



HAL
open science

Plasticité des histoires de vie des poissons migrateurs amphihalins

Françoise Daverat

► **To cite this version:**

Françoise Daverat. Plasticité des histoires de vie des poissons migrateurs amphihalins. Sciences de l'environnement. HDR Université de Bordeaux I, 2012. tel-02598405

HAL Id: tel-02598405

<https://hal.inrae.fr/tel-02598405v1>

Submitted on 15 May 2020

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

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

Curriculum Vitae.

Françoise Daverat

Née le 21 février 1975

Fonctions : Ingénieure chercheuse (Ingénieur Agriculture et Environnement, ministère de l'agriculture)

francoise.daverat@irstea.fr

Parcours universitaire

- 2005 Thèse de doctorat en océanographie, Université de Bordeaux I, « Tactiques d'utilisation des habitats et dynamique de population des anguilles de la zone aval du bassin versant Gironde Garonne Dordogne : apport de l'étude des otolithes »
- 1998 Diplôme d'ingénieur des travaux agricoles Ecole Nationale Supérieure des Sciences Agronomiques de Bordeaux (3^{ème} année spécialité halieutique effectuée à l'ENSA de Rennes)

Parcours professionnel

- 2001- Ingénieure chercheuse à Irstea Bordeaux Cestas, équipe Poissons Migrateurs Amphihalins et Ecosystèmes Estuariens
- 2000 Enseignante (formation continue), Base de données relationnelles, gestion de projet, en free lance, en prestation pour des entreprises privées de formation, Paris
- 1999-2000 Enseignante Lycée Français de Koweït, Koweït, contrat local d'enseignement, Etablissement privé homologué par le Ministère français de l'Education Nationale
- 1998-1999 Enseignante en BTS Technologie végétale LEGTA de Luçon Pétré (85) établissement public sous tutelle du Ministère de l'Agriculture

Activités d'enseignement

2009 -2010- 2011-2012	Master 2 Université de Bordeaux I Océanographie parcours Environnements océaniques, littoraux et hauturiers (Envolh) -: MRTT92 : écologie des poissons migrateurs amphihalins 6H par an
2005-	Formation technique continue : formation à la préparation des pièces calcifiées 3jours/an
1999-2000	Collège niveaux 6 ^{ème} , 5 ^{ème} et 4 ^{ème} : service de 24 heures par semaine Sciences de la vie et de la Terre Sciences expérimentales (physique et chimie) Technologie et informatique
1998-1999	BTS technologie végétale : service de 14 heures par semaine Biologie Végétale Aménités agricoles Statistique Zootechnie des nouveaux animaux de compagnie

Activités de recherche

Mes activités de recherche s'articulent autour de l'impact des perturbations naturelles et anthropiques sur les populations de poissons migrateurs amphihalins. Ces activités de recherche s'inscrivent dans un projet européen, deux projets nationaux et un projet régional :

2012-2014	Encadrement de thèse financée dans le cadre de l'équipe commune HYNES (EDF IRSTEA), « pression de sélection des obstacles sur la population d'anguille » financement acquis
2010-2011	Projet de Contrat de Plan Etat Région, région Aquitaine « gestion durable de l'anguille. »
2008–2010	Conseil régional Aquitaine “Dynamique, écologie et gestion des populations de poissons migrateurs (hors esturgeon)” (Eric Rochard, Patrick Lambert, Thomas Trancart, et Françoise Daverat)
2008–2011	ANR 07 VMC 003. “EELSCOPE: Eco-toxicological and Economical Liability of eel exposed to Seasonal and global Change-induced O2-depletion and Pollution in Estuaries.”
2008–2010	Projet Européen FP7. “EELIAD: European Eels in the Atlantic: Assessment of Their Decline, Task 4: Population scale phenomena ” (David Righton, Hakan Wickström, Françoise Daverat)

Articles (revues à comité de lecture)

- Yokouchi, K. & **Daverat**, F. in prep. Length at silvering of female eel: a reaction norm ?
- Yokouchi, K., **Daverat**, F. & Tsukamoto, K. soumis. Individual growth modeling in relation to temperature and migration history for the female European eel in the Gironde River system, France. *Journal of Fish Biology*.
- Martin, J., Bareille, G., Berail, S., **Daverat**, F., Pecheyran, C., Bru, N., Beall, E., Gueraud, F., Barracou, D. & Donard, O. accepté, Persistence of a southern Atlantic salmon population: diversity in natal origins from otolith elemental and Sr isotopic signatures. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*
- Martin, J., Bareille, G., Berail, S., **Daverat**, F., Pecheyran, C., Bru, N., Tabouret, H. & Donard, O. accepté. Tracking natal origins of Atlantic salmon using elemental and Sr isotopic signatures in otoliths. *Journal of Fish Biology*
- Daverat**, F., Beaulaton, L., Poole, R., Lambert, P., Wickstrom, H., Andersson, J., Aprahamian, M.W., Hizem, B., Elie, P., Yalçın-özdilek, S. & Gumus, A. 2012. One century of eel growth: changes and implications. *Ecology Freshwater Fish* 21: 325-336.
- Daverat**, F., Lancelleur, L., C., P., Eon, M., Dublon, J., Schäfer, J., Baudrimont, M. & Renault, S. 2012 Accumulation of Mn, Co, Zn, Rb, Cd, Sn, Ba, Sr, Pb in the otoliths and tissues of eel (*Anguilla anguilla*) following long-term exposure in an estuarine environment. *Science of the Total Environment* 437: 323-330.
- Daverat**, F., Morais, P., Dias, E., Martin, J., Babaluk, J., Fablet, R., Pecheyran, C. & Antunes, C. 2012. Plasticity of European flounder life history patterns discloses alternatives to catadromy. *Marine Ecology Progress Series* 465: 269-282.
- Trancart, T., Lambert, P., Rochard, E., **Daverat**, F., Coustillas, J. & Roqueplo, C. 2012. Alternative flood tide transport tactics in catadromous species: *Anguilla anguilla*, *Liza ramada* and *Platichthys flesus*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*.
- Yokouchi, K., Fukuda, N., Miller, M.J., Aoyama, J., **Daverat**, F. & Tsukamoto, K. 2012. Influences of early habitat use on the migratory plasticity and demography of Japanese eels in central Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 107: 132e140.
- Yokouchi, K., Fukuda, N., Shirai, K., Aoyama, J., **Daverat**, F. & Tsukamoto, K. 2011. Time lag of the response on the otolith strontium/calcium ratios of the Japanese eel, *Anguilla japonica* to changes in strontium/calcium ratios of ambient water. *Environmental Biology of Fishes* 92: 469-478.
- Daverat**, F., Martin, J., Fablet, R. & Pecheyran, C. 2011a. Colonisation tactics of three temperate catadromous species, eel *Anguilla anguilla*, mullet *Liza ramada* and flounder *Platyichthys flesus*, revealed by Bayesian multielemental otolith microchemistry approach. *Ecology of Freshwater Fish* 20: 42-51.
- Daverat**, F., Tapie, N., Quiniou, L., Maury Brachet, R., Riso, R., Eon, M., Laroche, J. & Budzinski, H. 2011b. Otolith microchemistry interrogation of comparative contamination by Cd, Cu and PCBs of eel and flounder, in a large SW France catchment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 92: 332-338.

- Trancart, T., Lambert, P., Rochard, E., **Daverat**, F., Roqueplo, C. & Coustillas, J. 2011. Swimming activity responses to water current reversal support selective tidal-stream transport hypothesis in juvenile thinlip mullet *Liza ramada*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 399: 120-129.
- Perrier, C., **Daverat**, F., Evanno, G., Pécheyrans, C., Bagliniere, J.-L. & Roussel, J.-M. 2011. Coupling genetic and otolith trace element analyses to identify river-born fish with hatchery pedigrees in stocked Atlantic salmon (*Salmo salar*) populations. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 68: 977-987.
- Renault, S., **Daverat**, F., Pierron, F., Gonzalez, P., Dufour, S., Lancelleur, L., Schäfer, J. & Baudrimont, M. 2011. The use of Eugenol and electro-narcosis as anaesthetics: Transcriptional impacts on the European eel (*Anguilla anguilla* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety* 74: 1573-1577.
- Martin, J., **Daverat**, F., Pécheyrans, C., Als, T.D., Feunteun, E. & Réveillac, E. 2010. An otolith microchemistry study of possible relationships between the origins of leptocephali of European eels in the Sargasso Sea and the continental destinations and relative migration success of glass eels. *Ecology of Freshwater Fish* 19: 627-637.
- Fablet, R., **Daverat**, F. & Pontual, H.D. 2007. Unsupervised Bayesian reconstruction of individual life histories from otolith signatures: case study of Sr:Ca transects of European eel (*Anguilla anguilla*) otoliths. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 64: 152-165.
- Daverat**, F., Limburg, K.E., Thibaut, I., Shiao, J.C., Dodson, J.J., Caron, F., Tzeng, W.-N., Iizuka, Y. & Wickström, H. 2006. Phenotypic plasticity of habitat use by three temperate eel species *Anguilla anguilla*, *A. japonica* and *A. rostrata*. *Marine Ecology Progress Series* 308: 231-241.
- Daverat**, F. & Tomas, J. 2006. Tactics and demographic attributes of the European eel (*Anguilla anguilla*): the case study of the Gironde watershed (Southwest France). *Marine Ecology Progress Series* 307: 247-257.
- Daverat**, F., Tomas, J., Lahaye, M., Palmer, M. & Elie, P. 2005. Tracking continental habitat shifts of eels using otolith Sr/Ca ratios: validation and application to the coastal, estuarine and riverine eels of the Gironde-Garonne-Dordogne watershed. *Marine and Freshwater Research* 56: 619-627.
- Daverat**, F., Elie, P. & Lahaye, M. 2004. Microchemistry contribution to a first approach to the diversity of life histories of eels from the lower part of the Gironde Garonne Dordogne watershed. *Cybium* 28: 83-90.

Colloques internationaux

- Daverat, F., Lochet, A., Eon, M., Martin, J., Berrail, S., Bareille, G. & Peycheran, C.** 2012. *Retrospective colonisation patterns of freshwater reaches of eel in Gironde catchment using multi elemental composition and strontium isotope ratio of otoliths*. Proceedings of the Ecology & Conservation of Freshwater Fish. Vila Nova, Portugal (oral)
- Daverat, F., Lochet, A., Eon, M., Martin, J., Berrail, S., Bareille, G. & Pecheyran, C.** 2012. *Retrospective colonisation patterns of freshwater reaches of eel in Gironde catchment using multi elemental composition and strontium isotope ratio of otoliths*. Proceedings of the World Fisheries Congress.(poster)
- Yokouchi, K., **Daverat, F.** & Poole, R. 2012. *Modelling individual eel growth patterns and reaction norms of size at silvering*. Proceedings of the World Fisheries Congress. .(poster)
- Yokouchi, K., **Daverat, F.,** Miller, M.J., Fukuda, N., Aoyama, J. & Tsukamoto, K. 2011. *Potential Causes of Continental Habitat Shifts of Anguillid Eels Related to Individual Growth and Intra-Specific Interactions*. Proceedings of the American Fisheries Society 141st Annual meeting. (oral)
- Yokouchi, K., **Daverat, F.** & Tsukamoto, K. 2011. *Warmer is better for eels? Mixed modeling for individual growth of female temperate anguillid eels in relation with temperature and salinity of habitats*. Proceedings of the European Ecological Federation Congress.(poster)
- Martin, J., **Daverat, F.,** Pecheyran, C., als, T.D., Reveillac, E. & Feunteun, E. 2009. *New insight given by otolith microchemistry on Anguilla anguilla spawning events*. Proceedings of the Otolith Science Symposium, Monterey, USA. (oral)
- Daverat, F.,** Martin, J., C., P. & Fablet, R. 2009. *Comparative analysis of river catchment colonisation tactics of juvenile of three catadromous species : multielemental and multispecific approach of life history traits*. Proceedings of the Otolith Science Symposium. Monterey, USA. (oral)
- Daverat, F.,** Beaulaton, L., Poole, R., Wickström, H., Andersson, J. & Aprahamian, M. 2008. *The story of one century of eel (Anguilla anguilla) growth*. Proceedings of the World Fisheries Congress. Yokohama, Japon (oral)
- Daverat, F.,** Tomas, J., Lahaye, M. & Elie, P. 2005. *Ecological plasticity in eels : tactics of habitat use in the Gironde estuary*. Proceedings of the Fish and diadromy in Europe. Bordeaux, France (oral)
- Daverat, F.,** Lahaye, M., Tomas, J. & Elie, P. 2004. *Tracking continental habitat shifts of eels using otolith Sr:Ca ratios: validation and application to the coastal, estuarine and riverine eels of the Gironde-Garonne-Dordogne watershed*. Proceedings of the Third International Symposium on Fish Otolith Research & Application. Townsville, Australie (oral)

Colloques nationaux

- Daverat, F. & Tomas, J.** 2005. *Plasticité de l'écologie des anguilles : tactiques d'utilisation des habitats dans l'estuaire Gironde*. Proceedings of the Rencontres de l'Ichtyologie Française. (oral)
- Daverat, F. & Elie, P.** 2003. *Apport d'une méthode de microchimie à l'écologie des fractions de populations d'anguilles de la zone aval du bassin versant Gironde Garonne Dordogne*. Proceedings of the Rencontres anguilles GRISAM (oral)
- Daverat, F. & Elie, P.** 2003. *Caractérisation du parcours migratoire des anguilles par microanalyse X des otolithes*. Proceedings of the Groupement National de Microscopie Électronique à Balayage et de Microanalyses. (oral)
- Daverat, F., Elie, P. & Lahaye, M.** 2003. *Microchimie et écologie de l'anguille*. Proceedings of the Rencontres Ichtyologiques Françaises . (oral)

Documents techniques, rapports

- ICES. 2009. Report of the Workshop on Age Reading of European and American Eel (WKAREA). *ICES CM 2009/ACOM*: . Bordeaux, France, 66 pp.
- ICES. 2011a. Manual for the Ageing of Atlantic Eel Otolith preparation methodologies, age interpretation and image storage (Annex 5). Bordeaux.
- ICES. 2011b. Report of the Workshop on Age Reading of European and American Eel (WKAREA2). *ICES CM 2011/ACOM*: . Bordeaux, France, 35 pp.
- Daverat, F. Eon, M.** 2010. Contribution à la DCR (Data Collection Regulation) et au suivi PCB pour l'anguille par des lectures d'âge. Rapport ONEMA.
- Daverat, F., Gazeau Nadin, C., Camoin, P.** 2005. CD Rom préparation des otolithes et acquisition des données d'âge.

