilisées pour estimer rétrospectivement leurs tailles au stade juvénile migrant avec un modèle classique de rétro mesure. Dans un premier temps, l'on peut légitimement considérer que la sélectivité par pêche à la ligne n'occasionne aucun biais dans

l'estimation de la taille des juvéniles. En revanche, les adultes qui reviennent en rivière sont les survivants d'une cohorte après leur séjour marin. Comme le taux de survie en mer est positivement relié à la taille du poisson, cette sélection pourrait renforcer cet effet taille du juvénile qui ne serait alors pas du à la seule modification des conditions de croissance du milieu eau douce. Cet exemple que le recours à des données anciennes est d'un grand intérêt mais doit s'accompagner d'une grande rigueur méthodologique.

\* L'utilisation de modèles de dynamique de population a suscité de par leur mise en œuvre et leur utilisation future divers questionnements concernant :

+ Le rôle des dispersants dans la modélisation de la dynamique à l'échelle interbassin. Cette question est essentielle notamment chez le saumon atlantique pour lequel il est généralement considéré un taux élevé de retour à la rivière natale. Cependant, ce phénomène de dispersion existe d'autant plus que les rivières sont proches ou que parmi ces rivières il existe un cours d'eau avec une abondante population (grand bassin versant, et/ou forte capacité d'accueil) qui fournit des individus aux autres cours d'eau (fonctionnement en source puits). Par ailleurs, ces dispersants peuvent avoir un rôle important dans la recolonisation de milieux non fréquentés par l'espèce et de meilleure qualité que la rivière natale.

+ La transférabilité des modèles établis sur un système à d'autres bassins. Elle semble pouvoir être réalisée si un minimum de connaissances biologiques et de caractéristiques du milieu est disponible.

+ Le choix du modèle de survie *vs* température à intégrer dans le modèle matriciel de dynamique de population.

+ Les intérêts relatifs des deux types de modèles utilisés.

Les deux types de modèles, individus centrés et matriciels, peuvent permettre de prédire tant l'évolution des stratégies de vie que les changements dans la dynamique de population sous différents scénarios climatiques. L'approche avec les modèles matriciels reste directe et permet d'avoir un retour moins aléatoire sur les données intégrées. Par ailleurs, la sensibilité de ce type de modèle est plus facile à tester. L'approche avec les modèles individus-centrés est par contre plus riche d'enseignement : représentation des mécanismes écologiques et évolutifs au niveau auquel ils se déroulent, à savoir l'individu, propriétés émergentes liées à l'agrégation des individus et prise en compte de la génétique, indispensable pour prédire les évolutions. Elle doit permettre de relier d'une manière plus précise les déterminants de la capacité adaptative individuelle et populationnelle (génotype et phénotype) à l'augmentation croissante de l'instabilité des milieux résultant des contraintes globales et locales pour évaluer les possibilités d'évolution des populations. Mais cette approche reste plus difficile à mettre en œuvre car plus lourde compte tenu du grand nombre de paramètres intégrés. Cette lourdeur semble diminuer la sensibilité de ces paramètres aux scénarios testés. A l'inverse, pour des mises en œuvre sur de larges échelles (grands bassins versants), le modèle matriciel spatialisé aurait l'avantage d'une plus grande robustesse et de ne reposer que sur un plus petit nombre d'hypothèses. En d'autres termes, l'approche matricielle réduit la complexité mais aussi facilite le test d'hypothèse, l'approche individu-centré considère des mécanismes élémentaires, plus nombreux mais plus génériques.

#### **IMPLICATIONS PRATIQUES, RECOMMANDATIONS, RÉALISATIONS PRATIQUES, VALORISATION**

- Changement potentiel des aires de distribution du saumon selon différents scénarios climatiques
- Implications des modifications des régimes thermiques sur les stratégies des espèces piscicoles (natalité, survie,..).

- Prise en compte du CC dans l'aide à la décision pour la gestion des populations de saumon. En complétant le modèle de cycle biologique par une représentation explicite des processus d'exploitation et de gestion, on peut comparer au moyen de simulations différentes options de gestion en fonction de critères de performance correspondant eux mêmes à des objectifs différents (exploitation et conservation).

