

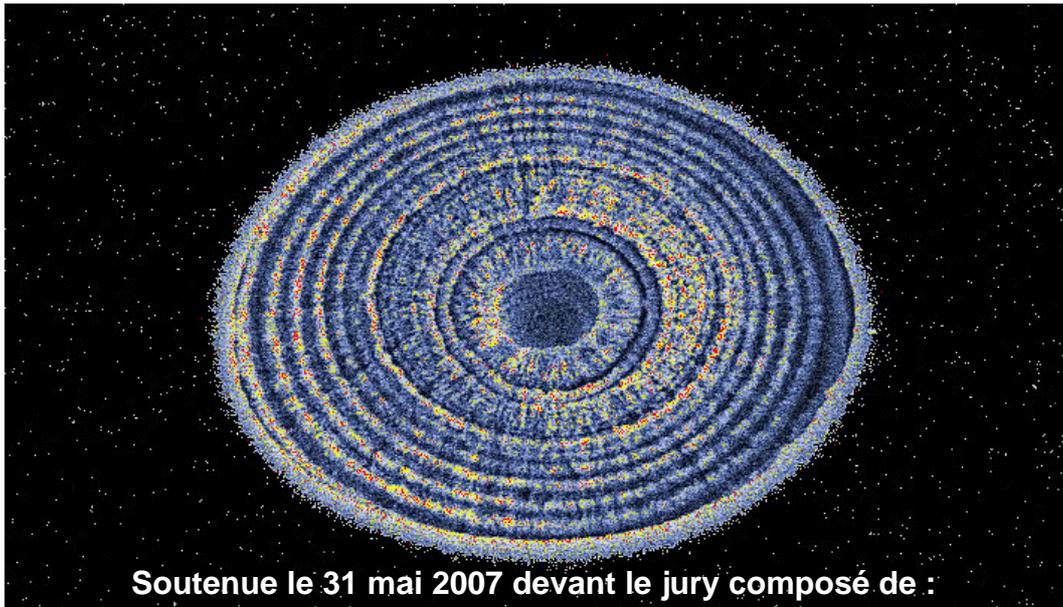
Université Montpellier 2

Ecole Doctorale
Systèmes intégrés en Biologie, Agronomie,
Géosciences, Hydrosociences, Environnement (SIBAGHE)

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

Les otolithes, intégrateurs de l'histoire individuelle des poissons

Jacques Panfili
Chargé de Recherche IRD



Soutenu le 31 mai 2007 devant le jury composé de :

Gilles Bœuf (Pr, Univ. Paris 6) : rapporteur
John M. Casselman (Pr, Queen's Univ., Canada) : rapporteur
Alain Crivelli (DR, SBTV, Arles) : examinateur
Philippe Cury (DR, IRD, Sète) : examinateur
Thang Do Chi (Pr, Univ. Montpellier 2) : examinateur
Mireille Harmelin-Vivien (DR, Univ. Marseille) : rapporteur



Institut de Recherche pour le Développement
911 avenue Agropolis
B.P. 64501
34394 Montpellier cedex 5
France



Laboratoire ECOLAG - UMR 5119
Université Montpellier 2
Place E. Bataillon
34095 Montpellier cedex 5
France

Remerciements

Le mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches intervient nécessairement à un moment où le temps écoulé a permis la rencontre de personnes ayant eu un impact significatif sur l'évolution de la carrière. Que toutes ces personnes, elles se reconnaîtront, reçoivent ma profonde gratitude. Il est donc difficile de ne pas en oublier alors que mes pérégrinations m'ont emmené entre Montpellier, Brest et Dakar. Mais je me dois d'abord de saluer mes initiateurs dans le monde de la recherche, Thang Do Chi, Marie-Claude Ximénès, Gérard Loubens et François Meunier. Thang m'a toujours soutenu à l'UM2, depuis mon DEA et jusqu'à cette HDR, en passant par ma thèse de doctorat, et je lui en suis particulièrement reconnaissant. Mon passage au CEMAGREF de Montpellier, à l'IRD de Bretagne, à l'IRD de Dakar et mon retour à l'UM2 ont été à chaque fois une expérience inoubliable de rencontres et d'amitiés. Depuis déjà une dizaine d'années et mon intégration dans l'unité de recherche RAP, je dois beaucoup à son directeur, Raymond Laë, et à d'autres membres de cette UR, et en particulier Jean-Do Durand, pour un travail en collaboration particulièrement efficace et complice. Après mon passage au Sénégal, mon retour récent en métropole et mon accueil dans l'équipe dynamique et sympathique de David Mouillot du laboratoire Ecolag sont sans nul doute les catalyseurs à l'origine de la finalisation de cette HDR. Que tous les membres de cette équipe en soient chaleureusement remerciés.

Ces remerciements sont l'occasion de faire une mention spéciale aux techniciens qui ont côtoyé mon travail et sans qui il n'aurait jamais avancé (Madeleine Sagliocco, Pierre Campana, Eric Dabas, Louis Marec, Khady Diop et quelques vacataires) et à tous les pêcheurs et collègues sans qui le poisson ne serait jamais arrivé sur la paillasse.

Je suis très reconnaissant aux membres du jury d'avoir accepté de juger mon travail. Les rapporteurs : Mireille Harmelin-Vivien, qui a également initié des étudiants au monde des otolithes, Gilles Bœuf, qui a publié des articles majeurs sur les otolithes parmi la multitude de ses travaux et John Casselman, l'un des pionniers de la sclérochronologie moderne qui me fait un honneur particulier de venir juger mon travail. Les examinateurs : Alain Crivelli, toujours efficace dans la transmission de sa passion pour la biologie des poissons, Philippe Cury, au carrefour des idées entre la biologie des poissons et les approches écosystémiques, et Thang Do Chi, formateur d'un grand nombre d'entre nous passionnés par l'ichtyologie.

Enfin, depuis le début de mes études les encouragements et l'aide de mes parents ont toujours été efficaces et emprunts de bienveillance, et je ne pourrai jamais assez les en remercier.

SOMMAIRE

RESUME.....	4
I. CURRICULUM VITÆ ET ACTIVITES DE RECHERCHE.....	5
1. Curriculum Vitæ.....	5
2. Activités de recherche : la sclérochronologie.....	6
2.1. Cadre des recherches.....	6
2.2. Animation de la recherche et responsabilités.....	15
2.3. Expertises.....	17
3. Bilan des encadrements et de la formation.....	18
3.1. Enseignement.....	18
3.2. Encadrement universitaire.....	18
3.3. Formation.....	24
4. Production et valorisation scientifiques.....	26
4.1. Publications dans des revues internationales avec comité de lecture.....	26
4.2. Ouvrages.....	28
4.3. Chapitres d'ouvrages.....	28
4.4. Colloques internationaux.....	29
4.5. Colloques nationaux.....	31
4.6. Projets internationaux.....	32
4.7. Rapports scientifiques principaux.....	33
II. PROJETS SCIENTIFIQUES ET PROSPECTIVE.....	34
1. Les otolithes, intégrateurs de l'histoire individuelle des poissons.....	34
1.1. Facteurs endogènes et exogènes régulant la croissance de l'otolithe.....	36
1.2. Microchimie de l'otolithe et étude des déplacements des poissons.....	41
2. Les otolithes et la biologie intégrative.....	46
III. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	49

Résumé

Jacques PANFILI

né le 29 juillet 1965 à Mâcon (France)

Biologiste Ichtyologue

- **1992 - 1997** : Chargé de Recherche de 2ème Classe pour l'ORSTOM
- **1998 - actuel** : Chargé de Recherche de 1ère Classe pour l'IRD

Compétences scientifiques

- **Sclérochronologie des poissons** : estimation du temps, et en particulier de l'âge et de la croissance, à partir des marques enregistrées et conservées dans les pièces calcifiées (principalement otolithes, mais aussi écailles, épines, rayons de nageoire, vertèbres)
- **Méthodologie** : préparation des pièces dures, interprétation, microscopie photonique, épifluorescence, microscopie électronique à balayage, analyse d'images (principes de base, logiciels de traitement d'images, application à la sclérochronologie), analyses microchimiques (sondes EDS, WDS, ICPMS)
- **Applications** à l'étude de la biologie et de l'écologie des populations naturelles de poissons (tropicaux et tempérés)

Affectations et animations scientifiques

- **1993 - 2000** : Laboratoire de Sclérochronologie des Animaux Aquatiques (LASAA, Brest, France)
 - 1993 - 1998 : Responsable de la programmation scientifique pour l'ORSTOM au LASAA. Animateur scientifique pour des programmes de recherche en Afrique de l'Ouest et en Indonésie. 4 campagnes océanographiques.
 - 1998 - 2000 : Responsable pour la partie IRD du LASAA (programmation scientifique et gestion du budget). Animateur scientifique pour des programmes de recherche en Afrique de l'Ouest.
- **1997 - 2000** : Représentant pour l'IRD à l'EFAN, European Fish Ageing Network (Commission Européenne, Action Concertée FAIR PL 96.1304)
- **2001 - actuel** : UR 070 "Réponses Adaptatives des peuplements et des populations de Poissons aux pressions de l'environnement" (IRD Dakar, Sénégal et Université Montpellier 2, France)
 - Montage et responsabilité pour l'UR IRD 070 d'un laboratoire de biologie des poissons sur le Centre IRD de Bel Air à Dakar (2001-2005)
 - Programmation scientifique et gestion du budget du volet "Biologie des Populations" de l'UR
 - Montage d'un laboratoire de biologie des poissons et de sclérochronologie en partenariat dans l'UMR 5119 à l'Université Montpellier 2 (2005 – actuel)
- **2002 - 2006** : Représentant pour l'IRD à TACADAR, Towards accreditation and certification of age determination of aquatic resources (Commission Européenne, Action Concertée Q5CA-2002-01891)
- **2006 - 2009** : Coordinateur du projet européen MUGIL (Main Uses of the Grey mullet as Indicator of Littoral environmental changes, INCO Specific Support Action 026180)
- **Formation** de nombreux chercheurs, techniciens et étudiants à l'utilisation de la sclérochronologie
- **Montage de laboratoires spécialisés en sclérochronologie et conseils**
- **Organisation de symposiums**