Activités d'encadrement

Ecole Nationale Supérieure des Sciences Agronomiques de Bordeaux-Aquitaine, 2^{ème} année (équivalent M1) Céline D'Hardivillé (4 mois), Anthoine Mauvezat (4 mois), Eddy Cosson (4mois).

Master 2 Océanographie parcours Environnements océaniques, littoraux et hauturiers (Envolh) Jean Martin (6 mois), Clément Lesfauries (6 mois)

DESU Géraldine Lamaison (1 an)

Co-encadrement (33%) de la thèse de Thomas Trancart titre : «*Analyse comparative des tactiques déployées lors de la migration de colonisation des bassins versants par les poissons migrants amphihalins thalassotoques* » soutenue le 20 juin 2011.

Encadrement (100%) du post-doctorat de Kazuki Yokouchi titre “*Dependence of body growth to external and internal factors; towards an exploration of the trade off between growth and maturation of eels*”

Je participe au comité de thèse de Jean Martin (sous la co-direction de Gilles Bareille et Christophe Psychéran du laboratoire LCABIE, CNRS Pau, Université de Pau)

J'ai participé au comité de thèse de Charles Perrier (sous la co-direction de Jean Marc Roussel et Jean Luc Baglinière INRA de Rennes) qui a soutenu sa thèse en 2011

J'ai participé aux Jurys de thèse de Lény Mercier Université de Montpellier soutenue en 2010 sous la co-direction de David Mouillot et Audrey Darnaude et de Pierre Feutry, Muséum National d'Histoire Naturelle (ED 227) soutenue en 2011 sous la direction de Philippe Keith MNHN

Autres activités

2011 Participation invitée à une expédition océanique de collecte d'échantillons d'œufs et de larves de l'anguille japonaise pour localiser l'aire de ponte, fosse des Mariannes, 17 jours de mer du 22 juin au 11 juillet 2011 invitation par Pr. Katsumi Tsukamoto du Ocean and Atmosphere Research Institute, Université de Tokyo.

2009-2011 Chair du Working group on Age Reading of European and American Eel (joint ICES EIFAC group)

Notice d'activité

- 1) Contexte des travaux de recherche
- 2) Synthèse des travaux de recherche
- 3) Perspectives de recherche

Contexte des travaux de recherche

Mes recherches se positionnent dans le contexte de l'étude de la plasticité phénotypique face aux changements globaux. Plus précisément, je m'intéresse à la plasticité phénotypique des traits d'histoire de vie des poissons. Il s'agit de décrire la plasticité des traits d'histoire de vie face aux variations de l'environnement afin d'obtenir des éléments de compréhension de la valeur adaptative de la plasticité phénotypique.

I. La plasticité phénotypique : apports de la génétique et de l'écologie évolutive

Les traits de vie, définitions

L'étude des traits de vie (croissance, taille à la reproduction, survie ou non après la reproduction, taille des œufs, longévité, parcours migratoires...) est une question centrale en écologie (Fig. 1).

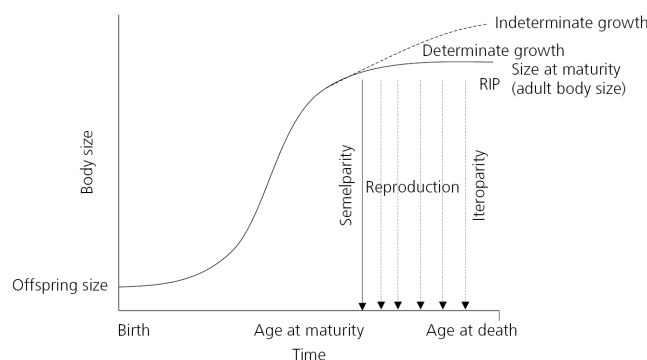


Figure 1. Exemples d'histoires de vie et d'ensembles de traits, tels que la taille à la naissance, l'âge à la maturité, la forme de la croissance, (Mayhew 2006)

Selon le concept fondamental de l'étude des traits, le répertoire de variabilité des traits d'une espèce est déterminé d'abord par le génome (Pigliucci 2001). Le génome s'exprime par les différents phénotypes qu'il peut produire (Fig. 2). On définit la plasticité phénotypique ou plasticité des traits de vie, comme l'ensemble des phénotypes pouvant être produits par un génotype (Pigliucci 2001).

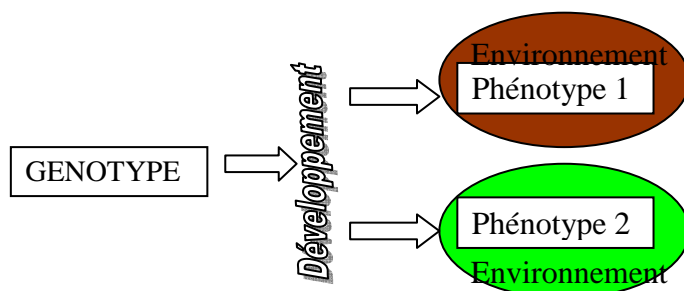


Figure 2. Plasticité phénotypique produite par un génotype dans deux environnements différents d'après Pigliucci 2001

Environnement et compromis évolutifs

L'environnement joue un rôle clé sur la plasticité phénotypique et agit comme un filtre en sélectionnant les phénotypes adaptés parmi les différents phénotypes possibles (Fig. 2). Les théories apportées par l'écologie évolutive sur la plasticité phénotypique, donnent un cadre complémentaire à l'approche génétique, en formalisant l'interaction entre les effets génétiques et les effets de l'environnement sur les traits de vie (Roff 1992; Stearns 1992). Les normes de réaction, modèles conceptuels et ou mathématiques de la variabilité des traits de vie d'une espèce ou d'une population (Fig. 3) soumise à différents environnements, ont ainsi émergé permettant d'adresser directement les effets des habitats sur la plasticité phénotypique (Roff 1992; Stearns 1992; Stearns and Koella 1986).

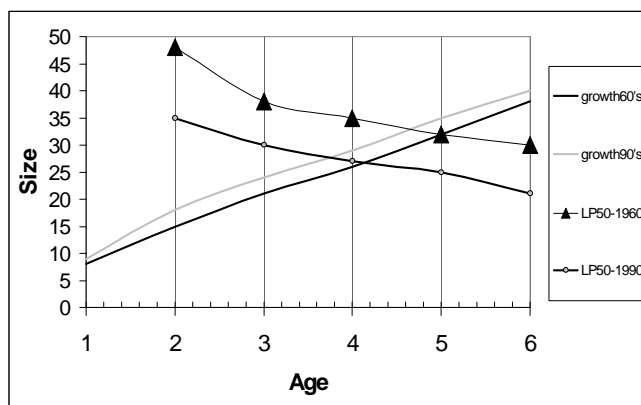
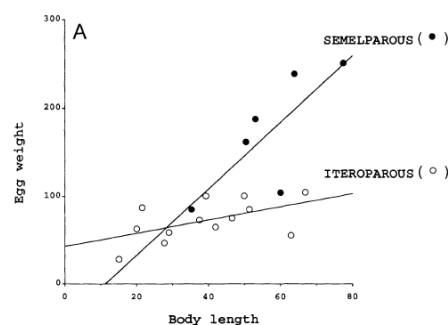


Figure 3. Exemple de variation de l'âge et de la taille à la maturité, appelée norme de réaction de maturation, chez la plie *Pleuronectes platessa* (Grift et al. 2003). LP50 représente la longueur pour laquelle 50% de la population atteint la maturité sexuelle, ici en 1960 et 1990. Growth représente la taille à l'âge en 1960 et en 1990. Ce graphe montre que la taille et l'âge à la maturité ont baissé au cours du temps. Le même phénomène est observé chez la morue du Nord Est Atlantique (Barot et al. 2004)

Dans ce cadre théorique, les individus disposent d'une quantité limitée d'énergie. La quantité allouée à chaque fonction ou trait de vie se fait donc au détriment d'une autre fonction ou autre trait. En conséquence, la limitation des ressources impose que les traits de vie sont interdépendants pour un individu ou une espèce (Roff 1984), c'est la notion de « trade-off ». La plasticité phénotypique peut donc être étudiée en travaillant sur les liens, et les compromis entre les traits de vie (Fig. 4). La relation entre la vitesse de croissance et la taille à la première reproduction, est un exemple fréquent de ce compromis : des espèces à croissance rapide se reproduisent tôt à une petite taille et des espèces à croissance lente se reproduisent tard à une grande taille (Roff, 1992).

Figure 4. Un autre compromis important est souvent observé entre la survie et la taille de la descendance. Ici, les espèces de saumons semelpares ont des œufs plus gros que les espèces itéropares (Crespi and Teo 2002).



Vers le concept d'adaptabilité.

Ces concepts d'écologie évolutive connaissent un regain d'intérêt, alors que les préoccupations de recherche se concentrent sur les effets du réchauffement climatique et plus largement du changement global. La majorité des premiers travaux sur l'effet du changement global se sont portés sur les modifications d'aire de distribution ou de la phénologie (O'Connor et al. 2012). Or, l'étude de la plasticité des traits de vie retrouve ici un intérêt central quand il s'agit de s'interroger sur les capacités adaptatives des espèces au changement global (O'Connor et al. 2012). Les poissons, organismes ectothermes, sont un modèle de choix pour étudier les effets du changement. L'adaptabilité aux modifications de l'environnement peut en effet s'exprimer sans modification d'aire de distribution par des changements drastiques de traits de vie. La perte du comportement de migrateur chez les poissons migrateurs amphihalins (Jonsson and Jonsson 1993) et l'augmentation du nombre des mâles nains chez les saumons (Aubin Horth and Dodson 2004) en sont des exemples.

L'augmentation de température a non seulement des effets directs sur la croissance via le métabolisme mais elle sélectionne aussi les petites tailles (Bergmann 1847). La diminution de la taille moyenne des organismes avec le réchauffement climatique est ainsi observée à large échelle (Daufresne et al. 2009). Si un compromis existe entre la vitesse de croissance et la taille à la reproduction, une vitesse de croissance accrue peut induire une taille plus réduite à la reproduction et par conséquent, une baisse de fécondité. La taille conditionne aussi d'autres traits tels que la décision de migrer et de façon générale la capacité pour un individu à se déplacer. Le cadre théorique de la stratégie conditionnelle montre qu'il existe des effets de taille seuil concernant l'adoption de tactiques ou de phénotype, telles que la décision de migrer ou de résider (Jonsson and Jonsson 1993; Thieriault and Dodson 2003). Le réchauffement climatique a des effets variables sur la capacité de dispersion, avec des effets positifs comme vu chez les oiseaux (Moller et al. 2006), ou négatifs chez les ectothermes terrestres (Massot et al. 2008) et les poissons (Kerr et al. 2009). La capacité à disperser n'est pas toujours sélectionnée positivement lorsque la compétition avec d'autres espèces est forte (Burton et al. 2010). L'avantage évolutif relatif des différents phénotypes est une question intéressante pour comprendre l'adaptabilité d'une espèce. Un exemple d'avantage évolutif relatif est la différence d'accumulation de réserves entre les anguilles qui grandissent en eau douce et les anguilles qui grandissent en eau saumâtre (Limburg et al. 2003; Tsukamoto et al. 1998).