- Recommandations et limites éventuelles :

Ces travaux doivent être considérés comme préliminaires et fournissent des pistes aux gestionnaires quant aux orientations à mettre en oeuvre pour la gestion des populations piscicoles. En particulier, les modifications des aires de distributions ont toute leur validité dans un contexte statistique et exprime des réponses à large échelle.

#### **PARTENARIATS MIS EN PLACE, PROJETÉS, ENVISAGÉS**

Liaison avec le GIS GRISAM Amphihalins dans le cadre de la mise en place par le MEEDDM (DEB direction de l'eau et de la Biodiversité) d'une stratégie nationale pour la gestion des poissons migrateurs (STRANAPOMI).

Poursuite des travaux initiés par le GICC concernant la modélisation individu-centrée appliquée au Saumon atlantique dans le cadre de la collaboration INRA-ONEMA.

Partenariat avec l'Agence Européenne de l'Environnement (AEE) pour l'acquisition et la production de données environnementales large échelle.

**LISTE DES OPÉRATIONS DE VALORISATION ISSUES DU CONTRAT (ARTICLES DE VALORISATION, PARTICIPATIONS À DES COLLOQUES, ENSEIGNEMENT ET FORMATION, COMMUNICATION, EXPERTISES...)**

<b>PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES</b>	
Publications scientifiques parues ou acceptées	<p>Abdoli A., Pont D. &amp; P. Sagnes (2007). Intrabasin variations in age and growth of bullhead: the effects of temperature <i>Journal of Fish Biology</i> 70:1224-1238.</p> <p>Charles, S., Subtil, F., Kielbassa, J. and Pont, D., 2008. An individual-based model to describe a bullhead population dynamic including temperature variations. <i>Ecological Modelling</i>, 215:377-392.</p> <p>Chaumot, A., Milioni, N., Abdoli, A., Pont, D. and Charles, S., 2006. First step of a modeling approach to evaluate spatial heterogeneity in a fish (<i>Cottus gobio</i>) population dynamics. <i>Ecological Modelling</i>, 197:263-273.</p> <p>Lassalle, G., Béguer, M., Beaulaton, L., and Rochard, E. (2008) Diadromous fish conservation plans need to consider global warming issues: An approach using biogeographical models. <i>Biological Conservation</i> 141, 1105-1118</p> <p>Lassalle, G., Béguer, M., Beaulaton, L., and Rochard, E. (2009) Learning from the past to predict the future: responses of European diadromous fish to climate change. <i>American Fisheries Society Symposium</i> 69: 175-193.</p> <p>Lassalle, G., Crouzet, P. &amp; Rochard, E., 2008. Modelling the current distribution of European diadromous fishes: an approach integrating regional anthropogenic pressures. <i>Freshwater Biology</i> 54, 587-606.</p> <p>Lassalle G. &amp; Rochard E., 2009. Impact of twenty-first century climate change on diadromous fish spread over Europe, North Africa and the Middle East. <i>Global Change Biology</i>, 15, 1072-1089.</p> <p>Rivot E., Perrier C., Jouanin C., Roussel J.-M., Riera P., Porcher J.-P. &amp; Baglinière J.-L., 2009. Climate change may have affected growth and life history of Atlantic salmon juveniles over the past 30 years. <i>American Fisheries Society Symposium</i> 69: 855-857.</p> <p>Reyjols Y., J.P. Léna, F. Hervant &amp; D. Pont (2009). Effects of temperature on biological and biochemical indicators of the life-history strategy of bullhead (<i>Cottus gobio</i> L.). <i>Journal of Fish Biology</i>. 75: 1427-1445.</p>
Publications scientifiques soumises	<p>Kielbassa, J., Delignette-Muller, M.L. and Charles, S., 2009(a). A new method based on clarified hypotheses to back-calculate fish growth from otoliths. <i>Journal of Fish Biology</i>, submitted.</p> <p>Kielbassa, J., Delignette-Muller, M.L., Pont, D. and Charles, S., 2009(b). A temperature-dependent von Bertalanffy growth model applied to bullhead (<i>Cottus gobio</i>). <i>Ecological Modelling</i>, submitted.</p>
Publications scientifiques prévues	<p>Hette, N., Dumont, B., Belliard, J., Roussel, J.-M. &amp; D., Pont. (en préparation). Foodwebs in five temperate streams differing in their thermal budgets: a stable isotopes study."</p> <p>Roussel J.-M., Perrier C., Cunjak R.A., Graham B., Erkinaro J., Huteau D., Riera P. (en préparation). Retrospective analysis of <math>\delta^{15}\text{N}</math> and <math>\delta^{13}\text{C}</math> on archived fish scales reveals that dissolved inorganic nitrogen loading affects</p>

carbon cycle in river food webs.