Bilan Scientifique	n
Publications	
Revue scientifique indexées	24
Revue scientifique non indexées	5
Edition d'ouvrages	2
Chapitres d'ouvrages	15
Colloques	
Organisation	8
Communications	28
Publications dans des actes	5
Formation / encadrement	
Maîtrise, DEA, DES, Master	12
Co-pilotage de thèses	7
Chercheurs, techniciens	24
Vacataires	5

I. Curriculum Vitæ et Activités de recherche

1. Curriculum Vitæ

Jacques PANFILI

né le 29 juillet 1965 à Mâcon

nationalité française

Profession : biologiste ichtyologue

1998 - actuel : Chargé de Recherche de 1^{ère} Classe

pour l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement)

2005 - actuel : UR 070 RAP, UMR 5119 ECOLAG, UM2, Montpellier, France

2001 - 2005 : UR 070 RAP, IRD, Dakar, Sénégal

1998 - 2000 : LASAA, IRD, Brest, France

1992 - 1997 : Chargé de Recherche de 2^{ème} Classe

pour l'ORSTOM (Institut français de recherche pour le développement en coopération)

Laboratoire de Sclérochronologie des Animaux Aquatiques, IRD, Brest, France

Formation

1992 : Doctorat "Physiologie, Biologie des Organismes et des Populations"

Université Montpellier 2 - mention TH avec Félicitations

1989 - 1992 : Thèse de Doctorat

Titre : "Estimation de l'âge individuel des poissons : méthodologies

et applications à des populations naturelles tropicales et tempérées"

CEMAGREF de Montpellier (allocation de thèse CEMAGREF / ORSTOM)

Direction : T. Do Chi (UM2) - Codirection : M.C. Ximénès (CEMAGREF)

1988 : DEA "Sciences de l'Evolution et Ecologie"

Université Montpellier 2 - mention B - major

Stage au CEMAGREF de Montpellier "Etude des populations d'anguilles

(*Anguilla anguilla* L.) des lagunes du Languedoc et de Camargue :

méthodes de lecture d'âge et comparaison des croissances"

Direction : T. Do Chi (UM2) - Codirection : M.C. Ximénès (CEMAGREF)

1987 : Maîtrise de Biologie des Organismes et des Populations

Université de Bourgogne - mention TB

1986 : Licence de Biologie des Organismes

Université de Bourgogne - mention TB

1985 : DEUG B "Sciences de la Nature et de la Vie"

Université de Bourgogne - mention B

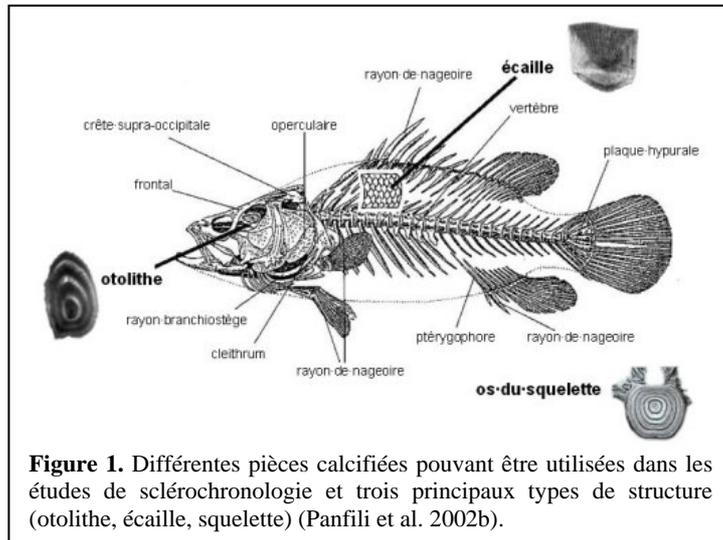
1983 : Baccalauréat série D

Lycée Lamartine de Mâcon - mention B

2. Activités de recherche : la sclérochronologie

2.1. Cadre des recherches

L'ensemble de mes travaux concerne la sclérochronologie des poissons (i.e. méthodes d'estimation de l'âge et de la durée de traits d'histoire de vie à partir des marques de croissance enregistrées et conservées dans les pièces calcifiées). Les premières étapes de cette science datent de la fin du XIX^{ème} siècle (Meunier & Panfili 2002) mais elle est toujours d'actualité car elle fournit



des données essentielles pour des recherches en écologie ou pour la gestion des populations naturelles, exploitées ou non (Panfili et al. 2002a). En sclérochronologie, trois grands types de pièces calcifiées sont utilisés (Fig. 1) et les travaux consistent généralement en : i) la mise en évidence et l'interprétation des marques de croissance sur les pièces dures, ii) la validation des rythmes de dépôt et de la précision des estimations de l'âge, et iii) les applications aux populations naturelles (croissance, démographie, âge de première maturité sexuelle, recrutement, écologie, etc.). Mes activités de recherche s'articulent autour de ces trois thèmes fondamentaux (voir après).

Depuis une vingtaine d'années, la plupart des recherches en sclérochronologie est focalisée sur les otolithes (Fossum et al. 2000, Panfili et al. 2002a), au détriment des autres pièces calcifiées comme les écailles ou les éléments du squelette interne, et à cela plusieurs raisons : i) l'otolithe est une formidable "mémoire vive", un intégrateur dont la structure ne subit pas de destruction secondaire notable au cours du temps, ii) il renferme plusieurs niveaux d'information temporelle (macrostructures saisonnières, microstructures journalières, discontinuités structurales dues à différents stress) et iii) il incorpore un certain nombre d'éléments chimiques issus du milieu ambiant et leur dosage à l'aide de puissants outils analytiques (microsondes de différents types) renseigne sur les déplacements et les milieux traversés par les individus. Au début de ma carrière j'ai pu acquérir des connaissances sur tous les types de pièces calcifiées, et, depuis quelques années, je m'intéresse plutôt aux otolithes dans le but de comprendre quels facteurs internes ou externes sont susceptibles de modifier leur croissance. Les applications développées concernent notamment l'estimation de la croissance des stades jeunes (larves, juvéniles) ou des adultes, ou encore l'estimation de l'âge de première maturité sexuelle. Plus récemment mes travaux ont été orientés vers la prise en compte de la composition chimique de l'otolithe pour analyser les migrations individuelles des poissons dans les estuaires tropicaux.

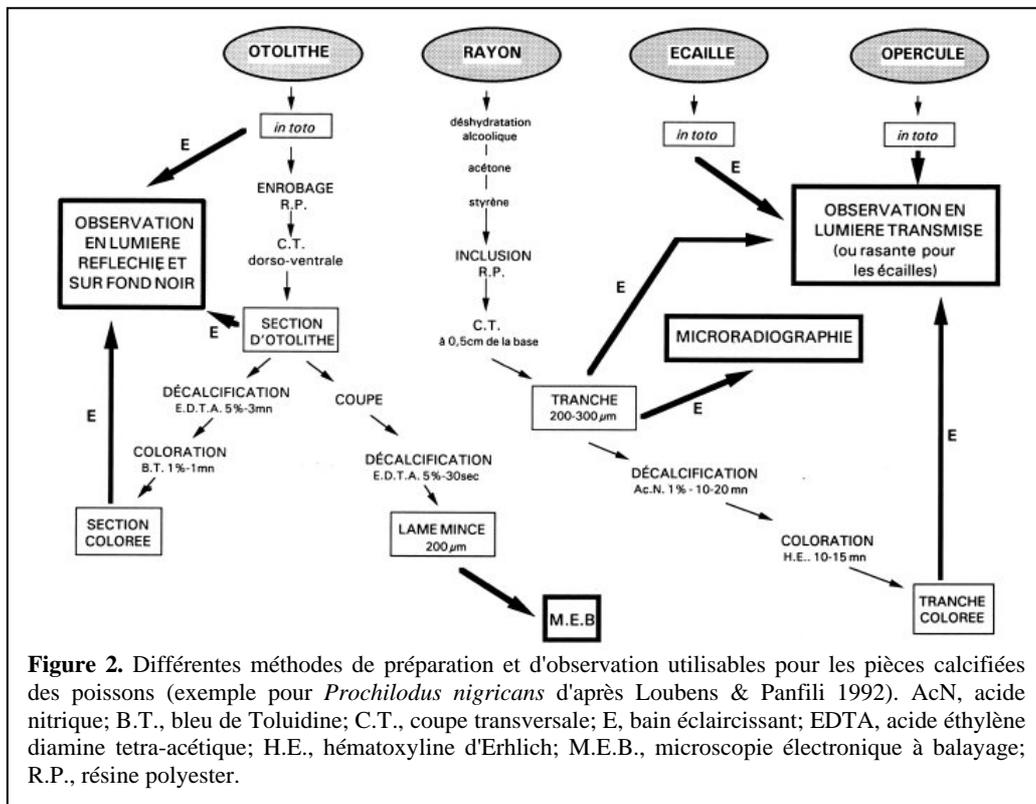
Les mécanismes de genèse et de croissance des otolithes (et des autres pièces calcifiées) sont certainement apparentés au sein des grands taxons, notamment chez les

Téléostéens. Ces derniers ont cependant colonisé la plupart des milieux aquatiques et, aux facteurs génétiques régulant la croissance, s'ajoutent des facteurs épigénétiques et environnementaux qui sont particulièrement marqués chez ces poïkilothermes. Mes recherches sur les populations naturelles ont toujours été diversifiées et visent à comparer les taxons, les espèces, les tissus et leurs interprétations histo-fonctionnelles en fonction de diverses variables environnementales. Cette démarche est illustrée par l'ensemble des espèces que j'ai pu étudier jusqu'à présent : espèces marines tropicales pélagiques et côtières, espèces d'eau douce, marines lagonaires ou récifales, et espèces lagunaires tropicales ou tempérées (voir après).