C'est dans ce cadre général que je conduis mes recherches, en m'intéressant à l'interaction entre l'environnement et la plasticité phénotypique pour tenter d'en comprendre la valeur adaptative.

II. Choix du modèle biologique et des méthodes d'investigation des traits de vie

Mon choix de modèle biologique de s'est porté vers les poissons migrateurs amphihalins, notamment l'anguille. Les poissons migrateurs amphihalins utilisent en effet les milieux d'eau douce et le milieu marin au cours de leur cycle de vie (McDowall 1988). Le choix d'espèces aquatiques et à métabolisme dépendant de la température ambiante est donc tout à fait pertinent pour mesurer les effets du changement climatique. De plus, les migrateurs amphihalins présentent une plasticité phénotypique importante, expliquée en partie par leur caractère migrateur et leur utilisation d'environnements différents au cours de leur vie.

Parmi les traits de vie, j'ai fait le choix d'étudier la croissance et les cycles migratoires ou les patrons d'utilisation d'habitat. Les méthodes utilisant les otolithes me sont apparues comme

particulièrement adaptées pour collecter des données individuelles de taille à l'âge et d'habitat occupé de façon rétrospective.

Les poissons migrateurs amphihalins, en particulier les thalassotoques.

Les poissons qui se reproduisent en milieu marin et effectuent leur phase de croissance en eau douce sont dits thalassotoques. En Europe, seules trois espèces ont un cycle de vie thalassotoques, le mullet porc *Liza ramada*, le flet *Platichthys flesus* et l'anguille *Anguilla anguilla*. Ces trois espèces sont largement réparties en Europe, occupant plus de 60% des bassins versants étudiés (Lassalle et al. 2009). Cette vaste répartition permet d'appréhender la plasticité des traits de vie des thalassotoques dans des gradients (latitude, température) et dans des conditions de pression naturelle ou anthropiques variables.

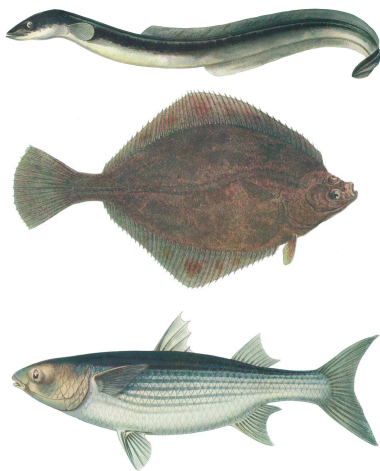


Figure 5.

Anguille *Anguilla anguilla*, poisson serpentiforme

Flet, *Platichthys flesus* poisson plat

Mulet porc, *Liza ramada*, poisson fusiforme.

L'anguille, se reproduit dans la mer des Sargasses et effectue au cours de sa vie deux migrations transocéaniques (Tesch 1979). Les larves migrent vers le continent Européen et Africain, se métamorphosent, et vont coloniser une grande diversité d'environnements et d'habitats : fleuves, rivières, estuaires marais et lagunes côtières, dans une zone étendue en latitude, du Nord du Maroc au Sud de la Norvège. A la fin d'une phase de croissance dont la durée varie de 5 à 20 ans, l'anguille subit une deuxième métamorphose et un début de maturation sexuelle, qui s'achève au cours de la migration de retour vers l'aire de ponte. Nous avons vu précédemment que la plasticité phénotypique était sous influence de l'environnement et de la génétique. Le caractère panmictique de l'anguille et donc sa grande homogénéité génétique (Als et al. 2011; Maes et al. 2005; Wirth and Bernatchez 2001), en fait donc un modèle de choix pour étudier les effets de l'environnement sur sa plasticité phénotypique.

Le flet a constitué un deuxième grand modèle d'intérêt dans mes travaux et dans une moindre mesure le mullet porc. Le flet, tout comme l'anguille a une aire de répartition présente très large et se situe au même niveau trophique. Le flet et le mullet ont des stratégies de reproduction différentes de l'anguille car ils sont itéropares et forment plusieurs populations (Berrebi et al. 1985; Masson 1987). Alors que le flet préfère les eaux plus froides, le mullet est thermophile, ce qui explique que le mullet est la seule espèce diadrome de l'ouest de l'Europe pour laquelle une extension de l'aire de distribution est prédite sous l'effet du changement climatique (Lassalle and Rochard 2009).

Outil privilégié : la sclérochronologie et la microchimie des otolithes.

Les otolithes (« pierres d'oreille ») sont des concrétions calcaires présentes dans l'oreille interne de tous les poissons autres que les requins, les raies et les lamproies. Ils donnent aux poissons un sens de l'équilibre et participent aussi à la fonction d'audition (Pannella 1980). Pour l'ichtyobiologiste, l'otolithe se situe parmi les meilleurs outils dont il dispose pour comprendre et reconstituer le cycle biologique du poisson et de ses populations (Panfili et al. 2002). Les anneaux de croissance de l'otolithe, similaires à ceux d'un arbre, enregistrent l'âge et la croissance d'un poisson depuis son éclosion jusqu'à sa mort. Discipline ayant émergé dans les années 90, la microchimie des otolithes, comprend des méthodes chimiques très élaborées qui reconstituent indirectement une multitude de paramètres allant de l'année de l'éclosion, aux températures de l'eau en passant par les migrations (Campana 1999). L'étude de la structure et de la composition des otolithes constitue donc un outil très performant bien qu'indirect et rétrospectif donnant accès aux traits de vie tels que la croissance, les migrations, le lieu de naissance (Elsdon et al. 2008). De plus, il existe un lien de proportionnalité entre la taille du corps et la taille de l'otolithe qui permet à partir de la taille des stries de croissance annuelles de rétro-calculer la taille du corps à l'âge correspondant et au final d'accéder à la dynamique de croissance individuelle (Francis 1990). Enfin, on peut relier la composition chimique de l'otolithe aux différents habitats occupés par le poisson, après avoir validé cette méthode.

La validation du lien entre composition de l'otolithe et habitat occupé est essentielle et centrale dans ce type d'études. Elle constitue un volet de recherche en tant que tel qui a occupé une part importante de mes travaux.

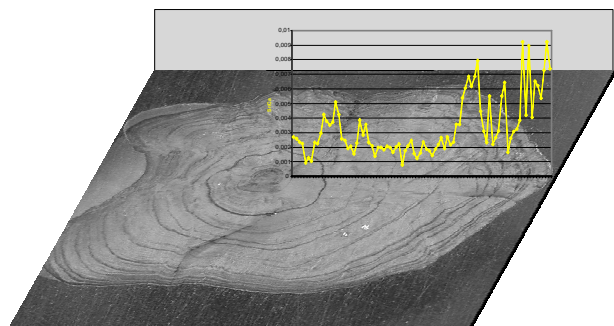


Figure 6. Image de coupe sagittale d'otolithe d'anguille, comportant les mesures de composition chimique le long d'un axe de croissance.

L'utilisation des otolithes présente cependant des limites et certains verrous techniques qui doivent être pris en compte. D'une part, c'est une méthode létale pour les poissons. D'autre part, les résultats obtenus ne portent que sur les poissons échantillonnés, survivants d'une cohorte, ce qui est à prendre en considération quand on s'intéresse à des poissons âgés. Plus précisément, obtenir des informations sur le stade juvéniles à partir de poissons âgés implique que seules les informations sur des stratégies juvéniles gagnantes sont obtenues. Enfin, la microchimie des otolithes est une technique récente qui est toujours en cours de développement notamment pour le choix des traceurs pertinents (éléments chimiques). L'un des enjeux primordiaux est l'interprétation correcte de la composition chimique qui reflète la composition de l'eau mais aussi l'état physiologique du poisson (De Pontual et al. 2003; Otake et al. 1994; Walther et al. 2010). Enfin l'otolithe est un intégrateur, ce qui signifie que chaque mesure de composition d'un otolithe reflète plusieurs jours, semaines ou mois de composition de l'eau.

Synthèse des travaux de recherche.

Mes travaux sont consacrés à l'étude de la plasticité des histoires migratoires et de la croissance des poissons thalassotoques en réponse aux variables environnementales et en particulier en réponse à la température et au gradient de latitude. J'ai d'abord mené des développements méthodologiques afin d'utiliser les otolithes comme outil d'investigation rétrospectif des dynamiques individuelles de croissance, des origines et des parcours migratoires des poissons. Puis, j'ai utilisé une approche comparative pour comprendre la valeur adaptative de la diversité des patrons d'utilisation d'habitat, en analysant les réponses de plusieurs espèces dans des gradients latitudinaux. Enfin j'ai étudié les effets de la température sur la croissance à plusieurs échelles, de la population à l'individu, de l'année au siècle.

Référence des publications choisies

(Daverat et al. 2012a; Daverat et al. accepted ; Daverat et al. 2006; Daverat et al. 2011; Daverat et al. 2012b; Daverat and Tomas 2006; Daverat et al. 2005a; Fablet et al. 2007; Trancart et al. 2012; Yokouchi et al. 2012a; Yokouchi et al. 2011)

III. Développement méthodologiques de l'utilisation des otolithes pour retracer les histoires migratoires

Importance du choix des signatures chimiques des habitats et de leur validation.

La première partie de mon travail a consisté à mettre au point des méthodes s'appuyant sur la chimie des otolithes pour retracer de façon rétrospective les mouvements des poissons. Ces méthodes s'appuient sur le fait que certains ratios élémentaires ont des valeurs différentes selon la masse d'eau considérée et que les valeurs de l'eau sont reflétées par la composition des otolithes (Elsdon et al. 2008). Pendant ma thèse, j'ai d'abord choisi comme traceur, une signature robuste, le rapport Sr/Ca largement utilisé dans la littérature (Chang et al. 2004; Gross 1985; Kraus and Secor 2003; Morris et al. 2005; Tzeng et al. 2002). Les rapports Sr/Ca et Ba/Ca (Bath et al. 2000; Elsdon and Gillanders 2005; Gillanders and Kingsford 2000; Tabouret et al. 2010) sont des traceurs potentiels d'un gradient de salinité et le rapport isotopique du Sr permet de discriminer des origines géologiques très différentes (Kennedy et al. 2002; Milton and Chenery 2003). Dans ma thèse, (Daverat et al. 2005b), j'ai vérifié que les valeurs du traceur Sr/Ca correspondent bien dans le bassin versant de la Gironde au gradient de salinité et que l'incorporation du Sr/Ca dans l'otolithe est proportionnel au ratio Sr/Ca de l'eau. En conséquence, un mouvement d'une anguille d'un habitat à un autre se traduit bien par une variation des valeurs de Sr/Ca dans l'otolithe dans le même sens. En revanche, aucun effet significatif de l'ontogénie en deçà du stade civelle n'a été trouvé.

Dans le cadre d'une collaboration, une expérimentation similaire menée avec l'anguille japonaise (*A. japonica*) confirme que lorsqu'il existe un gradient de Sr/Ca dans l'eau (Fig. 7), ce gradient est bien enregistré dans l'otolithe mais avec un effet retard de deux semaines dans le cas d'un passage d'eau douce à eau de mer (Yokouchi et al. 2011).

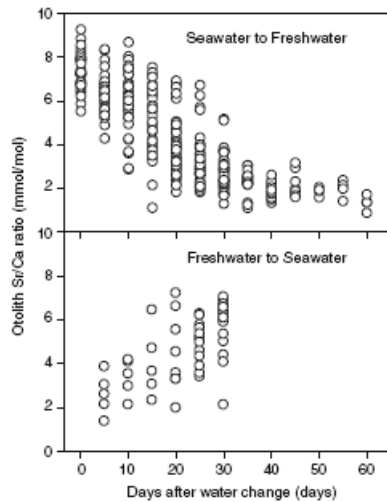


Figure 7 : valeurs du ratio Sr/Ca dans des otolithes d'anguilles japonaises qui ont été soumises à des changements de salinité soit de l'eau de mer vers l'eau douce (graphe supérieur) ou de l'eau douce vers l'eau de mer. Dans le cas du passage de l'eau douce vers l'eau de mer, on ne mesure un changement de valeur significatif qu'après quinze jours de vie dans l'eau de mer (Yokouchi et al 2011).

Dans le cadre de l'ANR Eelscope, j'ai élaboré un dispositif d'élevage en cages à long terme qui m'a permis de rechercher des traceurs élémentaires pour augmenter la discrimination spatiale des masses d'eau. Dans un estuaire tidal des anguilles ont été maintenues à site fixe dans des cages pendant de longues durées (trois à six mois) (Daverat et al. sous presse). Les résultats confirment la robustesse des traceurs Sr/Ca et Ba/Ca qui suivent le gradient de salinité (Fig. 8) et montrent une grande complexité des mécanismes d'incorporation des autres éléments sous l'effet de la physiologie et des processus saisonniers géochimiques (Fig. 8).