Rivot E., Perrier C., Bal G., Porcher J-P., Baglinière J-L. (en préparation). Evidence for a change in the mean age at smoltification for A. salmon in the Armorican Massif, France.

### COLLOQUES

- Participations passées à des colloques
- Bal G., Prévost Et., Rivot E. & Baglinière J.-L., 2009. Estimation du réchauffement des cours d'eau basée sur des corrélations Air/Eau au pas de temps infra annuel : une approche trompeuse ? Communication orale + résumé, Société Française d'Ichtyologie, Quatrièmes Rencontres de l'Ichtyologie en France (Paris), 24-27 mars 2009.
- Beall, E., Grimardias, D.; Jarry, M. & Gaudin, P. 2008. Changement climatique et reproduction du saumon. Communication orale (Conférence invitée), Colloque sur les rivières du Piémont Pyrénéen, 2ème édition, Oloron-Sainte-Marie (64), 8-9 février 2008.
- Beall, E.; Grimardias, D.; Parade, M.; Lamarque, E.; Jarry, M. & Gaudin, P., 2008. Atlantic salmon at the southern limit of their range are faced with high temperatures during spawning: can they adapt? Communication orale, AFS 138th meeting, August 17-21 2008, Ottawa, Canada.
- Charles S., Subtil F. & Pont D. (2007). An individual-based model for describing the bullhead population dynamics in a river network. The 6th European Conference on Ecological Modelling, ECEM'07. November 27-30, 2007. Trieste – Italy.
- Lassalle G., Béguer M., Rochard E. & Beaulaton L., 2007. Learning from the past to predict the future: responses of European diadromous fishes to climate change. Communication orale, "Challenges for diadromous fishes in a Dynamic Global Environment" American Fisheries Society, Juin 2007, Halifax
- Lassalle G. & Rochard E., 2008. Poissons migrateurs et changement climatique : retour d'expérience sur une approche statistique à large échelle. Communication orale, Programme Seine aval, séminaire Changement climatique, Juin 2008 Rouen.
- Piou C. & Prévost E., 2009. Salmon shall be hot in 2030, and so what? Developing an individual-based model of *Salmo salar* to assess population dynamics under scenarios of climate change. Communication orale, NoWPas Workshop, Southampton, Angleterre, 19-22 mars 2009.
- Piou C. & Prévost E., 2009. Évolution des stratégies des poissons: de l'individu à la démographie. Communication orale (conférence invitée), Changement climatique, impacts sur les milieux aquatiques et conséquences pour la gestion, Séminaire ONEMA – programme GICC (MEEDDAT), Paris. 29-30 juin 2009.
- Piou C. & Prévost E., 2009. Réchauffement Climatique : Évolution et Perspectives ; Perturbation de l'Habitat du Saumon Atlantique. Communication orale (conférence invitée), Colloque Saumon atlantique : pour une bonne gestion des habitats et des salmonicultures de repeuplement, Séminaire ONEMA, Oloron Ste Marie. 21-22 octobre 2009.
- Pont D. (2007). Impacts potentiels du changement climatique sur