Mes divers travaux dans le domaine de la sclérochronologie m'ont amené à être sollicité dès 1998 pour être le premier éditeur d'un ouvrage de synthèse de référence, le Manuel de Sclérochronologie des Poissons, sorti en 2002, disponible en deux langues (anglais et français), et accompagné d'un DVD interactif incluant entre autres un large volet sur tous les aspects méthodologiques (Panfili et al. 2002a, b). Depuis lors, mes recherches sur la croissance des poissons associent également d'autres traits de vie comme la reproduction et sont couplés avec des données de génétique des populations.

Mise en évidence et interprétation des marques de croissance

Les techniques de préparation et d'observation des pièces calcifiées des poissons sont extrêmement variées (Fig. 2) et à cela s'ajoute le choix des pièces calcifiées à préparer qui, potentiellement, peut être très large (Fig. 1). J'ai pu travailler sur les trois grands types de pièces calcifiées (écailles, otolithes, éléments du squelette), et utiliser la plupart des méthodes classiques de préparation (inclusion, coupe, ponçage, polissage, attaque acide, coloration...) et d'observation (Fig. 2) : on trouvera une compilation des résultats dans Panfili (1993) et Panfili et al. (2002a), et plus spécifiquement dans Loubens &



Panfili (1992) ou Panfili & Ximénès (1994). Mes premiers travaux, issus de ma thèse, étaient surtout orientés vers la préparation et l'interprétation des macrostructures (marques de croissance saisonnières) car il s'avère que même en milieu tropical ce type de marques est enregistré dans les tissus et peut servir aux estimations d'âge (e.g. Panfili et al. 1990, Loubens & Panfili 1992, Panfili et al. 1992, Panfili & Ximénès 1994, Loubens & Panfili 1995, 1997, 2000, 2001). Après mon recrutement à l'ORSTOM et mon intégration au LASAA (Laboratoire de Sclérochronologie des Animaux Aquatiques, Ifremer-IRD), mes travaux se sont plus dirigés vers la préparation des microstructures des otolithes (e.g. Stéquert et al. 1996, Duponchelle & Panfili 1998, Tomás & Panfili 2000, Panfili & Tomás 2001) et leur étude, même chez les stades larvaires (Tomás & Panfili 2000, Ponton et al. 2001). Cette expérience m'a permis de participer à l'élaboration de terminologies nationale et internationale relative à la sclérochronologie, pour tous les types de pièces dures, à travers la rédaction de plusieurs glossaires (Baglinière et al. 1992, Kalish et al. 1995, Panfili et al. 2002c). D'autre part ces connaissances ont permis de donner des directives de synthèse quant au choix de l'utilisation d'une pièce calcifiée plutôt qu'une autre (Tab. 1).

Tableau 1. Différentes pièces calcifiées utilisables en sclérochronologie : marques de croissances, avantages et inconvénients de chaque type (Panfili et al. 2002b).

	Ecaille	Otolithe	Rayon de nageoire
Préparation	• rapide	• plus ou moins longue	• longue
Marques de croissance (rythme)	• circulus • discordance (saisonnière)	• zone opaque ou translucide (saisonnière) • discontinuité structurale (saisonnière ou accidentelle) • microstructure (journalière)	• zone opaque ou translucide (saisonnière) • discontinuité structurale ou ligne d'arrêt de croissance (saisonnière)
Avantages	• poisson non sacrifié • pas de préparation	• pas de remaniement • parfois pas de préparation • microstructures	• parfois poisson non sacrifié
Inconvénients	• régénération (écailles macrocentriques)	• poisson sacrifié • axes de croissance complexes	• initium souvent absent • remaniement parfois important • préparation longue

Une grande partie des recherches en sclérochronologie concerne donc la méthodologie et la mise au point de nouvelles techniques de préparation des pièces calcifiées. En effet, sur la base des méthodes classiques et des pièces étudiées, les variations sont importantes pour mettre en évidence les marques de croissance (Fig. 2 et voir synthèse dans Panfili et al. 2002a). L'utilisation plus récente des outils de traitement informatique d'images a étendu les possibilités d'analyse et de mesures, et diminué le temps d'acquisition des données. A l'heure actuelle, la lecture assistée par ordinateur (semi-automatique) est un outil commun à de nombreux laboratoires, même si les logiciels utilisés sont assez diversifiés (Panfili et al. 2002a). L'idée initiale de nombreux laboratoires d'automatiser complètement les lectures semble dépassée pour l'ensemble des espèces et il faudra probablement toujours l'intervention d'un opérateur pour interpréter les structures de croissance et leur variabilité biologique. Des outils plus spécifiques peuvent être développés lorsque l'on a une bonne connaissance des phénomènes de sclérochronologie d'une espèce (Panfili et al. 1990, Panfili 1993, Panfili & Ximénès 1994). Quoiqu'il en soit, l'utilisation du traitement numérique des images reste un outil indispensable à plusieurs niveaux : la quantification d'une information non accessible

manuellement (e.g. morphométrie), la reproductibilité des opérations et des résultats, et la mémorisation d'une certaine expérience.

Validation des rythmes de dépôt et de la précision des estimations d'âge

La validation (i.e. vérification expérimentale des hypothèses sur les scénarios de croissance des pièces calcifiées et/ou de l'exactitude des estimations d'âge) est certainement l'étape la plus fondamentale de la sclérochronologie. La littérature sur le sujet a considérablement augmenté depuis les quinze dernières années. Sachant que la sclérochronologie permet d'estimer un âge individuel, les méthodes de validations peuvent être réparties en plusieurs catégories qui n'ont pas toutes la même portée (Campana 2001, Panfili et al. 2002a). Par ordre de précision décroissante, on peut citer la validation directe (par marquage interne et/ou externe, ou en élevage), la validation microchimique (avec utilisation du radiocarbone de la bombe atomique), la validation semi-directe (par observation de l'apparition chronologique des marques en bordure des pièces), la validation indirecte (par comparaison avec les estimations statistiques de l'âge) et enfin la vérification (par comparaison des estimations d'âge individuel entre plusieurs pièces calcifiées).

La validation directe fait appel la plupart du temps au marquage interne de type "vital" qui permet l'incorporation de fluorochromes (e.g. tétracycline, alizarine, fluorescéine...) dans les pièces calcifiées. J'ai pu mettre en application ces techniques pour différentes espèces : l'anguille dans les lagunes méditerranéennes ou les marais atlantiques (Panfili et al. 1992, Panfili 1993, Panfili & Ximénès 1994), le sandre en Camargue (données non publiées) ou encore les tilapias dans les lagunes ou les milieux dulçaquicoles d'Afrique de l'ouest (Panfili & Tomás 2001), et les petits pélagiques en Mer de Java ou en Afrique de l'ouest (données non publiées). La tétracycline se révèle être un marqueur universel pour les études de sclérochronologie chez les poissons mais son utilisation devient de plus en plus réglementée dans différents pays (Panfili et al. 2002a). Parallèlement, j'ai pu appliquer la méthode de validation semi-directe à plusieurs populations de milieux tempérés ou tropicaux : anguilles méditerranéennes dulçaquicoles ou lagunaires (Panfili 1993, Panfili & Ximénès 1994), espèces du bassin amazonien (Loubens & Panfili 1992, 1995, 1997, 2000, 2001), et espèces estuariennes ouest africaines (Panfili et al. 2004a, 2004b). Tous ces travaux montrent la nécessité d'une validation pour chaque espèce considérée, et parfois même chaque population, et la difficulté à mettre en œuvre ces techniques dans des conditions reflétant le milieu naturel. Pour certaines études que j'ai pu réaliser, la fréquence d'apparition des microstructures sur les otolithes de plusieurs espèces tropicales (sardinelles ouest africaines, petits pélagiques indonésiens...) ne semble pas quotidienne. Il est cependant très difficile de savoir si ce phénomène reflète une réalité biologique ou un artefact expérimental : la suite de mes travaux vise à répondre à ce genre de question. L'étape de validation peut également demander un dispositif expérimental très lourd : ce fut en particulier le cas lors du programme IRD-Picolo pour une espèce micronectonique, *Vinciguerria nimbaria*, difficilement accessible dans l'Océan Atlantique tropical. J'ai pu ainsi proposer divers plans d'expérience et d'échantillonnage de cette espèce lors de plusieurs campagnes océanographiques, dont une pour laquelle j'ai été chef de mission à bord du N/O Antéa de l'IRD, et traiter les données avec différents protocoles ou à travers différents stages. A chaque fois les résultats ont été négatifs dans le sens où aucun cycle de dépôt particulier n'a pu être mis en évidence sur les otolithes de cette espèce, pourtant soumise à des migrations nycthémerales très marquées et dont les otolithes présentent des microstructures remarquables.