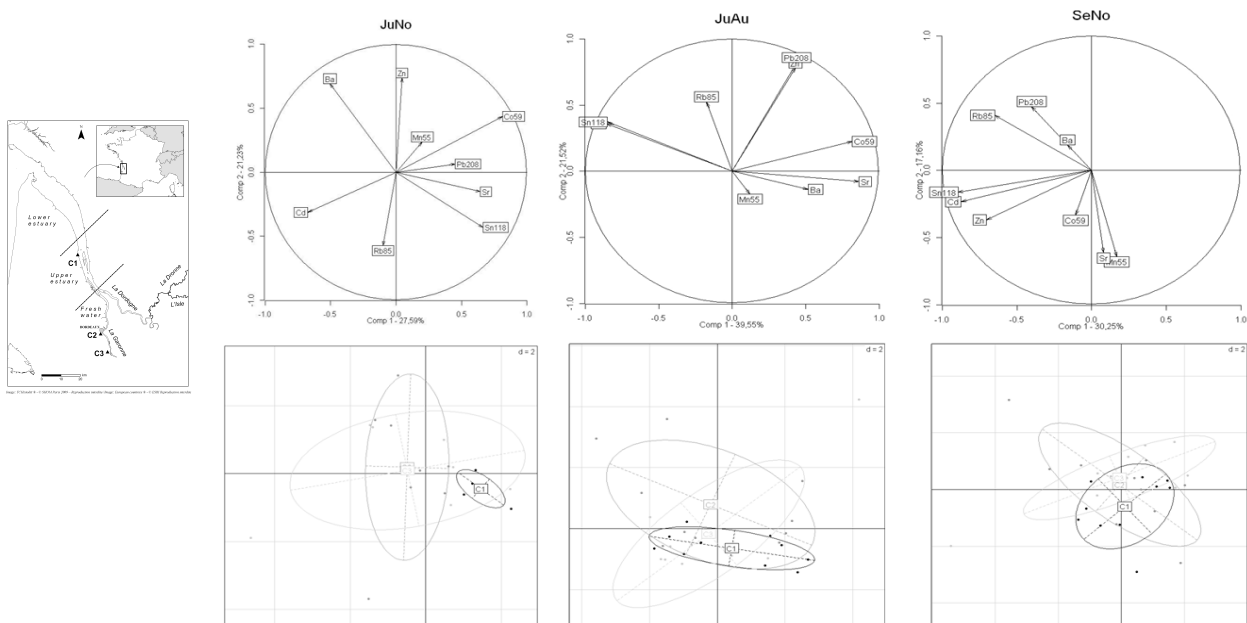


Figure 8. Carte montrant les sites des cages (C1, C2, C3) et analyse en composante principale de la composition des otolithes pour chaque expérience (JuNo= élevage de 6 mois, JuAu et SeNo élevage de 3 mois). Les résultats montrent que seul le site C1 peut être discriminé des deux autres et qu'il existe de grandes variations entre les expériences (Daverat et al sous presse).

Le traitement statistique des données de microchimie des otolithes pour reconstruire des mouvements (Fablet et al. 2007).

Dans le cadre d'une collaboration avec Ifremer, j'ai développé une méthode innovante de traitement des données de microchimie des otolithes, issue de la discipline du traitement du signal. Pour retracer des mouvements de poissons, des séquences de mesure de composition d'otolithe (ici Sr/Ca) le long d'un axe de croissance sont acquises, intégrant une information

sur toute la durée de la vie du poisson. Donner une dimension temporelle de cette séquence est essentiel pour déterminer les durées d'occupation des habitats à différents stades de vie, ou la taille d'un changement d'habitat. L'objectif est de constituer une série temporelle en interpolant les mesures Sr/Ca avec les mesures de distance des marques d'âge des poissons le long du même axe afin d'obtenir le même nombre de mesures chimiques par année de vie du poisson. Le second défi statistique est d'attribuer un habitat occupé à chaque pas de temps de la vie du poisson (Fig 9). Les connaissances acquises lors de la validation du lien Sr/Ca habitat sont utilisées dans un cadre Bayésien non supervisé (Chaîne de Markov cachée) intégrant des connaissances avec et sans a priori (Rabiner 1989).

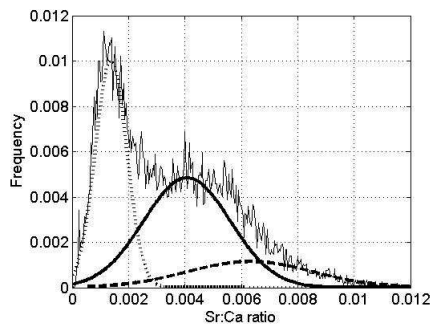


Figure 9 : Un mélange de gaussiennes est ajusté sur la distribution de toutes les valeurs Sr/Ca de tout l'échantillon. Ces trois gaussiennes définissent alors la distribution théorique des valeurs Sr/Ca appartenant à trois habitats du système étudié : le compartiment marin, le compartiment estuarien et le compartiment fluvial.

Cette méthode s'appuie sur un échantillonnage donnant une représentation exhaustive des signatures chimiques de tous les habitats occupés. Le critère clé est un nombre suffisant de poissons ayant tout le répertoire possible des histoires de vie dans les différents habitats connus (Fig. 9). Un habitat est alors attribué à chaque pas de temps de la vie du poisson en tenant compte de la valeur Sr/Ca (Fig. 9) mais aussi de la probabilité de passage d'un habitat à un autre. Ce passage est contraint, les passages directs de la mer à l'eau douce étant peu probables.

Les histoires d'occupation d'habitat de chaque poisson sont reconstruites en attribuant un habitat, ici, marin, estuarien ou fluvial, à chaque pas de temps (Fig. 10). J'ai pu ainsi acquérir des données telles que l'âge moyen au passage d'un habitat à un autre. De plus, cette méthode permet de définir sans a priori des catégories d'histoires de vie, en rapprochant les histoires de vie qui se ressemblent (Fig. 11).

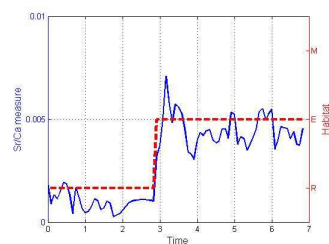


Figure 10 : exemple de reconstruction d'histoire de vie d'une anguille qui reste en eau douce puis migre en estuaire, son histoire est donc de la forme RRREEEE soit RE.

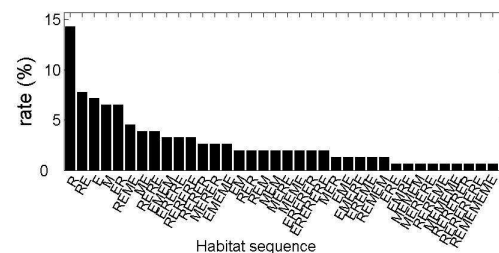


Figure 11 : Différentes catégories d'histoires de vie définies par les « mots » formés par les habitats occupés. Une anguille « R » a résidé toute sa croissance en eau douce.

J'ai finalement étendu la méthode d'analyse au traitement des histoires de vie avec plusieurs traceurs en même temps, le Sr/Ca et Ba/Ca (Daverat et al. 2011).

IV. Diversité des patrons d'utilisation des habitats chez les migrateurs amphihalins thalassotoques.

Diversité des histoires migratoires des anguilles.

L'observation d'anguilles sub-adultes dans des milieux saumâtres et des études ponctuelles de microchimie des otolithes avaient montré que la catadromie pouvait être facultative chez les anguilles (Arai et al. 2003; Limburg et al. 2003; Morrison et al. 2003; Tsukamoto and Arai 2001; Tzeng et al. 1997; Tzeng et al. 2000). Grâce à des collaborations tissées lors de ma thèse, (Daverat et al. 2006), je me suis attachée à décrire la diversité des patrons d'utilisation d'habitat chez les trois espèces d'anguille tempérées *Anguilla anguilla*, *Anguilla japonica* et *Anguilla rostrata* (Fig. 12), après avoir décrit cette diversité (Fig. 13) pour *A. anguilla* dans le bassin de la Gironde (Daverat et Tomas, 2006). J'ai ainsi recherché la valeur adaptative de cette diversité des tactiques en regardant la répartition relative de l'utilisation des habitats d'eau douce et d'eau saumâtre dans un gradient de latitudinal.

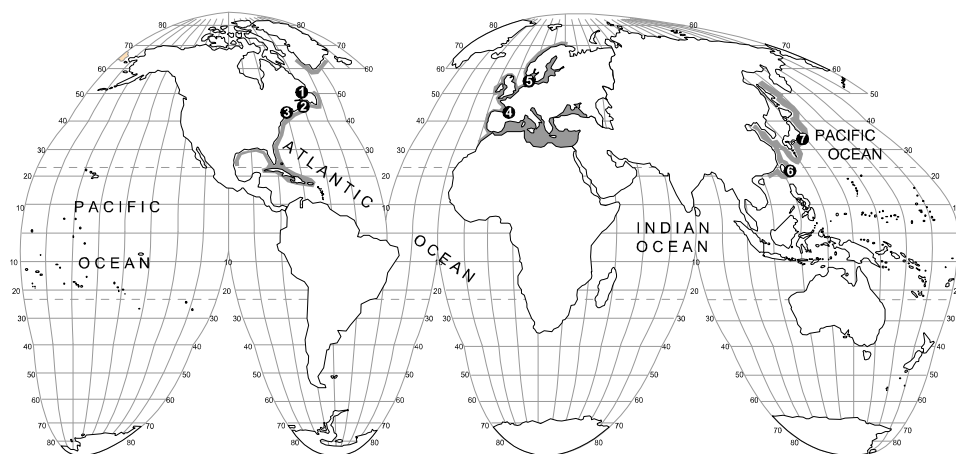


Figure 12. Aire de croissance respective (grisé) des trois espèces d'anguilles tempérées et origine des échantillons de l'étude (de 1 à 7) (Daverat et al 2006).

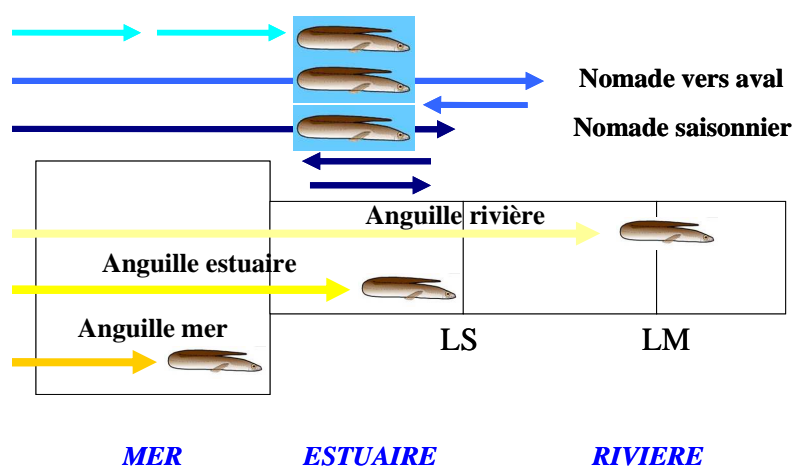


Figure 13. Diversité des patrons d'utilisation d'habitats chez *A. anguilla* dans le bassin versant de la Gironde (Daverat and Tomas 2006) et également démontrée chez les deux autres espèces (Daverat et al. 2006).

Mes principaux résultats montrent que chez les trois espèces d'anguilles tempérées (Fig. 12), il existe une grande diversité de patrons d'utilisation d'habitats avec des poissons résidents de leur lieu de capture et des poissons ayant effectué un ou plusieurs mouvements entre l'eau saumâtre et l'eau douce (Fig. 13). Les proportions des différentes tactiques varient entre les sites considérés et une tendance à utiliser préférentiellement les milieux saumâtres aux hautes latitudes apparaît (Fig. 14), en accord avec la théorie de Gross sur l'avantage relatif de grandir en mer ou en eau douce selon la latitude (Gross et al. 1988).

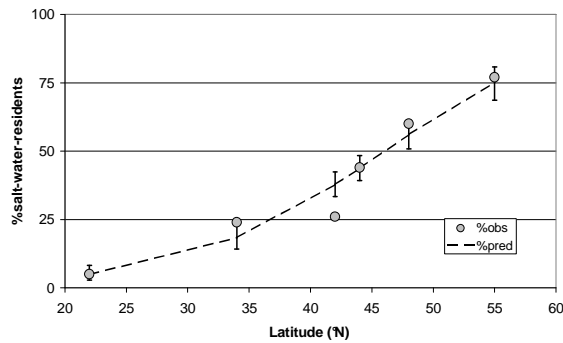


Figure 14. Proportion d'anguilles ayant utilisé les milieux saumâtres en fonction de la latitude (Daverat et al, 2006). Dans les échantillons des trois espèces (*A. anguilla*, *A. japonica* et *A. rostrata*) collectés par bassin versant. La proportion d'anguilles ayant utilisé les habitats saumâtres augmente significativement avec la latitude.