- les peuplements piscicoles des cours d'eau français. 8ème Forum de l'Association Française d'Halieumétrie. 19-21 Juin 2007, La Rochelle. *Conférence invitée.*
- Pont D. (2008). Changement global et stratégies démographiques des populations piscicoles. Premiers résultats. Colloque du programme Gestion et impact du changement Climatique (GICC). Paris, 27-28 Mai 2008.
- Pont D., Bady P. & M. Logez (2008). Uncertainties associated to responses of fish bioindicator to environmental factors and human disturbances in rivers. Consequences of global warming on good ecological status. EURAQUA Conference : How can climate change be incorporated in river basin management plans under the WFD?. Oslo. 23-24 Oct 2008. *Conférence invitée.*
- Pont D. (2009). Impacts potentiels du changement climatique sur les communautés et les populations piscicoles : Bilan des programmes GICC. Séminaire Onema – programme GICC (MEEDDAT) Changement climatique, impacts sur les milieux aquatiques et conséquences pour la gestion. 29-30 juin 2009.
- Pont D. (2009). Impacts potentiels du CC sur l'évaluation de la qualité écologique des cours d'eau européens et les conditions de référence. European Workshop on implementation of the WFD in a context of adaptation to climate change (MEEDDM). October 22-23, Paris. *Conférence invitée.*
- Rochard E. & Lassalle G., 2008. Changement climatique et poissons migrateurs, quelles conséquences pour les plans de gestion en France. Communication orale (conférence invitée), Rencontres migrateurs du bassin de la Loire, Mars 2008, Orléans.
- Rochard E. & Lassalle G. 2009. Projection d'aire de répartition des poissons migrateurs. Communication orale, Séminaire ONEMA programme GICC MEEDDAT Changement climatique, impacts sur les milieux aquatiques et conséquences pour la gestion Juin 2009 Paris.
- Rochard E. & Lassalle G., 2009. Salmon and banana tree; evidence and uncertainty. How to use results from climate's scenarios based niche models in fish recovery plans". Communication orale (conférence invitée), International Workshop on the Restoration of Fish Populations. Septembre 2009 Dusseldorf.
- Rochard E. & Lassalle G., 2009. Distribution des poissons migrateurs dans les bassins versants européens : un début de relativisation des impacts anthropiques. Communication orale (conférence invitée), Rencontres Jacques Cartier Novembre 2009 Lyon.
- Rivot E., Perrier C., Jouanin C., Roussel J.M., Riera P., Porcher J.P. & Baglinière J.L., 2007. Climate change and human pressure may affect growth and life history in Atlantic salmon juveniles over the last 30 years. Poster + abstract, Symposium Challenges for Diadromous Fishes in a Dynamic Global Environment, 18-21 June 2007, Halifax, Nova Scotia, Canada.
- Rivot E., Perrier C., Roussel J-M., Riera P., Porcher J-P., Prévost E. & Baglinière J-L. 2007. Changements à long terme de l'Age Moyen à Smoltification chez le Saumon atlantique

	<p>(<i>Salmo salar</i>). Communication orale, 8ème forum halieumétrique "Changements réversibles et irréversibles dans les ressources halieutiques" communication orale +résumé, La Rochelle, 19-21 juin 2007.</p> <p>Rochard E. 2009. Evolutions des poissons migrateurs et impacts anthropiques. Communication orale (conférence invitée), EDF, Colloque Hydroécologie 2009 Cycle « Changements globaux et hydrosystèmes » 2ème volet : Dérive des peuplements aquatiques Novembre 2009 Bordeaux.</p>
<b>THÈSES</b>	
Thèses passées	<p>Lassalle, G. (2008) Impacts des changements globaux sur la distribution des poissons migrateurs amphihalins, une approche par modélisation à l'échelle continentale. PhD thesis, Université de Bordeaux I.</p>
Thèses en cours	<p>Hette N. Organisation trophique des peuplements piscicoles des cours d'eau, approche par l'analyse des isotopes stables.</p> <p>Kielbassa J. Modélisation mathématique des effets du changement global sur la dynamique des populations piscicoles (<i>Cottus gobio</i>).</p> <p>Bal G. Réponses adaptatives des populations de saumon atlantique (<i>Salmo salar</i>) aux changements climatiques.</p>
<b>ARTICLES DE VALORISATION-VULGARISATION</b>	
Articles de valorisation parus	<p>Terra-Eco (2009) Les poissons migrateurs se volatilisent. n°5, page 30</p> <p>Sud-ouest (2008) Sale temps pour les poissons migrateurs, 22 décembre, page 14</p> <p>Le Monde (2008) Les poissons migrateurs européens menacés - Une étude évalue les conséquences du réchauffement climatique sur 28 espèces amphihalines, 6 novembre, page 10.</p>