Les expériences de validation en milieu naturel que j'ai pu conduire ont toujours cherché à mettre en relation la formation de marques de croissance sur les pièces calcifiées et les variations de certains paramètres environnementaux (e.g. température, hydrologie ou salinité). Diverses recherches menées en milieu tropical ont permis de conclure que dans ces environnements, généralement considérés à tort comme chaud et peu variables, d'importantes variations climatiques saisonnières (e.g. hydrologie) conduisaient également à une saisonnalité des rythmes de dépôt sur les pièces calcifiées (Fig. 3). Par exemple dans le bassin du Mamoré en Bolivie, les très fortes variations hydrologiques annuelles conduisent à l'apparition sur les otolithes de zones chromophiles pendant l'étiage et non chromophiles pendant la crue pour deux espèces (Fig. 3a et 3b). Pour d'autres espèces, ces variations dues aux inondations influencent la formation des marques de croissance sur d'autres pièces calcifiées comme les écailles (Loubens & Panfili 1992, 1995) et les vertèbres (Loubens & Panfili 2000). Dans ces milieux sud-américains il existe donc une très forte corrélation entre la montée du niveau des eaux, la disponibilité alimentaire et la formation de zones de croissance particulières sur les pièces calcifiées. Dans l'estuaire hypersalé du Saloum au Sénégal et l'estuaire normal de la Gambie, la saisonnalité des pluies, et en parallèle les variations de salinité de l'environnement, influencent le dépôt des zones opaques et translucides des otolithes de tilapias (Fig. 3c). Les zones translucides correspondent aux périodes de croissance favorables lors de la crue,

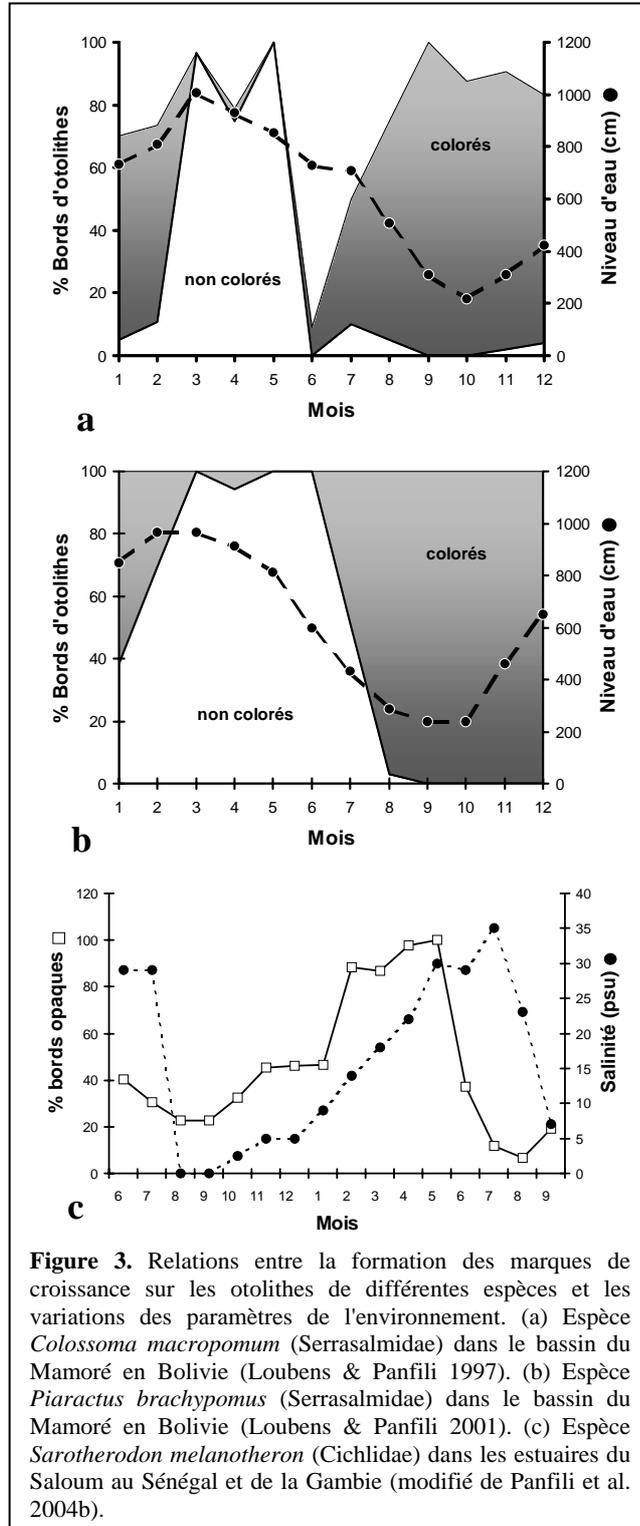


Figure 3. Relations entre la formation des marques de croissance sur les otolithes de différentes espèces et les variations de paramètres de l'environnement. (a) Espèce *Colossoma macropomum* (Serrasalmidae) dans le bassin du Mamoré en Bolivie (Loubens & Panfili 1997). (b) Espèce *Piaractus brachypomus* (Serrasalmidae) dans le bassin du Mamoré en Bolivie (Loubens & Panfili 2001). (c) Espèce *Sarotherodon melanotheron* (Cichlidae) dans les estuaires du Saloum au Sénégal et de la Gambie (modifié de Panfili et al. 2004b).

synonymes de diminution de la salinité dans les estuaires et de changements de conditions écologiques.

Finalement ces résultats et les réflexions qui les accompagnent ont été compilés dans un article de synthèse récent mettant en relation la présence de marques de croissance cycliques sur les otolithes et les variations de certains paramètres de l'environnement dans des milieux généralement considérés comme peu variables comme les eaux tropicales ou les milieux océaniques profonds (Morales Nin & Panfili 2005). En fait la méconnaissance préalable de ces types d'environnements avait pu conduire à la conclusion erronée que les otolithes de poissons de ces milieux ne présentaient pas de marques de croissance saisonnières. L'augmentation récente de l'effort de pêche dans ces milieux et celle concomitante des travaux scientifiques ont pu démontrer le contraire (Morales Nin & Panfili 2005).

Applications de la sclérochronologie à l'étude des populations naturelles

Les applications de la sclérochronologie pour l'étude des populations naturelles des poissons sont multiples et concernent principalement les études de croissance, de démographie et d'écologie. Pour mes travaux, je pourrais mentionner des applications :

- sur les facteurs endogènes et exogènes influençant la formation des marques de croissance sur les otolithes (Panfili & Ximénès 1994, Loubens & Panfili 1997, 2001, Massou et al. 2002, 2004a, 2004b, Panfili et al. 2004b) ;
- sur les estimations de croissance et les comparaisons pour différentes espèces ou populations (Panfili & Ximénès 1994, Panfili et al. 1994, Stéquert et al. 1996, Tomás & Panfili 2000, Ponton et al. 2001, Panfili et al. 2004a) ;
- sur le calcul de la croissance et le rétrocalcul des tailles à un instant donné à partir de mesures sur les pièces calcifiées (Panfili & Tomás 2001) ;
- sur la démographie des populations (Loubens & Panfili 1995, Stéquert et al. 1996, Loubens & Panfili 2000, Tomás & Panfili 2000).

Les facteurs endogènes et exogènes pouvant influencer la formation des microstructures et la croissance des otolithes sont multiples et souvent inter-corrélés entre eux (voir Chapitre II.1. Les otolithes, intégrateurs de l'histoire individuelle des poissons). Parmi les facteurs endogènes on peut citer le génome, qui va guider la croissance tant dans ses limites que dans ses capacités et ses normes de réaction, puis les divers facteurs agissant via la physiologie générale de l'organisme (cycle nyctéméral, alimentation, reproduction, stress).

Parmi les facteurs exogènes on peut citer les multiples paramètres environnementaux (température, salinité, qualité de l'eau) influençant indirectement la croissance via la disponibilité alimentaire et la physiologie, et les interactions spécifiques ou inter-spécifiques agissant sur le comportement et les relations trophiques. Depuis la découverte des microstructures des otolithes par Pannella (1971), et plus particulièrement à partir des années 80, les études de la croissance fine des individus se sont multipliées et ont constitué des voies de recherche particulièrement originales. Mes travaux dans ce domaine ont été essentiellement réalisés à partir de l'encadrement d'une thèse sur l'influence de différents facteurs sur la croissance des otolithes de tilapias, à partir d'expériences menées en milieu contrôlé et en milieu naturel (Fig. 4). La disponibilité alimentaire a été le premier facteur testé et il s'est avéré qu'elle constitue un facteur essentiel de la croissance de l'otolithe (Fig. 4a), sa diminution entraînant systématiquement un dépôt de microstructures plus étroites, et le retour à une alimentation normale correspondant directement à une croissance stable avec des

microstructures légèrement supérieures à $3 \mu\text{m}\cdot\text{j}^{-1}$ (Massou et al. 2002). Le stress de confinement semble être un facteur agissant de façon significativement négative sur la croissance des tilapias en entraînant la formation de discontinuités structurales dans les otolithes (Massou et al. 2004a). Enfin nos expériences sur les effets de la reproduction sur la croissance des otolithes ont montré, pour la première fois dans la littérature, que la période d'activité reproductrice avait un effet négatif sur cette croissance, entraînant une sous-estimation de l'âge par dénombrement des microstructures quotidiennes (Fig. 4b et Massou et al. 2004b). Ceci peut donc avoir des conséquences non négligeables sur les estimations d'âge d'individus capturés dans le milieu naturel.