Différences de stratégies entre les espèces thalassotoques : approche comparative flet, mullet, anguille.

Dans le cadre du projet CPER Aquitaine, j'ai mené une comparaison des patrons d'utilisation de l'habitat de l'anguille avec ceux du flet et du mullet afin d'en comprendre la valeur adaptative dans un même environnement, (Fig. 15 et Fig. 16) dans le bassin de la Gironde (Daverat et al 2011). Les mêmes méthodes d'investigation des patrons d'utilisation d'habitat ont été utilisées, et une validation expérimentale a vérifié que le mullet et le flet incorporent Sr/Ca et Ba/Ca en rapport avec les taux de l'eau.

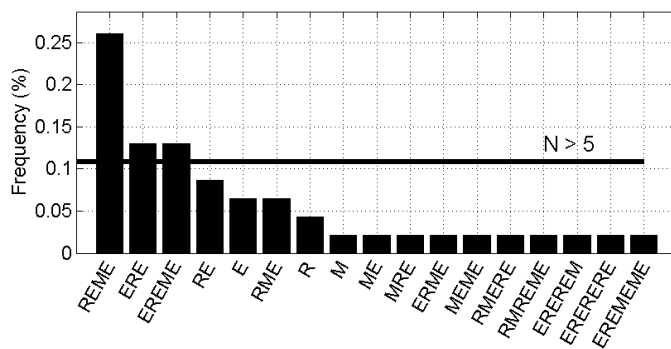


Figure 15. Diversité des patrons d'utilisation de l'habitat des flets dans le bassin versant de la Gironde. E représente l'estuaire, R les habitats d'eau douce et M l'estuaire marin et la zone côtière. L'histoire la plus fréquente REME montre que la plupart des flets utilisent les habitats d'eau douce à un jeune âge puis l'estuaire saumâtre ensuite.

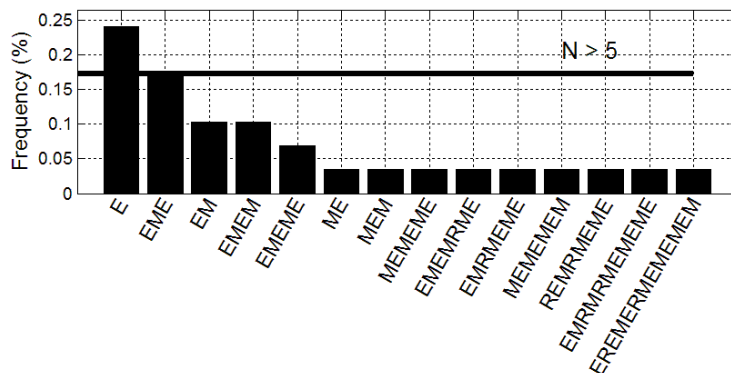
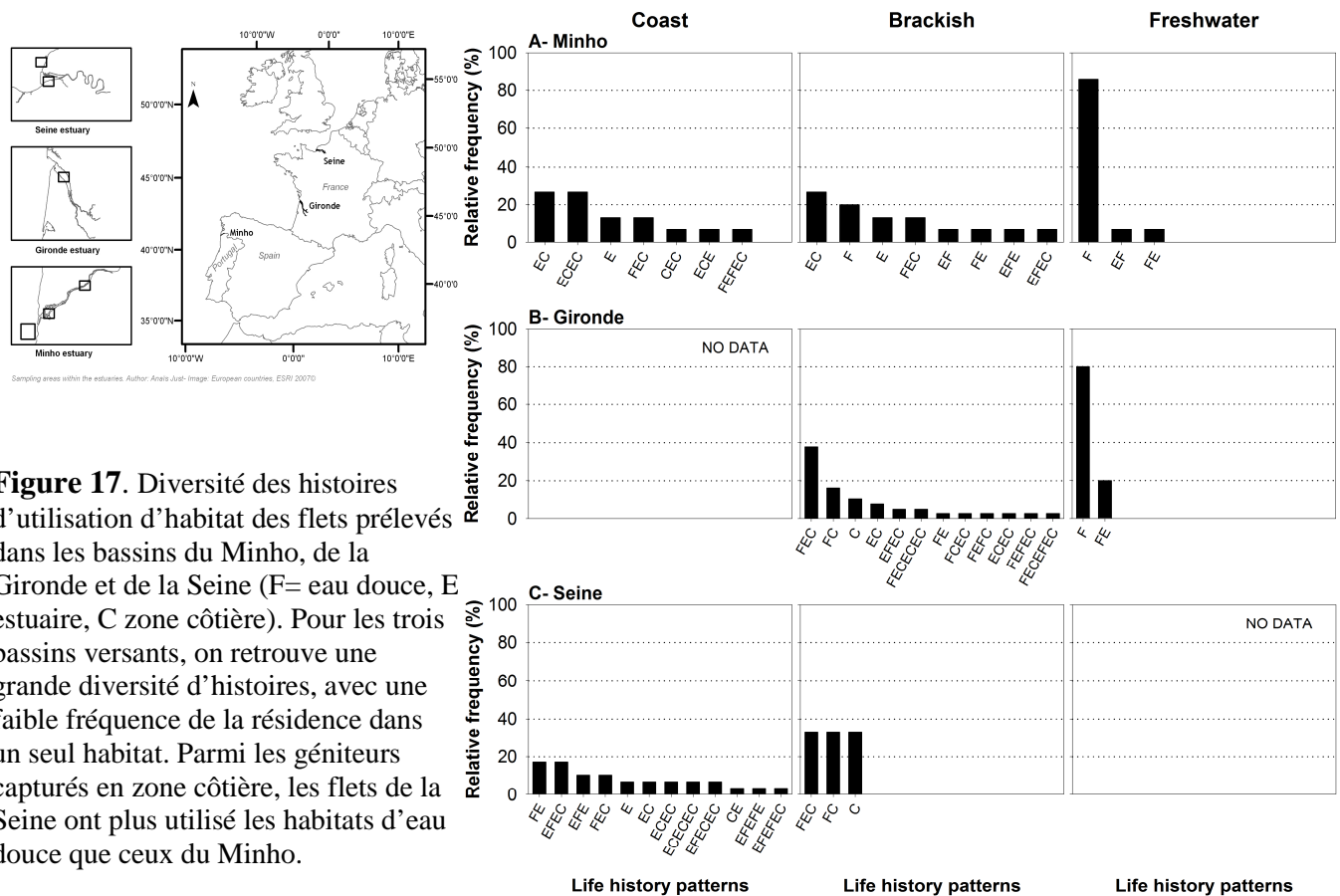


Figure 16. Patrons d'utilisation de l'habitat des mullets dans le bassin versant de la Gironde, montrant que les histoires les plus fréquentes sont une résidence en estuaire ou de fréquents mouvements entre l'eau douce, l'estuaire et la côte, avec des individus très mobiles.

Mes résultats montrent que la tactique d'utilisation d'habitat la plus fréquente chez le flet est la résidence en eau douce au stade juvénile suivie par une résidence en estuaire saumâtre (Fig. 15). La résidence dans un seul habitat est une tactique rare chez le flet ce qui confirme son caractère thalassotoque (Daverat et al 2011). La comparaison des histoires migratoires des flets le long d'un gradient latitudinal (Fig. 17) montre une diversité d'utilisation d'habitat avec toutefois une grande fréquence du caractère thalassotoque (Daverat et al 2012). Les mulets (Fig. 16), utilisent en majorité les habitats d'estuaire saumâtre et font des changements d'habitat très fréquents au cours de leur vie (Daverat et al 2011), utilisant l'eau douce à n'importe quel stade de vie.



Diversité de l'utilisation des habitats au stade juvénile : comparaison de l'utilisation du transport tidal sélectif chez l'anguille, le flet et le mullet (Trancart et al. 2012)

Le co-encadrement de la thèse de Thomas Trancart m'a permis de travailler sur les mécanismes de colonisation des habitats estuariens et fluviaux par les juvéniles de l'année d'anguilles, de flets et de mulets. La colonisation des habitats continentaux à un très jeune stade impose des tactiques adaptées pour remonter le courant dominant vers l'amont. L'anguille et le flet peuvent synchroniser leur activité avec le cycle de marée et utiliser la marée montante pour aller vers l'amont, c'est le transport tidal sélectif (Creutzberg 1958; Jager 1999). Pour comprendre les différences de tactiques d'utilisation d'habitat des thalassotoques au stade juvénile de moins d'un an, et en particulier le transport tidal sélectif,

une expérimentation a été menée pour reproduire des conditions de changement de courant mimant le cycle des marées (Fig. 18). Des lots de juvéniles des trois espèces ont été soumis aux mêmes conditions pour décrire comparativement leur comportement vis-à-vis du courant dans une structure expérimentale annulaire (Fig. 18). Les rythmes d'activité de nage avec le courant des juvéniles (Fig. 19) ont été analysés séparément pour les trois espèces à l'aide de spectres MESA (Dowse and Ringo 1989).

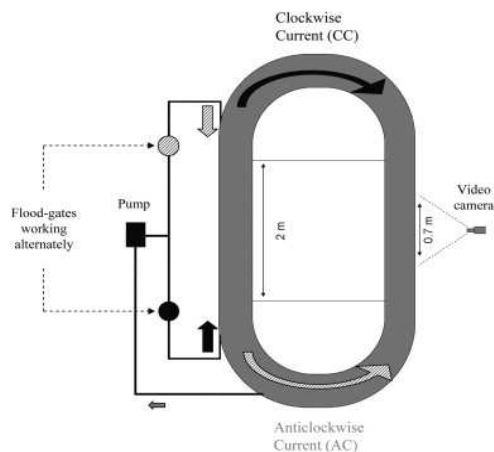


Figure 18. Vue aérienne schématique d'une structure annulaire permettant d'observer le comportement de nage ou de repos des poissons juvéniles de moins d'un an.

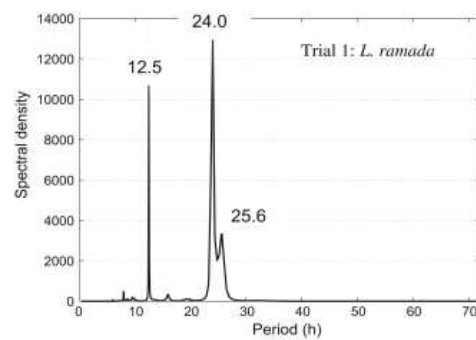


Figure 19. Exemple de résultat expérimental pour le mullet (*L. ramada*), présentant le rythme d'activité des mullets de l'année avec un spectre MESA. Ici deux pics de période apparaissent, un à 12,5h ce qui correspond à un courant donné (mimant la marée haute) et 24h ce qui correspond à un rythme d'activité journalier (ici la période de jour).

Les résultats montrent que les trois espèces utilisent le transport tidal sélectif mais avec des tactiques différentes. Le mullet et le flet adoptent un comportement diurne alors que l'anguille adopte une activité nocturne. Le mullet et dans une moindre mesure l'anguille forment des bancs lorsqu'ils sont actifs alors que le flet migre de façon solitaire. Ces résultats confirment que ces trois espèces ont la capacité de coloniser des habitats d'eau douce au stade juvénile et donc qu'ils ont un caractère thalassotoque. Les variations interindividuelles de comportement, expliquent que selon l'efficacité du transport tidal sélectif, une variabilité de tactiques d'utilisation d'habitat existe, avec des individus qui migrent plus ou moins efficacement vers l'amont et vers les habitats d'eau douce.

V. Influence de l'environnement sur la croissance, à différentes échelles.

La variabilité de la vitesse de croissance est observée que ce soit à l'échelle de la population ou bien à l'échelle individuelle (Pujolar et al. 2005). L'influence positive de la température sur la croissance de l'anguille (Sadler 1979) a été démontrée, corroborée par l'observation d'un effet de la latitude (Vøllestad 1992). J'ai abordé l'influence de l'environnement sur la variabilité de la croissance à plusieurs échelles, de la population à l'individu.

Effet de la température et de l'habitat sur le taux de croissance de l'anguille à l'échelle de son aire de répartition.