## RÉSUMÉ

### CHANGEMENT GLOBAL ET STRATÉGIES DÉMOGRAPHIQUES DES POPULATIONS PISCICOLES

---

Ce programme visait à étudier les capacités de réponses de deux modèles biologiques au changement global, l'un est choisi pour son caractère emblématique et les projets de restauration déjà engagés (saumon), l'autre pour sa capacité à jouer un rôle d'espèce sentinelle d'état de la biodiversité dans les zones amont des bassins hydrographiques (chabot). Une approche complémentaire vise à modéliser l'impact du climat sur la dynamique de populations de poissons d'eau douce d'Afrique de l'Ouest, en mettant l'accent sur les facteurs hydrologiques.

Pour le modèle saumon, les résultats concernent :

- une analyse macroécologique évaluant les modifications potentielles de l'aire de distribution selon le scénario climatique,
- l'analyse régionale et locale de populations sur trois bassins versants : influence du climat sur l'âge moyen à la smoltification, implications des processus d'anthropisation (enrichissement en nutriments),
- l'impact du réchauffement climatique sur la reproduction dans la Nivelles (modifications des comportements reproducteurs),
- la modélisation des relations entre températures de l'air et de l'eau (Nivelles)
- la prise en compte du changement climatique dans un modèle d'aide à la décision pour la gestion des populations de saumon

Pour le modèle chabot, les données récoltées lors du suivi de la population de la Drôme ont permis :

- de revisiter les relations entre l'âge des individus et la croissance des otolithes
- de développer un modèle original de croissance en fonction de l'âge et prenant en compte la température,
- de prendre en compte les régimes thermiques dans la dynamique des populations à l'aide, d'une part d'un modèle individu-centré permettant de simuler l'influence d'un accroissement thermique sur cette dynamique, d'autre part d'un modèle matriciel de type Leslie spatialisé incluant la dépendance à la température sur les différents traits d'histoire de vie,
- d'analyser les influences de régimes thermiques différents sur les chaînes trophiques et sur les niches trophiques de différentes classes de taille et d'âge chez le chabot.

Pour les communautés de poissons d'Afrique de l'Ouest, l'analyse statistique de suivis à long terme (20 ans) sur trois sites a permis de mettre en évidence, en complément de l'influence de la variabilité hydrologique, une influence négative des hautes températures sur l'abondance totale et sur les espèces à maturité tardive et à reproduction saisonnière. Hydrologie et température apparaissent comme ayant des effets essentiellement antagonistes. Ces résultats soulignent la nécessité d'intégrer ces deux composantes pour évaluer les conséquences du climat futur dans ces régions.

#### MOTS CLÉS

CC, cours d'eau, poissons, traits de vie, migration, plasticité, viabilité, modélisation, *Salmo salar*, *Cottus gobio*, France, Afrique de l'Ouest.

## SUMMARY

### GLOBAL CHANGE AND DEMOGRAPHIC STRATEGIES OF FISH POPULATIONS

The aim of this project was to evaluate the response of two fish species to global warming mainly at the population level: the salmon (*Salmo salar*) and the bullhead (*Cottus gobio*). In addition, the influence of climate variability (temperature and hydrology) on the fish communities of West Africa is analysed.

For salmon, the results are related to:

- a macroecological approach at the European level (probability of presence of salmon at the basin level),
- a regional approach focusing on 3 catchments (Lower-Normandy, Brittany, Basque Country): influence of climate on age at smoltification, consequences of local anthropisation process (nutrients enrichment),
- consequences of water temperature increase on salmon reproduction in the Nivelle catchment (behaviour and spawning success),
- modelling relationship between air and water temperature,
- development of a decision support system for salmon population management and description of an individual-based model aiming at optimizing the management of population.

For bullhead, a population survey was conducted in a small catchment (Drôme river) during 7 years (40 sites covering the entire network). The data collected (abundance, fish size,..) are used to model the influence of temperature on somatic growth and to develop a temperature dependant population dynamic model using two different ways (individual-based models and spatially explicit Leslie matrix models). In addition, the relation between otolith growth and fish age is re-evaluated.

#### **KEY WORDS**

Global change, river fish populations, *Salmo salar*, *Cottus gobio*, life history strategies, plasticity, statistical modelling, population dynamic models, France West Africa.