Mes travaux sur la croissance de différentes espèces de poissons montrent que chez ces poïkilothermes elle est extrêmement variable, même entre les individus d'une seule population, que ce soit pour des espèces tempérées ou tropicales. C'est par exemple le cas pour l'anguille européenne dans les

lagunes méditerranéennes où certains individus peuvent grandir de plus de 10 cm en une année alors que d'autres ont une croissance nulle (Panfili et al. 1994). Chez cette espèce, fréquentant lors de sa phase adulte tous les milieux aquatiques continentaux, les différences de croissance entre les populations sont particulièrement importantes (Panfili & Ximénès 1994). Pour de nombreuses autres espèces des milieux aquatiques tropicaux, la croissance varie significativement selon les individus, que ce soit dans les eaux douces du bassin amazonien (Loubens & Panfili 1995, 1997, 2000, 2001), dans les estuaires ouest-africains (Panfili et al. 2004a, Panfili et al. 2004b) ou dans le milieu pélagique océanique (Stéquert et al. 1996, Tomás & Panfili 2000). Le cas des tilapias (Cichlidae) est un très bon exemple d'espèces cosmopolites pouvant fréquenter quasiment tous les types de milieux continentaux et dont la croissance semble réellement s'adapter aux conditions changeantes de ces environnements. Dans ce groupe, l'espèce *Sarotherodon melanotheron* est encore plus remarquable car elle présente une plasticité phénotypique

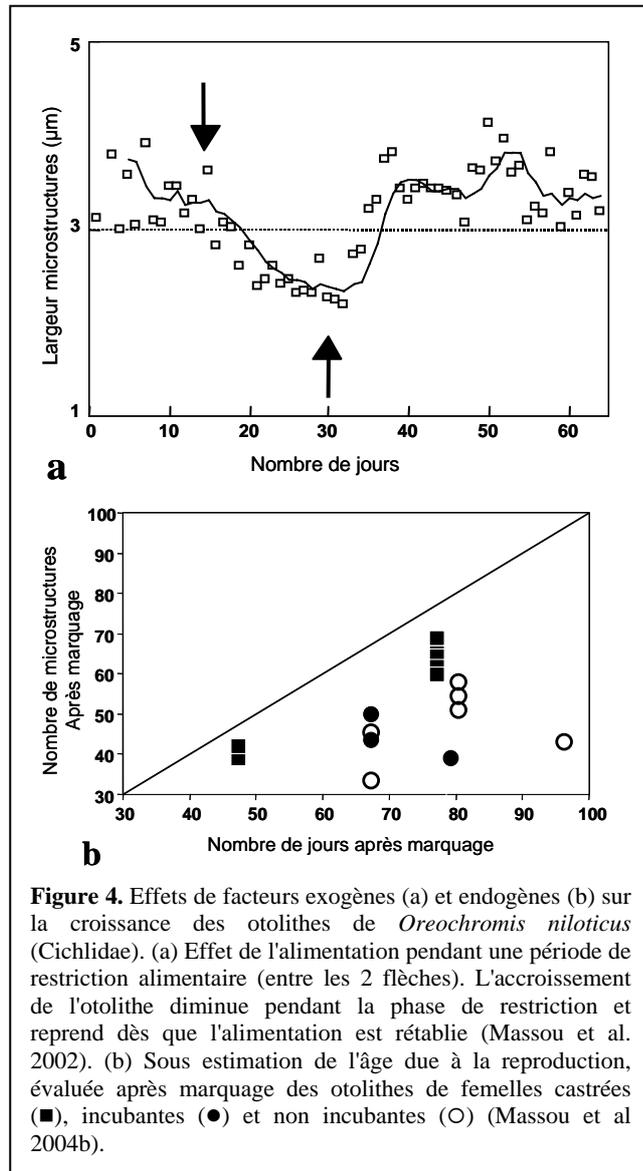


Figure 4. Effets de facteurs exogènes (a) et endogènes (b) sur la croissance des otolithes de *Oreochromis niloticus* (Cichlidae). (a) Effet de l'alimentation pendant une période de restriction alimentaire (entre les 2 flèches). L'accroissement de l'otolithe diminue pendant la phase de restriction et reprend dès que l'alimentation est rétablie (Massou et al. 2002). (b) Sous estimation de l'âge due à la reproduction, évaluée après marquage des otolithes de femelles castrées (■), incubantes (●) et non incubantes (○) (Massou et al. 2004b).

de croissance étonnante : elle est capable de vivre des milieux dulçaquicoles jusqu'aux environnements hypersalés, mais avec d'importantes modifications de ses taux de croissance (Panfili et al. 2004b). Sa plasticité d'adaptation est remarquable et a pu être démontrée également pour d'autres traits de vie comme la reproduction (Panfili et al. 2004b). Il semble donc que les poissons possèdent pour la plupart d'importants potentiels de croissance, dans la limite de leur environnement génétique spécifique, et peuvent donc répondre de façon sensible aux différentes conditions environnementales auxquelles ils sont soumis ou aux perturbations associées à ces environnements.

Intégration des traits d'histoire de vie

Depuis mon intégration dans l'UR RAP, mes recherches sur la croissance des poissons via la sclérochronologie associent également d'autres traits de vie comme la reproduction (Panfili et al. 2006), et sont, si possible, couplées avec des données de génétique des populations (Panfili et al. 2004a). Ces intégrations de différents traits et leur rapprochement avec le patrimoine génétique des populations sont nécessaires pour comprendre la réponse des individus et des espèces aux différentes contraintes de leur environnement.

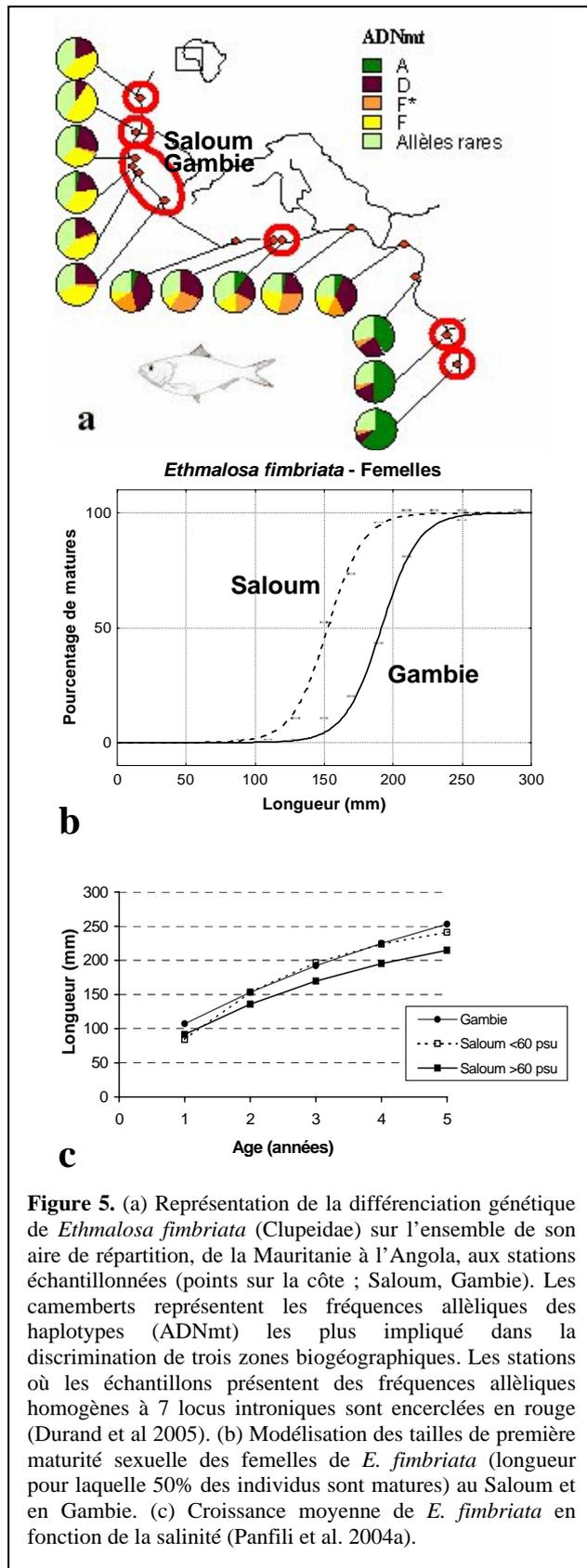
Un exemple est donné ici pour l'ethmalose, *Ethmalosa fimbriata*, un Clupeidae au comportement pélagique et grégaire, fréquentant la plupart des milieux estuariens (estuaires et lagunes) de la côte occidentale de l'Afrique (Fig. 5a). Ce modèle biologique est l'un des modèles choisis par le volet Biologie des Populations, dont je m'occupe pour l'UR RAP, afin de développer des comparaisons à l'échelle des estuaires. Une étude phylogéographique de l'ethmalose a permis de mettre en évidence l'existence de 3 régions biogéographiques en Afrique de l'Ouest (Fig. 5a et Durand et al. 2005). L'analyse de la différenciation génétique à l'aide de marqueurs nucléaires a révélé l'existence de populations structurées dans les différentes régions biogéographiques (Panfili et al. 2004a). Néanmoins, une seule population serait présente de l'estuaire du Saloum au Sénégal jusqu'à la Guinée, en passant par la Gambie, ce qui indique l'existence de flux géniques sur de larges échelles géographiques sans doute conditionnés à une distance limitée entre les estuaires. L'ensemble de ces résultats a permis de confirmer la présence d'une seule espèce d'ethmalose en Afrique de l'Ouest et l'absence d'un comportement de philopatrie (Durand et al. 2005). Les traits de vie ont été mesurés pour les populations des estuaires de la Gambie et du Saloum (Sénégal) ayant des fonctionnements contrastés, le premier étant normal et le second inverse et hypersalé (Panfili et al. 2004a). Les traits de vie de différentes populations d'ethmalose sont variables dans ces estuaires, et fonction d'un gradient de salinité : une réduction de la taille de première maturité sexuelle est observées dans l'écosystème hypersalé (Fig. 5b) et une réduction de croissance significative est observée dans les milieux hypersalés (salinité > 60) (Fig. 5c). La croissance étant comparable durant la première année de vie, c'est donc un phénomène de maturation précoce qui apparaît dans les environnements les plus salés. D'autres traits de vie associés (fécondité relative, taille des ovocytes...) varient également en fonction de ces écosystèmes (Panfili et al. 2004a).