La participation et l'organisation de plusieurs groupes de travail thématiques européens ICES/IFAC m'ont donné l'opportunité de mener une recherche collaborative sur les facteurs de l'environnement qui influent sur la vitesse de croissance de l'anguille à l'échelle de son aire de croissance continentale sur une longue période. Des données de taille à l'âge des anguilles, obtenues par lecture des stries de croissance sur les otolithes, issues de la littérature scientifique ou d'études ont été rassemblées dans une base de données (Fig. 21), menant à la collecte de 45 759 données de tailles à l'âge, couvrant une zone de Latitude. 36S–61N et de Longitude 10W–27E (Fig. 21).

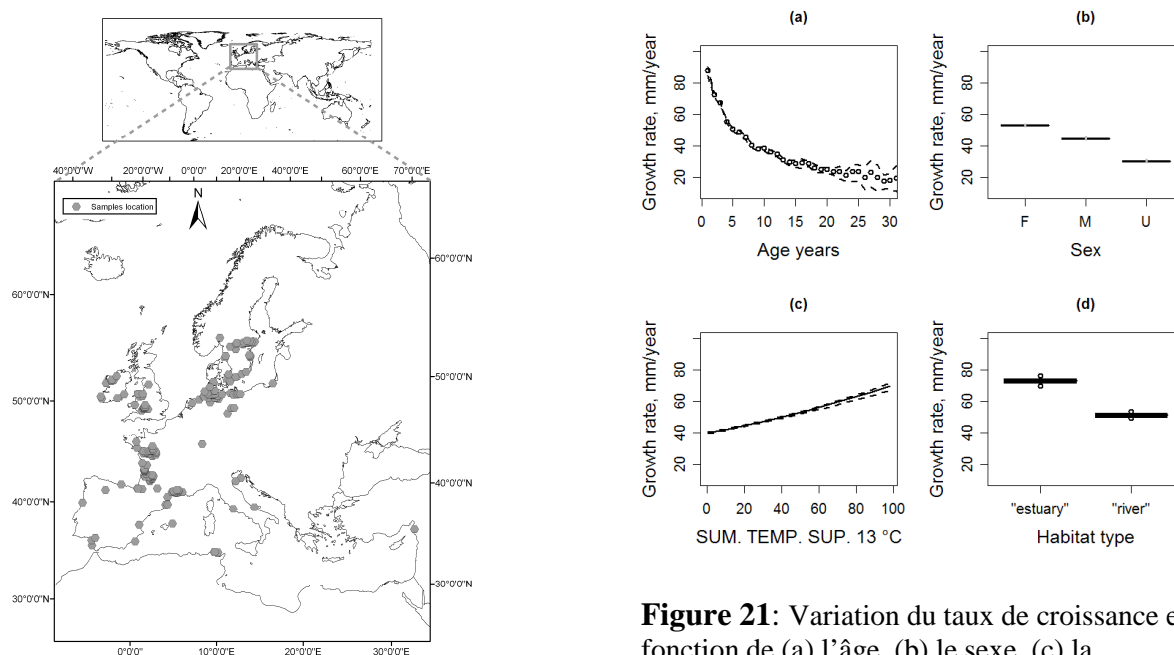


Figure 20. Localisation des données de taille à l'âge collectées pour l'étude.

En utilisant les dates et les localisations de capture (Fig.20), les chroniques de température subies individuellement par les anguilles ont été reconstituées à partir d'une base de données de température (Mitchell and Jones 2005). Le taux de croissance des anguilles a ainsi été modélisé en fonction de la température efficace de croissance, de l'habitat, de l'âge et du sexe (Fig.21). Ce travail (Daverat et al 2012) confirme que le taux de croissance de l'anguille dépend fortement de la température (Fig.21), et que le réchauffement climatique a un impact positif sur le taux de croissance. En outre, le taux de croissance est plus grand dans les habitats près de la mer (baies, lagunes, estuaires, fleuve tidal) que dans les habitats d'eau douce en amont de bassin versant.

Croissance à l'échelle de l'individu : effet de la température et de l'habitat sur la dynamique individuelle de croissance de l'anguille.

Dans le cadre de l'accueil post doctoral de Kazuki Yokouchi, je me suis intéressée aux dynamiques individuelles de la croissance des anguilles dans le bassin versant de la Gironde, avec pour objectif de comprendre comment à une échelle locale et annuelle, la température et l'habitat influent sur la croissance. L'impact d'un évènement climatique exceptionnel (la canicule de 2003) sur la croissance, a été évalué.

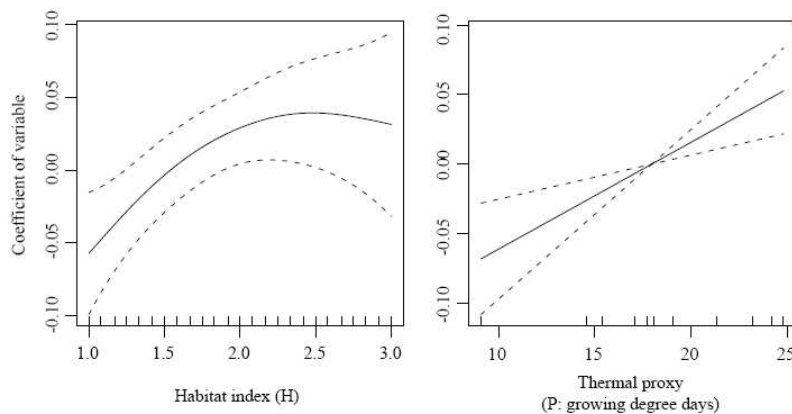


Figure 22 : effet de l'habitat (1= eau douce ; 2= estuaire amont et 3= estuaire aval) sur l'accroissement en taille annuel et effet de la température efficace de croissance sur l'accroissement annuel en taille.

Le jeu de données est issu d'un échantillonnage d'anguille dans le bassin versant de la Gironde. Les chroniques d'utilisation d'habitat acquises par microchimie, et les chroniques d'accroissement en taille obtenues par rétro calcul de la taille à l'âge ont permis d'obtenir un accroissement en taille pour chaque individu pour une année donnée et dans un habitat donné. L'accroissement en taille de chaque individu pour chaque année, a été modélisé en fonction de l'habitat utilisé et de la température efficace de croissance en utilisant un modèle mixte (Weisberg et al. 2010). En adéquation avec ce qui est observé au niveau de la population, les résultats montrent que la croissance individuelle est plus rapide dans les habitats saumâtres (Fig. 22) et que la température a un effet positif sur la croissance (Fig. 22). Comparativement aux autres années étudiées, le facteur température efficace de croissance a une valeur médiane en 2003, montrant que la vague de chaleur a eu un effet négatif sur la croissance mais que les températures du reste de l'année ont été assez favorables pour permettre un rattrapage de croissance et en définitive une pleine saison de croissance pour les anguilles. Ce travail permet en outre de relever les effets négatifs indirects liés à la canicule, tels que les baisses de débit dues au pompage de l'eau pour l'agriculture.

Effet de l'environnement sur la croissance et potentiel individuel de croissance : vers une dé-convolution des effets.

Les travaux précédents (Daverat et al 2012, Yokouchi et al soumis, Daverat et Tomas 2006) montrent que d'une manière générale et aussi pour le bassin de la Gironde, la croissance des anguilles est plus rapide en eau saumâtre (estuaire, lagune) qu'en eau douce. Or, le fait que les anguilles qui aient passé d'abord quelques années en fleuve puis estuaire (nomade vers l'aval) aient le même taux de croissance que les anguilles résidant en estuaire toute leur phase de croissance apparaît comme un paradoxe. J'ai étudié comparativement la dynamique de croissance de ces nomades vers l'aval, en estimant la taille à l'âge de toutes les tactiques d'utilisation d'habitat (nomade vers l'aval, résident en eau douce et résident en estuaire) par rétro-calcul (Fig. 23). Les résultats montrent que les nomades ont une taille plus grande au même âge que les résidents eau douce et en estuaire pendant leurs trois premières années de

croissance, période la plus fréquente de changement d'habitat (Fig. 23). Ce résultat implique que les nomades ont au début de leur vie un potentiel de croissance plus grand que les poissons qui ont une tactique de résidence dans le même milieu de croissance, suggérant des différences génétiques de potentiel de croissance (Pujolar et al. 2005).

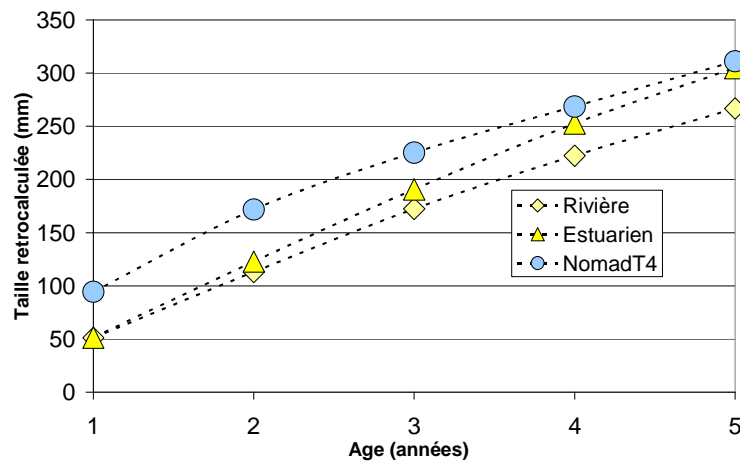


Figure 23. Taille moyenne à l'âge pour les anguilles résidentes en eau douce (Rivière), les anguilles résidentes en eau saumâtre (Estuarien) et les anguilles ayant d'abord résidé en eau douce puis en eau saumâtre. L'âge moyen de changement d'habitat est de trois ans. Le graphe montre que les anguilles ayant changé d'habitat ont un avantage en taille significatif sur les anguilles résidentes jusqu'à trois ans.

Ces différences de potentiel de croissance ont été abordées plus indirectement dans une étude en collaboration avec l'Université de Tokyo, comparant les tactiques d'utilisation d'habitat chez l'anguille japonaise (Yokouchi et al. 2012b). En s'appuyant sur le fait que généralement les civelles qui arrivent tôt (automne) ont une meilleure condition corporelle que celles qui arrivent tard dans la saison (printemps), comme observé par (Elie and Rochard 1994), les saisons d'arrivée des anguilles de différentes tactiques ont été comparées (Fig. 24). Mes résultats suggèrent que la saison de recrutement des civelles a un lien avec la tactique adoptée.

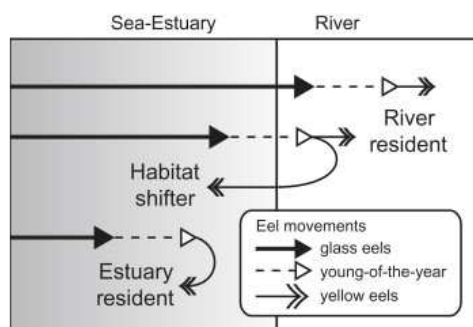


Figure 24. Schéma conceptuel des choix d'habitat des anguilles japonaises en fonction de leur saison d'arrivée. Les anguilles arrivant tôt dans la saison se sédentarisent en eau douce, ou bien changent de l'eau douce vers l'eau saumâtre et les anguilles arrivant tard dans la saison se sédentarisent en eau saumâtre.

Les anguilles qui arrivent tard dans la saison ont tendance à se sédentariser en estuaire ce qui est corroboré par d'autres études expérimentales (Edeline et al. 2006). Les anguilles arrivant tôt se sédentarisent en rivière ou bien ont une tactique de changement d'habitat (Fig. 24). Ce dernier résultat apparaît de prime abord en contradiction avec le fait que les anguilles avec la meilleure condition adoptent une tactique de changement d'habitat et soulève de nouvelles questions sur l'avantage évolutif à grandir en eau douce pour l'anguille.

Perspectives de recherche.

En perspective des travaux réalisés, j'envisage de développer deux axes de recherche:

- ❖ Une poursuite de l'étude de la relation entre la composition de l'otolithe et la composition de l'eau pour tracer les mouvements et les origines des poissons, en utilisant une approche expérimentale.
- ❖ L'étude de la valeur adaptative de la plasticité phénotypique face au changement global, en poursuivant l'approche descriptive (tactiques migratoires, croissance) et en la complétant par une approche plus fonctionnelle en intégrant de la génétique et de la physiologie.

Les thématiques que je souhaite aborder au cours des années à venir s'inscrivent dans des projets qui sont déjà financés (CPER anguille, thèse FRAG-Anguille, financement HYNES) ou bien en cours de construction (projet ANR blanche Otolithe artificiel) ou soumis à des appels d'offre européens (Projet people FP7 FISH-PLAST).