En conclusion, pour les populations d'ethmaloses des estuaires du Saloum et de la Gambie, les changements des traits de vie sont les plus marqués dans les conditions d'hypersalinité. L'absence de différenciation génétique entre les populations étudiées suggère que les variations des traits de reproduction et de croissance ne seraient pas dues à un isolement génétique mais probablement à des réponses phénotypiques dues aux fortes fluctuations de salinité (Panfili et al. 2004a). Ces études reflètent particulièrement

bien l'intérêt du couplage entre différents champs de recherche scientifique, comme la sclérochronologie et la génétique des populations, pour évaluer des réponses adaptatives des populations aux pressions de l'environnement. Dans le cas de l'adaptation aux milieux hypersalés, un couplage avec des études de physiologie est certainement nécessaire pour appréhender les phénomènes d'osmorégulation à l'échelle individuelle et mesurer le degré d'adaptation en fonction de l'environnement.

Autres aspects innovants de la sclérochronologie

En marge de la sclérochronologie *sensu stricto*, est apparue au début des années 80 une nouvelle science concernant l'étude de la microchimie des otolithes de poissons. L'idée d'analyser le contenu microchimique des otolithes est venue en imaginant qu'ils incorporent les éléments de l'environnement dans lequel les individus naissent, se reproduisent et meurent (Panfili et al. 2002a). Cette incorporation est théoriquement complexe puisque ces éléments doivent franchir trois principales barrières physiologiques (la branchie pour le milieu extérieur, le vaisseau sanguin pour le plasma et l'otosac pour l'endolymphe, liquide dans lequel baigne l'otolithe en permanence). Les outils analytiques disponibles pour mesurer ces éléments dans l'otolithe font partie du domaine de la spectrométrie : on peut citer entre autres l'EDS (Energy Dispersive Spectrometry), la



WDS (Wavelength Dispersive Spectrometry), l'ICPMS (Inductive Coupled Plasma Mass Spectrometry) et la PIXE (Particle-Induced X-ray Emission Spectrometry). Mais ces microsondes sont d'utilisation complexe pour analyser le matériel biologique de type "otolithe". L'engouement pour ce genre d'étude a été très rapide dans le but de retracer les histoires individuelles des poissons et d'essayer de discriminer leurs origines (voire leur appartenance à différents stocks). Les études menées jusqu'à présent montrent que l'on est toujours dans une phase exploratoire et qu'il est encore nécessaire de calibrer ces méthodes. C'est sous l'initiative de S. Campana, chercheur canadien fameux pour ces travaux sur les otolithes, qu'une expérience internationale a été lancée en 1994 pour intercalibrer les outils d'analyse chimique : l'International Otolith Composition Experiment (IOCE). S. Campana m'a demandé de m'associer à cette expérience avec des collègues du LASAA et d'autres chercheurs internationaux connus dans ce domaine. Les résultats de cette expérience (Campana et al. 1997) ont eu un impact important sur les recherches sur la composition élémentaire des otolithes. Ils ont montré qu'aucun instrument n'est capable de mesurer tous les éléments présents dans l'otolithe avec justesse et précision : les sondes EDS et WDS sont utiles pour analyser les éléments majeurs (> 100 ppm) tandis que les ICPMS et PIXE sont nécessaires pour mesurer les éléments traces (< 100 ppm).

Depuis les trois dernières années et le montage d'un sujet de thèse incluant des analyses de microchimie des otolithes, je m'intéresse au dosage du rapport strontium/calciure en relation avec les niveaux de salinité ambiante pour évaluer les déplacements des populations de poissons dans les estuaires hypersalés d'Afrique de l'Ouest. Les premiers résultats ont montré que les populations d'une espèce de tilapia, *Sarotherodon melanotheron*, peuvent être discriminées grâce au dosage du Sr dans l'otolithe (Diouf et al. 2006). D'autre part les niveaux de Sr incorporés pour les espèces *S. melanotheron* et *Ethmalosa fimbriata* fréquentant les zones hypersalées du Saloum au Sénégal n'ont jamais été rencontrés dans la littérature, ce qui conforte les hypothèses sur les relations entre la quantité de Sr incorporé et la salinité. Dans la partie "prospective" de ce mémoire (Chapitre II.1.3.), je préciserai les voies qui me semblent les plus prometteuses pour les applications des recherches en microchimie des otolithes, et en particulier pour suivre les déplacements des individus dans l'espace et dans le temps.

2.2. Animation de la recherche et responsabilités

Fin 1992, j'ai été recruté à l'ORSTOM (futur IRD) pour participer à l'animation d'un laboratoire mixte Ifremer-IRD nouvellement créé, le LASAA (Laboratoire de Sclérochronologie des Animaux Aquatiques). A l'époque, et en collaboration avec des chercheurs de l'Ifremer, j'ai assuré le montage intégral de ce laboratoire, et en particulier veillé à l'acquisition et à la gestion de tout son équipement scientifique. Parallèlement, et jusqu'à la fin 2000, j'ai été le responsable de l'équipe IRD au LASAA (2 chercheurs et 3 techniciens), de sa programmation scientifique et de sa gestion budgétaire. Dans ce cadre j'ai donc eu à recruter et à former des techniciens sous différents statuts (titulaires IRD, CEC, vacataires). L'équipe IRD du LASAA a ainsi mis au point plusieurs méthodes de préparation et d'interprétations de pièces calcifiées qui sont maintenant standardisées. La formation ayant été l'une des missions principales de ce laboratoire, outre les étudiants, j'ai pu accueillir de nombreux chercheurs et techniciens d'autres instituts ou d'universités pour les former aux méthodes et techniques de sclérochronologie (voir Chapitre I.3.3.) : au total 28 chercheurs et techniciens appartenant à des instituts français ou étrangers ont été formés sous ma responsabilité. Les programmes que je dirigeais ont surtout concerné

des recherches menées par l'Institut en Afrique de l'Ouest et en Indonésie. Dans ce cadre j'ai eu également à gérer de nombreuses missions sur le terrain et autres expérimentations.

Mon intégration dans l'Unité de Recherche IRD 070 RAP (Réponses Adaptatives des peuplements et des populations de Poissons aux pressions de l'environnement) date de 2001. J'ai pu assurer, en tant que responsable, le montage d'un laboratoire de biologie des poissons au sein de l'équipe à Dakar (2001-2005) ainsi que le recrutement et la formation d'une technicienne spécialisée. Dans l'UR RAP, j'anime et gère (en termes de budget annuel) le volet scientifique "Biologie des Populations" dont les travaux ont été menés essentiellement dans les estuaires de la Gambie et du Saloum (Sénégal), et dans des lacs de retenue au Mali. Dans ce contexte j'ai eu à organiser de nombreuses missions sur le terrain et des expérimentations en mésocosmes. A l'heure actuelle les travaux s'orientent sur l'adaptation des populations de différentes espèces aux conditions de salinité variables rencontrées dans les estuaires d'Afrique de l'ouest. Ces recherches impliquent des couplages entre différentes disciplines (sclérochronologie, physiologie, génétique des populations) et je coordonne une petite équipe de 3 chercheurs directement impliqués dans ces disciplines, sans compter les nombreuses collaborations internationales générées par ces activités.

Depuis mon arrivée en accueil dans l'UMR 5119 du Pr. T. Do Chi à l'Université Montpellier 2, et de mon intégration dans l'équipe MACRO (écologie fonctionnelle des macro-organismes), je participe au montage d'un laboratoire de biologie des poissons avec une spécialisation en sclérochronologie, en partenariat avec une chercheuse CNRS nouvellement recrutée. A terme (début 2008), ce laboratoire sera susceptible de traiter tous les types de pièces calcifiées avec un plateau technique complet et il permettra aussi de réaliser les préparations des otolithes pour les analyses de microchimie dans une salle propre. Une fois préparés, les échantillons seront analysés avec les outils analytiques disponibles à l'UM2 (ICPMS et LA-ICPMS) en partenariat avec les agents de l'ISEM (Institut des Sciences de l'Evolution de l'UM2).

Au niveau international, j'ai représenté l'IRD dans deux actions concertées européennes : EFAN (European Fish Ageing Network, Action Concertée FAIR PL 96.1304) de 1997 à 2000 et TACADAR (Towards accreditation and certification of age determination of aquatic resources, Action Concertée Q5CA-2002-01891) de 2002 à 2006. Ces actions concertées ont consisté en des réunions plénières annuelles et des ateliers de travail réguliers ayant produit de nombreux rapports et communications. J'ai également participé à l'organisation de plusieurs symposiums internationaux (voir Chapitre I.4.4.). De plus l'action concertée EFAN a permis de finaliser le projet d'ouvrage de synthèse (Manual of Fish Sclerochronology, Panfili et al. 2002a) avec les collègues européens spécialistes de cette discipline.

La coopération scientifique que j'ai pu mener avec le Sud s'est opérée grâce à des accueils de chercheurs en France pour des stages de formation mais également à partir de nombreuses missions en milieu marin (Afrique de l'ouest, Indonésie...), lors de campagnes océanographiques (2 campagnes sur le N/O ORSTOM André Nizery et 2 campagnes sur le N/O IRD Antéa, dont une comme chef de mission), ou en milieu continental estuarien ou lagunaire (Afrique de l'ouest). Mes collaborations avec les instituts du Nord ont été essentiellement menées à travers les réseaux européens, quelques expérimentations conjointes (Canada) et grâce à la rédaction et l'édition du Manuel de Sclérochronologie des Poissons impliquant des chercheurs américain, anglais, danois, espagnol, français, irlandais et norvégien. Enfin mes projets de coopération internationale se sont renforcés en 2005 puisque j'ai été coordinateur d'une proposition de projet européen INCO (International Coopération, voir Chapitre II.2) impliquant 14 chercheurs

répartis dans 8 pays à travers le monde (Afrique du Sud, Bénin, Espagne, France, Grèce, Mexique, Sénégal, Taiwan). Ce projet, MUGIL (Main Uses of the Grey mullet as Indicator of Littoral environmental changes), a été accepté pour financement en 2006, pour une durée de 2 ans et demi (165 K€) et j'en suis donc le coordinateur. Il a pour but de construire un réseau d'observation pour une espèce côtière cosmopolite, présente dans presque tous les milieux côtiers tempérés ou tropicaux de la planète, et d'une importance économique notable pour les pêcheries des pays du sud. L'objectif est de collecter et de conserver toute l'information disponible sur cette espèce à une échelle mondiale dans les quatre principales zones géographiques (Afrique, Asie, Amérique et Europe), et de construire une base de donnée accessible dans le domaine public. Dans cette optique la base sera gérée à partir du consortium FishBase (www.fishbase.org). Le projet coordonne les actions de recherche impliquant l'utilisation de cette espèce comme indicateur de l'état des zones côtières en utilisant la génétique des populations, les variations des traits d'histoire de vie comme des traceurs de réponses biologiques face à des environnements perturbés (en terme de salinité ou de pollution par exemple). A terme le consortium de MUGIL devra proposer un nouveau projet de recherche européen dans le cadre du 7^{ème} PCRD en 2008-2009.

Enfin sur les plans nationaux et internationaux, j'interviens dans un nouveau Projet International de Coopération Scientifique du CNRS (PICS, 2007-2009, coordinateur D. Mouillot, 45 K€), en partenariat avec l'UMR 5119 ECOLAG et le laboratoire EPOMEX (Centro de Ecología Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México) de l'Université Autonome de Campeche (Mexique) sur l'exploitation de la lagune de Campeche par les poissons du Golfe du Mexique à partir de l'identification des phases de vie lagunaire par la microchimie de l'otolithe.

2.3. Expertises

Dans le cadre des missions d'expertise, j'ai été référé pour les revues internationales et nationales suivantes (par ordre de Facteur d'Impact décroissant) : Marine Ecology Progress Series, Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Marine Biology, Journal of Fish Biology, Fisheries Research, Marine and Freshwater Research, Oceanologica Acta, Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, Cahiers de Biologie Marine, Scientia Marina, Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture, Aquatic Living Resources, Cybium, Ichthyological Exploration of Freshwaters, Revue d'Hydrobiologie Tropicale. J'ai également été référé pour 3 ouvrages : "Tissus durs et âge individuel des Vertébrés" (1992, éditions ORSTOM-INRA, France), " Recent developments in fish otolith research" (1995, édition University of South Carolina Press, USA) et "Tropical fish otoliths: information for assessment, management and ecology" (en cours, édition Kluwer Academic, USA).

Enfin, j'ai été invité comme expert-évaluateur de différents programmes de recherche internationaux et nationaux dans le cadre de la National Science Foundation (Etats-Unis), de l'International Foundation for Science (Suède), du programme BENEFIT (Benguela environmental - fisheries interaction and training program, Afrique du Sud), de la Station Biologique de la Tour du Valat (France) et pour le Conseil Régional de Bretagne (France).

3. Bilan des encadrements et de la formation

3.1. Enseignement

- **Février 1997. Maîtrise "Biologie des Organismes et des Populations"** (Université de Bretagne Occidentale, Brest, France). Cours/TP (4h) : La sclérochronologie chez les poissons.
- **Mars 1998. Maîtrise "Biologie des Organismes et des Populations"** (Université de Bretagne Occidentale, Brest, France). Cours/TP (4h) : La sclérochronologie chez les poissons.
- **Mai 1999. Maîtrise "Biologie des Populations et des Ecosystèmes"** (Université de Bretagne Occidentale, Brest, France). Cours/TP (9h) : L'estimation de l'âge chez les poissons et la sclérochronologie.
- **Mai 2000. Maîtrise "Biologie des Populations et des Ecosystèmes"** (Université de Bretagne Occidentale, Brest, France). Cours/TP (8h) : L'estimation de l'âge chez les poissons et la sclérochronologie.
- **Mars 2005. Maîtrise "Institut Universitaire de Pêche et d'Aquaculture"** (Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal). Cours (6h) : L'estimation de l'âge chez les poissons et la sclérochronologie.
- **Novembre 2006. Master 2 "EDBI, UMBGF 309, Réponses Adaptatives des Organismes Aquatiques"** (Université Montpellier 2, Montpellier, France). Cours (4h) : Réponses adaptatives des populations de poissons aux pressions de l'environnement : Exemples en milieu tropical.

3.2. Encadrement universitaire

Maîtrise

- **Colin F. 1994.** Etude de l'âge de *Vinciguerria nimbaria* (Pisces, Gonostomatidae) dans la zone de pêche "Liberia". Rapport de stage de Maîtrise, Université de Bretagne occidentale, août 1994, 7p.
- **Valdez Ramirez M.E. 1994.** Etude préliminaire de l'estimation de l'âge de *Vinciguerria nimbaria* (Pisces, Photichthyidae) dans la zone de pêche "Liberia". Rapport de stage de Maîtrise, Université de Bretagne occidentale, septembre 1994, 7p.
- **Lucas P. 1997.** Préparation et analyse des macrostructures des otolithes de *Piaractus brachypomus* (Serrasalminidae, Teleostei). Rapport de stage de Maîtrise, Université de Bretagne Occidentale, option Biologie des Organismes et des Ecosystèmes, 16p.

Diplôme d'Etudes Approfondies et Diplôme d'Etudes Spécialisées

- **Gaamour A. 1993.** Validation de l'estimation de l'âge du sandre (*Stizostedion lucioperca* L.) en Camargue. **DEA Océanologie Biologique**, Université de Bretagne Occidentale, 30p.
Sujet : A la suite de 2 campagnes de marquage de sandre dans les cours d'eau camarguais afin de suivre la croissance de cette espèce, le DEA a consisté à préparer et à analyser différentes pièces calcifiées de poissons

recapturés afin de choisir une pièce et une méthode de préparation pour une estimation fiable et valide de l'âge en nombre d'années.

A. Gaamour a obtenu son DEA et s'est inscrit à l'Université de Bretagne Occidentale pour préparer une thèse de doctorat qu'il a soutenue en 1999. Il est maintenant chercheur à l'INSTM de Tunisie et dirige un laboratoire de sclérochronologie des poissons.

- **Tomás Olague J. 1994.** Validation des estimations de l'âge et du rétrocalcul de la croissance à partir des microstructures des otolithes chez les tilapias. **DEA Océanologie Biologique**, Université de Bretagne Occidentale, 31p.

Sujet : Des expériences d'élevage de 2 espèces de tilapias ouest-africains ont été conduites en Côte d'Ivoire dans le but de valider le dépôt quotidien des microstructures des otolithes. Le DEA a consisté à mettre au point une méthode de préparation standardisée des otolithes et d'interprétation des marques de croissance, puis de tester les méthodes de rétrocalcul de la taille des poissons à partir de mesures sur les otolithes.

J. Tomás Olague a obtenu son DEA et a réalisé ultérieurement un stage de préparation à une thèse sous ma direction. Ces 2 stages ont fait l'objet d'une communication orale à un symposium et de deux publications scientifiques :

- Tomás J. & Panfili J. 2000. Otolith microstructure examination and growth patterns of *Vinciguerria nimbaria* (Photichthyidae) in the Tropical Atlantic ocean. *Fisheries Research*, 46 : 131-145.
- Panfili J. & Tomás J. 2001. Validation of age estimation and back-calculation of fish length based on otolith microstructures in *Tilapia* (Pisces, Cichlidae). *Fishery Bulletin*, 99 : 139-150.

Par la suite, J. Tomás Olague s'est inscrit en thèse à l'Université de Liverpool (Royaume Uni) et a soutenu son PhD en 2001 sur la microchimie des otolithes. Puis, toujours dans cette spécialité, il a effectué un post-doc au CEMAGREF de Bordeaux et a travaillé comme contractuel à l'IMEDEA de Palma (Espagne) dans le cadre du projet européen IBACS (Q5RS-2002-01610) de 2002 à 2006. Il travaille actuellement pour le projet européen MUGIL (INCO-CT-2006-026180, 2006-2009).

- **Boussaid S. 1996.** Etude de la croissance et de la démographie de *Vinciguerria nimbaria* (Photichthyidae) de l'Atlantique tropical par analyse des microstructures des otolithes. **DEA Océanologie Biologique**, Université de Bretagne Occidentale, 33p.

Sujet : Dans le cadre du programme PICOLO conduit par l'IRD, il s'agissait de mieux comprendre la démographie et de comparer les croissances de plusieurs populations de cette proie des thons dans l'Océan Atlantique tropical. Le DEA a montré que des micro-cohortes d'individus nés au même moment formaient des bancs, dans les eaux superficielles de l'océan, qui étaient accessibles à la prédation.