Je souhaite en premier lieu poursuivre les développements méthodologiques utilisant l'otolithe comme outil d'investigation à posteriori des parcours migratoires et des dynamiques de croissance individuels. Les priorités vont vers la mise au point de référentiels géographiques afin de mieux interpréter la relation entre composition de l'otolithe et les habitats occupés. Il s'agit d'abord de traiter les résultats acquis dans le projet gestion de l'anguille (Contrat de Plan Etat Région Aquitaine), qui a pour objectif d'obtenir une méthode de discrimination des habitats d'eau douce par l'otolithe de l'anguille dans les bassins de la Garonne et de la Dordogne. Ce projet utilise des traceurs composites, à la fois des traceurs multi-élémentaires et des traceurs isotopiques pour discriminer quatre rivières différentes (Kennedy et al. 2002; Semhi et al. 2000). L'application de cette méthode permettra d'analyser les dynamiques individuelles de colonisation des habitats d'eau douce par les anguilles qui sont encore méconnues (Edeline 2005; Imbert et al. 2010).

Dans un projet en cours de construction, j'envisage de séparer pour mieux les comprendre, les composantes physiologiques des composantes physico-chimiques de l'incorporation des éléments traces dans l'otolithe. Le projet s'appuie en partie sur un otolithe artificiel, soit un dispositif électrochimique précipitant in situ de l'aragonite (Krauss et al. 2008). L'utilisation de dispositifs expérimentaux, permettra en conditions d'élevage contrôlées en température et composition de l'eau, de comparer l'incorporation de traceurs dans de l'aragonite précipitée par un processus physique avec l'incorporation physiologiquement régulée dans un otolithe de poisson (Gaetani and Cohen 2006). Des techniques innovantes d'échantillonnage de protéines de l'otolithe, permettront de caractériser la nature et la quantité des protéines impliquées dans différentes conditions d'élevage (Tohse et al. 2009).

Enfin, l'otolithe artificiel sera utilisé sur le terrain pour cartographier la diversité des signatures chimiques potentiellement observable dans un bassin versant. Des applications à des cas concrets de mouvements de poissons migrateurs amphihalins seront menées. Une application consistera à utiliser l'otolithe artificiel pour caractériser la signature des frayères d'Aloses (*Alosa alosa* et *Alosa fallax*). Les signatures des frayères permettront d'identifier les origines de naissance des adultes. Dans le cas spécifique de la grande alose, l'accès à la signature chimique de la frayère est complexe puisque les juvéniles sont très difficiles à échantillonner. Pallier cette difficulté technique en utilisant la signature d'un otolithe artificiel donnerait accès à la signature chimique des principales frayères d'alose. L'objectif ultime est d'identifier l'origine de naissance des géniteurs d'alose qui eux sont plus facilement échantillonnés.

En second lieu, je souhaite orienter mes recherches vers une approche fonctionnelle de la plasticité phénotypique.

A cette fin, je me suis impliquée dans deux projets de recherche qui prévoient de relier les tactiques alternatives d'utilisation d'habitat à des caractéristiques physiologiques et génétiques. Il s'agit de comprendre la part génétique de cette plasticité et donc de définir les limites de l'adaptabilité chez deux espèces, l'anguille et le flet. La mesure de l'expression de gènes impliqués dans la résilience au stress et les performances métaboliques générales (capacité de nage, fonctionnement des muscles) entre les poissons exprimant des comportements différents pourraient apporter des réponses sur l'adoption des différentes tactiques d'utilisation d'habitat (Garenc et al. 1999). Le premier projet est une thèse visant à comprendre la pression de sélection exercée par les obstacles sur la population de l'anguille. La capacité et le choix de franchir des obstacles agissent comme des filtres sélectifs de performances de nage et de comportement exploratoire. Quand elles se retrouvent dans des zones de forte densité de con-spécifiques et de prédateurs, les anguilles qui ne franchissent pas les obstacles, doivent, pour survivre développer une résistance au stress. La perspective est de relier le comportement de franchissement ou non franchissement d'obstacles à la différence d'expression de gènes reliés au stress chronique et d'en étudier les régulations épigénétiques (Picard and Schulte 2004).

Le deuxième projet s'intéresse aux facteurs explicatifs de la diversité des histoires de vie du flet et en particulier à expliquer les choix d'habitat de reproduction chez le flet (habitats côtiers ou d'eau douce). Une approche à large échelle, sur un gradient latitudinal du Sud du Portugal à la mer Baltique est prévue. La génétique des populations a mis en évidence des différences, dans la mer Baltique entre les flets de stratégie de reproduction différentes (Nissling and Dahlman 2010). Cette approche serait poursuivie à plus grande échelle. Par ailleurs, il s'agit de regarder quel est le lien entre les capacités d'osmorégulation, les patrons d'utilisation de l'habitat chez le flet (Wilson et al. 2002).

Enfin, je prévois d'utiliser les outils de microchimie mis au point dans mon premier objectif afin d'apporter des éléments d'observations de terrain aux modèles virtuels de dispersion d'espèce sous influence du changement climatique développés par ailleurs dans mon équipe. Je prévois de prendre comme modèle l'alose vraie *Alosa alosa*. Chez cette espèce, une grande part des géniteurs vient se reproduire sur son lieu de naissance (philopatrie) mais une part de la population va se reproduire ailleurs (errance). Je souhaite étudier la proportion d'individus errants sur un gradient latitudinal et estimer les distances parcourues par les individus errants de cette espèce afin de comprendre sa capacité de dispersion et la valeur adaptative des traits de philopatrie et d'errance.

Mes activités de recherche sont ancrées dans une équipe de recherche dite finalisée et dans ce sens, mes projets interagissent avec la biologie de la conservation. Les préoccupations de la biologie de la conservation me renvoient à une question centrale de l'étude de l'impact du changement global : les espèces vont-elles migrer vers de nouveaux environnements favorables ou vont-elles s'adapter *in situ* ? En conséquence, sur le long terme, ma question est de savoir si mes espèces modèles vont migrer, m'obligeant à changer de modèles pour étudier des espèces tropicales venant du sud ou bien si mes espèces modèles actuelles vont s'adapter à de nouvelles conditions environnementales. Je peux même envisager un mélange des deux situations.

Mes objectifs sont donc sur le long terme de comprendre l'interaction entre l'environnement et la plasticité phénotypique. Je souhaite continuer à observer cette plasticité phénotypique dans des environnements contrastés et d'autre part, expliquer cette plasticité phénotypique par les processus de sélection génétiques ou épigénétiques exercés par l'environnement.

Références bibliographiques.

- Als, T.D., Hansen, M.M., GE, M., M, C., L, R., K, A., P, M., H, S., R, H. & Bernatchez, L. 2011. All roads lead to home: panmixia of European eel in the Sargasso Sea. *Molecular Ecology* 20: 1333-1346.
- Arai, T., Kotake, A., Ohji, M., Miller, M.J., Tsukamoto, K. & Miyazaki, N. 2003. Occurrence of sea eels of *Anguilla japonica* along the Sanriku Coast of Japan. *Ichthyological Research* 50: 78-81.
- Aubin Horth, N. & Dodson, J.J. 2004. Influence of individual body size and variable threshold on the incidence of sneaker male reproductive tactic in atlantic salmon. *Evolution* 58: 136-144.
- Barot, S., Heino, M., O'Brien, L. & Dieckmann, U. 2004. Long-term trend in the maturation reaction norm of two cod stocks. *Ecological Applications* 14: 1257-1271.
- Bath, G.E., Thorrold, S.R., Jones, C.M., Campana, S.E., McLaren, J.W. & Lam, J.W.H. 2000. Strontium and barium uptake in aragonitic otoliths of marine fish. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64: 1705-1714.
- Bergmann, C. 1847. About the relationships between heat conservation and body size of animals. *Goett Stud* 1: 595-708.
- Berrebi, P., Vianet, R., Agnès, J.-F., Quignard, J.-P. & Pasteur, N. 1985. Variabilité génétique et morphologique de quelques populations de flets: *Platichthys flesus flesus* des côtes méditerranéennes et atlantiques françaises. *Biochemical Systematics and Ecology* 13: 55-61.
- Burton, O.J., Phillips, B.L. & Travis, J.M.J. 2010. Trade-offs and the evolution of life-histories during range expansion. *Ecology Letters* 13: 1210-1220.
- Campana, S.E. 1999. Chemistry and composition of fish otoliths: Pathways, mechanisms and applications. *Marine Ecology Progress Series* 188: 263-297.
- Chang, C.W., Lin, S.H., Lizuka, Y. & Tzeng, W.N. 2004. Relationship between Sr: Ca Ratios in otoliths of Grey Mullet *Mugil cephalus* and ambient salinity: Validation, mechanisms, and applications. *Zoological Studies* 43: 74-85.
- Creutzberg, F. 1958. Use of tidal streams by migrating elvers (*Anguilla vulgaris* Turt.). *Nature* 181: 857-858.
- Daufresne, M., Lengfellner, K. & Sommer, U. 2009. Global warming benefits the small in aquatic ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106: 12788-12793.
- Daverat, F., Beaulaton, L., Poole, R., Lambert, P., Wickstrom, H., Andersson, J., Aprahamian, M.W., Hizem, B., Elie, P., Yalçın-özdilek, S. & Gumus, A. 2012a. One century of eel growth: changes and implications. *Ecology Freshwater Fish* 21: 325-336.
- Daverat, F., Lanceleur, L., C., P., Eon, M., Dublon, J., Schäfer, J., Baudrimont, M. & Renault, S. accepted Accumulation of Mn, Co, Zn, Rb, Cd, Sn, Ba, Sr, Pb in the otoliths and tissues of eel (*Anguilla anguilla*) following long-term exposure in an estuarine environment. *Science of the Total Environment*.
- Daverat, F., Lanceleur, L., C., P., Eon, M., Dublon, J., Schäfer, J., Baudrimont, M. & Renault, S. sous presse Accumulation of Mn, Co, Zn, Rb, Cd, Sn, Ba, Sr, Pb in the otoliths and tissues of eel (*Anguilla anguilla*) following long-term exposure in an estuarine environment. *Science of the Total Environment*.
- Daverat, F., Limburg, K.E., Thibaut, I., Shiao, J.C., Dodson, J.J., Caron, F., Tzeng, W.-N., Lizuka, Y. & Wickström, H. 2006. Phenotypic plasticity of habitat use by three temperate eel species *Anguilla anguilla*, *A. japonica* and *A. rostrata*. *Marine Ecology Progress Series* 308: 231-241.

- Daverat, F., Martin, J., Fablet, R. & Pecheyran, C. 2011. Colonisation tactics of three temperate catadromous species, eel *Anguilla anguilla*, mullet *Liza ramada* and flounder *Plathychtys flesus*, revealed by Bayesian multielemental otolith microchemistry approach. *Ecology of Freshwater Fish* 20: 42-51.
- Daverat, F., Morais, P., Dias, E., Martin, J., Babaluk, J., Fablet, R., Pecheyran, C. & Antunes, C. 2012b. Plasticity of European flounder life history patterns discloses alternatives to catadromy. *Marine Ecology Progress Series*.
- Daverat, F. & Tomas, J. 2006. Tactics and demographic attributes of the European eel (*Anguilla anguilla*): the case study of the Gironde watershed (Southwest France). *Marine Ecology Progress Series* 307: 247-257.
- Daverat, F., Tomas, J., Lahaye, M. & Elie, P. Year. *Ecological plasticity in eels : tactics of habitat use in the Gironde estuary*. Proceedings of the Fish and diadromy in Europe.
- Daverat, F., Tomas, J., Lahaye, M., Palmer, M. & Elie, P. 2005b. Tracking continental habitat shifts of eels using otolith Sr/Ca ratios: validation and application to the coastal, estuarine and riverine eels of the Gironde-Garonne-Dordogne watershed. *Marine and Freshwater Research* 56: 619–627.
- De Pontual, H., Lagardere, F., Amara, R., Bohn, M. & Ogor, A. 2003. Influence of ontogenetic and environmental changes in the otolith microchemistry of sole (*Solea solea*). *Journal of Sea Research* 50: 199-211.
- Dowse, H.B. & Ringo, J.M. 1989. The search for hidden periodicities in biological time series revisited. *Journal of Theoretical Biology* 139: 487-515.
- Edeline, E. 2005. *Facteurs contrôlant la dispersion continentale de l'anguille européenne Anguilla anguilla* Ph D Thesis. Toulouse: Cemagref/Université Paul Sabatier, Toulouse III.
- Edeline, E., Lambert, P., Rigaud, C. & Elie, P. 2006. Effects of body condition and water temperature on *Anguilla anguilla* glass eel migratory behavior. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 331: 217-225.
- Elie, P. & Rochard, E. 1994. Migration des civelles d'anguilles (*Anguilla anguilla* L.) dans les estuaires, modalité du phénomène et caractéristiques des individus. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture* 335: 81-98.
- Elsdon, T.S. & Gillanders, B.M. 2005. Alternative life-history patterns of estuarine fish: barium in otoliths elucidates freshwater residency. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 62: 1143-1152.
- Elsdon, T.S., Wells, B.K., Campana, S., Gillanders, B.M., Jones, C.M., Limburg, K.E., Secor, D.H., Thorrold, S.R. & Walther, B. 2008. Otolith chemistry to describe movements and life history parameters of fishes: hypotheses, assumptions, limitations and inferences. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review* 46: 297-330.
- Fablet, R., Daverat, F. & Pontual, H.D. 2007. Unsupervised Bayesian reconstruction of individual life histories from otolith signatures: case study of Sr:Ca transects of European eel (*Anguilla anguilla*) otoliths. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 64: 152-165.
- Francis, R.I.C.C. 1990. Back-calculation of fish length : a critical review. *Journal of Fish Biology* 36: 883-902.
- Gaetani, G.A. & Cohen, A.L. 2006. Element partitioning during precipitation of aragonite from seawater: A framework for understanding paleoproxies. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70: 4617-4634.
- Garenc, C., Couture, P., Laflamme, M.A. & Guderley, H. 1999. Metabolic correlates of burst swimming capacity of juvenile and adult threespine stickleback (*Gasterosteus aculeatus*). *Journal of Comparative Physiology B: Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology* 169: 113-122.
- Gillanders, B.M. & Kingsford, M.J. 2000. Elemental fingerprints of otoliths of fish may distinguish estuarine 'nursery' habitats. *Marine Ecology Progress Series* 201: 273-286.

- Grift, R.E., Rijnsdorp, A.D., Barot, S., Heino, M. & Dieckmann, U. 2003. Fisheries-induced trends in reaction norms for maturation in North Sea plaice. *Marine Ecology Progress Series* 257: 247-257.
- Gross, M.R. 1985. Disruptive selection for alternative life histories in salmon. *Nature* 313: 47-48.
- Gross, M.R., Coleman, R.M. & McDowall, R.M. 1988. Aquatic productivity and the evolution of Diadromous Fish migration. *Science* 239: 1291-1293.
- Imbert, H., Labonne, J., Rigaud, C. & Lambert, P. 2010. Resident and migratory tactics in freshwater European eels are size-dependent. *Freshwater Biology* 55: 1483-1493.
- Jager, Z. 1999. Selective Tidal Stream Transport of Flounder Larvae (*Platichthys flesus*L.) in the Dollard (Ems Estuary). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 49: 347-362.
- Jonsson, B. & Jonsson, N. 1993. Partial migration : niche shift versus sexual maturation in fishes. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 3: 348-365.
- Kennedy, B.P., Klaue, A., Blum, J.D., Folt, C.L. & Nislow, K.H. 2002. Reconstructing the lives of fish using Sr isotopes in otoliths. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 59: 925-929.
- Kerr, L.A., Secor, D.H. & Piccoli, P.M. 2009. Partial Migration of Fishes as Exemplified by the Estuarine-Dependent White Perch. *Fisheries* 34: 114-123.
- Kraus, R.T. & Secor, D.H. 2003. Response of otolith Sr:Ca to a manipulated environment in young American eels. *American Fisheries Society Symposium* 33: 79-85.
- Krauss, C., Chateigner, D. & Gil, O. 2008. Fully Inorganic Electrodeposition of Pure Aragonite Prismatic-like Textured Layers on Titanium Foils. *Crystal Growth & Design* 8: 4378-4382.
- Lassalle, G., Crouzet, P. & Rochard, E. 2009. Modelling the current distribution of European diadromous fishes: an approach integrating regional anthropogenic pressures. *Freshwater Biology* 54: 587-606.
- Lassalle, G. & Rochard, E. 2009. Impact of 21st century climate change on diadromous fish spread over Europe, North Africa and the Middle East. *Global Change Biology* 15: 1072-1089.
- Limburg, K.E., Svedang, H., Elfman, M. & Kristiansson, P. 2003. Do stocked freshwater eels migrate ? Evidence from the Baltic suggests "yes". In: Dixon, D.A., ed. *Biology, management and protection of catadromous eels*. Bethesda: American Fisheries Society, Symposium 33, pp. 275-284.
- Maes, G.E., Raeymaekers, J.A.M., Pampoulie, C., Seynaeve, A., Goemans, G., Belpaire, C. & Volckaert, F.A.M. 2005. The catadromous European eel *Anguilla anguilla* (L.) as a model for freshwater evolutionary ecotoxicology: Relationship between heavy metal bioaccumulation, condition and genetic variability. *Aquatic Toxicology* 73: 99-114.
- Masson, G. 1987. *Biologie et ecologie d'un poisson plat amphihaline, le flet (Platichthys flesus flesus Linne) dans l'environnement ligérien : distribution, démographie, place au sein des réseaux trophiques*. PhD Thesis. Brest: Université de Brest. 344 pp.
- Massot, M., Clobert, J. & Ferrière, R. 2008. Climate warming, dispersal inhibition and extinction risk. *Global Change Biology* 14: 461-469.
- Mayhew, P.J. 2006. *Discovering Evolutionary Ecology: Bringing together Ecology and Evolution*. Oxford: Oxford University Press.
- McDowall, R.M. 1988. *Diadromy in fishes : migrations between freshwater and marine environments*. Cambridge: University Press. 308 pp.
- Milton, D.A. & Chenery, S.R. 2003. Movement patterns of the tropical shad hilsa (*Tenualosa ilisha*) inferred from transects of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratios in their otoliths. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 60: 1376-1385.

- Mitchell, T.D. & Jones, P.D. 2005. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology* 25: 693-712.
- Moller, A.P., Flensted-Jensen, E. & Mardal, W. 2006. Dispersal and climate change: a case study of the Arctic tern *Sterna paradisaea*. *Global Change Biology* 12: 2005-2013.
- Morris, J.A., Rulifson, R.A., Babaluk, J.A., May, P.G. & Campbell, J.L. 2005. Use of micro-PIXE to investigate otolith Sr distributions of the anadromous striped bass, *Morone saxatilis*. *X-Ray Spectrometry* 34: 301-305.
- Morrison, W.E., Secor, D.H. & Piccoli, P.M. 2003. Estuarine habitat use by Hudson river American eels as determined by otolith Strontium:Calcium ratios. In: Dixon, D.A., ed. *Biology, management and protection of catadromous eels*. Bethesda: American Fisheries Society, Symposium 33, pp. 87-100.
- Nissling, A. & Dahlman, G. 2010. Fecundity of flounder, *Pleuronectes flesus*, in the Baltic Sea — Reproductive strategies in two sympatric populations. *Journal of Sea Research* 64: 190-198.
- O'Connor, M.I., Selig, E.R., Pinsky, M.L. & Altermatt, F. 2012. Toward a conceptual synthesis for climate change responses. *Global Ecology and Biogeography* 21: 693-703.
- Otake, T., Ishii, T., Nakahara, M. & Nakamura, R. 1994. Drastic changes in otolith strontium/calcium ratios in leptocephali and glass eels of Japanese eel *Anguilla japonica*. *Marine Ecology Progress Series* 112: 189-194.
- Panfili, J., Pontual, H.d., Troadec, H. & Wright, P.J. 2002. *Manual of fish sclerochronology*. Ifremer, IRD. 464 pp.
- Pannella, G. 1980. Growth pattern in fish sagittae. In: Rhoads, D.C.L., R. A., ed. *Skeletal growth of aquatic organisms. Biological records of environmental change*. New York, USA and London, UK: Plenum Press, pp. 519-560.
- Picard, D.J. & Schulte, P.M. 2004. Variation in gene expression in response to stress in two populations of *Fundulus heteroclitus*. *Comparative Biochemistry and Physiology - Part A: Molecular & Integrative Physiology* 137: 205-216.
- Pigliucci, M. 2001. *Phenotypic Plasticity: Beyond Nature and Nurture*. Baltimore: Johns Hopkins Univ. Press.
- Pujolar, J.M., Maes, G.E., Vancoillie, C. & Volckaert, F.A.M. 2005. Growth rate correlates to individual heterozygosity in the european eel, *Anguilla anguilla* L. *Evolution* 59: 189-199.
- Rabiner, L.R. 1989. Tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition. *Proceedings of the IEEE* 77: 257-286.
- Roff, D.A. 1984. The Evolution of Life History Parameters in Teleosts. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 41: 989-1000.
- Roff, D.A. 1992. *The evolution of life histories. Theory and analysis*. New York: Chapman & Hall.
- Sadler, K. 1979. Effects of temperature on the growth and survival of the European eel, *Anguilla anguilla* L. *Journal of Fish Biology* 15: 499-507.
- Semhi, K., Clauer, N. & Probst, J.L. 2000. Strontium isotope compositions of river waters as records of lithology-dependent mass transfers: the Garonne river and its tributaries (SW France). *Chemical Geology* 168: 173.
- Stearns, S.C. 1992. *The evolution of life histories*. New York: Oxford University Press.
- Stearns, S.C. & Koella, J.C. 1986. The Evolution of Phenotypic Plasticity in Life-History Traits: Predictions of Reaction Norms for Age and Size at Maturity. *Evolution* 40: 893-913.
- Tabouret, H., Bareille, G., Claverie, F., Pécheyran, C., Prouzet, P. & Donard, O.F.X. 2010. Simultaneous use of strontium:calcium and barium:calcium ratios in otoliths as markers of habitat: Application to the European eel (*Anguilla anguilla*) in the Adour basin, South West France. *Marine Environmental Research* 70: 35-45.

- Tesch, F.W. 1979. *The Eel: Biology and management of anguillid eels*. London: Chapman and Hall. 434 pp.
- Thieriault, V. & Dodson, J.J. 2003. Body size and the adoption of a migratory tactic in brook char. *Journal of Fish Biology* 63: 1144-1159.
- Tohse, H., Saruwatari, K., Kogure, T., Nagasawa, H. & Takagi, Y. 2009. Control of Polymorphism and Morphology of Calcium Carbonate Crystals by a Matrix Protein Aggregate in Fish Otoliths. *Crystal Growth & Design* 9: 4897-4901.
- Trancart, T., Lambert, P., Rochard, E., Daverat, F., Coustillas, J. & Roqueplo, C. 2012. Alternative flood tide transport tactics in catadromous species: *Anguilla anguilla*, *Liza ramada* and *Platichthys flesus*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*.
- Tsukamoto, K. & Arai, T. 2001. Facultative catadromy of the eel *Anguilla japonica* between freshwater and seawater habitats. *Marine Ecology Progress Series* 220: 265-276.
- Tsukamoto, K., Nakai, I. & Tesch, W.V. 1998. Do all freshwater eels migrate? *Nature* 396: 635.
- Tzeng, W.N., Severin, K.P. & Wickstrom, H. 1997. Use of otolith microchemistry to investigate the environmental history of European eel *Anguilla anguilla*. *Marine Ecology Progress Series* 149: 73-81.
- Tzeng, W.N., Shiao, J.C. & Iizuka, Y. 2002. Use of otolith Sr:Ca ratios to study the riverine migratory behaviors of Japanese eel *Anguilla japonica*. *Marine Ecology Progress Series* 245: 213-221.
- Tzeng, W.N., Wang, C.H., Wickstrom, H. & Reizenstein, M. 2000. Occurrence of the semi-catadromous European eel *Anguilla anguilla* in the Baltic Sea. *Marine Biology* 137: 93-98.
- Vøllestad, L.A. 1992. Geographic Variation in Age and Length at Metamorphosis of Maturing European Eel: Environmental Effects and Phenotypic Plasticity. *Journal of Animal Ecology* 61: 41-48.
- Walther, B., Kingsford, M., O'Callaghan, M. & McCulloch, M. 2010. Interactive effects of ontogeny, food ration and temperature on elemental incorporation in otoliths of a coral reef fish. *Environmental Biology of Fishes* 89: 441-451.
- Weisberg, S., Spangler, G. & Richmond, L.S. 2010. Mixed effects models for fish growth. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 67: 269-277.
- Wilson, R.W., Wilson, J.M. & Grosell, M. 2002. Intestinal bicarbonate secretion by marine teleost fish—why and how? *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes* 1566: 182-193.
- Wirth, T. & Bernatchez, L. 2001. Genetic evidence against panmixia in the European eel. *Nature* 409: 1037-1040.
- Yokouchi, K., Daverat, F. & Tsukamoto, K. 2012a. Individual growth modeling in relation to temperature and migration history for the female European eel in the Gironde River system, France. *Journal of Fish Biology*.
- Yokouchi, K., Fukuda, N., Miller, M.J., Aoyama, J., Daverat, F. & Tsukamoto, K. 2012b. Influences of early habitat use on the migratory plasticity and demography of Japanese eels in central Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 107: 132e140.
- Yokouchi, K., Fukuda, N., Shirai, K., Aoyama, J., Daverat, F. & Tsukamoto, K. 2011. Time lag of the response on the otolith strontium/calcium ratios of the Japanese eel, *Anguilla japonica* to changes in strontium/calcium ratios of ambient water. *Environmental Biology of Fishes* 92: 469-478.