S. Boussaid a obtenu son DEA mais n'a pas désiré poursuivre en thèse et est retourné travailler dans son pays d'origine (Tunisie).

- **Millour A. 1998.** Essais de validation des rythmes des dépôts des microstructures sur les otolithes de *Vinciguerria nimbaria* (Photichthyidae) de l'Atlantique tropical. **DEA Océanologie Biologique**, Université de Bretagne Occidentale, 23p.

Sujet : Dans le cadre du programme PICOLO conduit par l'IRD, les estimations d'âge de l'espèce Vinciguerria nimbaria n'étaient pas encore validées, malgré des otolithes présentant de très nettes microstructures, et ceci a fait l'objet du stage de DEA. Deux méthodes ont été utilisées, l'une s'appuyant sur le suivi de petits groupes d'individus pendant plusieurs jours et l'autre sur l'apparition des marques sur le bord des otolithes.

A. Millour a obtenu son DEA mais n'a pas souhaité continuer en thèse.

- **Rubin A. 1999.** Validation du dépôt journalier des microstructures sur les otolithes de jeunes atipas (*Hoplosternum littorale*) élevés en Guyane. **DES Océanologie Biologique**, Université Paris 6, 51p. Codirection avec D. Ponton (IRD).

Sujet : Ce sujet original consistait à étudier, pour la première fois, des otolithes de poissons chats (silures). Le DES a consisté à mettre au point une méthode de préparation des otolithes et d'interprétation des marques de croissance, puis à valider leur dépôt quotidien pour déboucher sur des applications écologiques.

Grâce à ce stage, A. Rubin a pu intégrer la 3^{ème} année d'ingénieur à l'ENSA de Rennes et devenir ingénieur halieute.

- **Thior D. 2004.** Influence de l'environnement sur les tailles et les âges de première maturité sexuelle chez des espèces de poissons estuariens. **DEA Biologie Animale**, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal, 54p. Co-direction : J.J. Albaret (IRD).

Sujet : A partir d'une base de données biologiques et d'échantillons d'espèces de poissons réalisés dans les estuaires du Saloum et de la Gambie, le but du DEA a été de calculer le cycle de reproduction de plusieurs espèces de poissons, de modéliser et de comparer les tailles de première maturité sexuelle, et de préparer les otolithes de deux espèces modèles afin de calculer les âges de première maturité en nombre de jours. Les données ont montré que peu d'espèces vivent dans des milieux de salinité supérieure à 60 psu, et qu'elles présentent des maturités précoces dans ces environnements hypersalés.

Suite au DEA, D. Thior a intégré le Département des Pêches Maritimes du Ministère des Pêches du Sénégal. Il envisage éventuellement de préparer une thèse par la suite.

Ce stage a fait l'objet d'une communication lors d'un symposium et d'une publication scientifique :

- Panfili J., Thior D., Ecoutin J.-M., Ndiaye P. & Albaret J.-J. 2006. Influence of salinity on the size at maturity for fish species reproducing in contrasting West African estuaries. *Journal of Fish Biology*, 69: 95-113.

Master 2 Recherche

- **Vanderziepe D. 2005.** Etude des mouvements de l'ethmalose (*Ethmalosa fimbriata*) dans les estuaires du Saloum (Sénégal) et de la Gambie à partir de l'analyse des rapports strontium/calcium des otolithes. **Master 2, Sciences de l'Univers et de l'Environnement**, Université Paris 6, 36p. Co-encadrement avec E. Morize & M. Labonne (IRD).

Sujet : Utiliser les rapports Sr:Ca des otolithes d'ethmalose afin d'estimer les déplacements possibles des populations de cette espèce dans deux estuaires de gradients de salinité différents, le Saloum (Sénégal) et la Gambie.

D. Vanderziepe a obtenu son Master 2 mais n'a pas souhaité continuer en thèse.

- **Lasnier C. 2006.** Influence de la salinité et de la température sur le dépôt de strontium dans les otolithes du tilapia *Sarotherodon melanotheron* (Pisces, Cichlidae) en conditions expérimentales. **Master 2, Sciences de l'Univers et de l'Environnement**, Université Paris 6. Co-encadrement avec M. Labonne (IRD).

Sujet : Valider en condition expérimentale (mésocosmes à Mbour, Sénégal) le dépôt du strontium dans les otolithes de tilapias estuariens capables de survivre dans des conditions de salinité extrême.

C. Lasnier a obtenu son Master 2 mais n'a pas pu continuer en thèse.

- **Bellec L. 2006.** Asymétrie fluctuante et hétérozygotie chez les mulets des estuaires hypersalés d'Afrique de l'Ouest. **Master 2, Sciences de l'Univers et de l'Environnement**, Université Paris 6. Co-encadrement avec J.D. Durand (IRD).

Sujet : Mesurer l'influence du stress lié aux conditions de milieux hypersalés et l'influence du niveau d'hétérozygotie sur l'asymétrie fluctuante calculée à partir des différences individuelles entre les otolithes droit et gauche.

L. Bellec a obtenu son Master 2 et une allocation de recherche MRT pour continuer en thèse au Laboratoire Arago de Banyuls (Univ. Paris 6) sur la co-évolution d'*Ostreococcus* et de ses virus dans les lagunes.

Direction scientifique de thèses

- **Malam Massou A. 1997-2002.** Thèse de doctorat (Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes). Effets de l'alimentation, du stress et de la reproduction sur les microstructures des otolithes (sagittae) de *Oreochromis niloticus* (Pisces, Cichlidae) en conditions expérimentales. Directeur HDR : G. Fontenelle (ENSAR). Soutenance : 7 juillet 2002.

Sujet : Le but était de tester les effets de différents facteurs exogènes et endogènes sur la croissance des otolithes de tilapias. Les résultats en milieu contrôlé ont montré une forte influence des rythmes alimentaires sur le dépôt des microstructures, ainsi que des perturbations lors des périodes de reproduction ou de stress induisant des marques de discontinuité. Les résultats sur les effets de la reproduction ont été novateurs puisque jamais décrits auparavant dans la littérature sur les otolithes.

La thèse a fait l'objet de 1 communication lors d'un symposium et de 3 publications scientifiques :

- Massou A.M., Panfili J., Laë R., Baroiller J.F., Mikolasek O., Fontenelle G. & Le Bail P.Y. 2002. Effects of different food restrictions on somatic and otolith growth in Nile tilapia reared under controlled conditions. *Journal of Fish Biology*, 60 : 1093-1104.
- Massou A.M., Panfili J., Le Bail P.Y., Laë R., Mikolasek O., Fontenelle G. & Baroiller J.F. 2004. Evidence of perturbations induced by reproduction on somatic growth and microincrement deposition in *Oreochromis niloticus* otoliths. *Journal of Fish Biology*, 64 : 380-398.

- Massou A.M., Le Bail P.Y., Panfili J., Laë R., Baroiller J.F., Mikolasek O., Fontenelle G. & Aupérin B. 2004. Effects of confinement stress of variable duration on the growth and microincrement deposition in the otoliths of *Oreochromis niloticus* (Cichlidae). *Journal of Fish Biology*, 64: 1253-1269.

A la suite de sa thèse, A.M. Massou a été recruté comme chercheur à l'INRAN (Institut National de la Recherche Agronomique du Niger, Niamey, Niger). Il est venu en stage dans mon laboratoire pendant 4 mois en 2002-2003 et 2 mois en 2005 lors de deux échanges scientifiques de courte durée soutenus par le Département Soutien et Formation de l'IRD.

- **Diouf Goudiaby K. 2003-2006.** Thèse de doctorat (Université Montpellier 2). Influences de la salinité sur les déplacements et la croissance des juvéniles d'un poisson ubiquiste, *Sarotherodon melanotheron* (Téléostéen, Cichlidae), dans les estuaires ouest africains. Directeur HDR : T. Do Chi (UM2). Soutenance : 15 décembre 2006.

Sujet : L'objectif était d'évaluer la réponse de certaines populations de poissons aux modifications naturelles de l'environnement durant les premiers mois de la croissance des individus et de savoir si les individus effectuent des déplacements entre les différents milieux halins, et sur quelle échelle spatiale et temporelle. L'étude portait sur deux niveaux d'intégrations des informations contenues dans les otolithes de poissons : les mesures des microstructures (taux de croissance quotidien) et la microchimie (rapport strontium/calcium en relation avec la salinité ambiante).

Les travaux ont fait l'objet de 2 communications lors de symposiums et de 2 publications scientifiques :

- Panfili J., Mbow A., Durand J.-D., Diop K., Diouf K., Thior D., Ndiaye P. & Laë R. 2004. Influence of salinity on the life-history traits of the West African black-chinned tilapia *Sarotherodon melanotheron*: comparison between the Gambia and Saloum estuaries. *Aquatic Living Resources*, 17: 65-74.
- Diouf K., Panfili J., Labonne M., Aliaume C., Tomás J. & Do Chi T. 2006. Effects of salinity on strontium:calcium ratios in the otoliths of the West African black-chinned tilapia *Sarotherodon melanotheron* in a hypersaline estuary. *Environmental Biology of Fishes*, 77: 9-20.

K. Diouf Goudiaby doit candidater en 2007 sur un poste de chercheur à l'IFAN (Institut Fondamental d'Afrique Noire) de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal).

- **Trape S. 2006-2009.** Thèse de doctorat (Université Montpellier 2). Recrutement des phases juvéniles de Mugilidae : mécanismes de colonisation, de croissance et d'adaptation dans les estuaires d'Afrique de l'ouest. Directeur HDR : T. Do Chi (UM2).

Sujet : L'objectif est de comprendre les étapes de la colonisation des mulets dans les estuaires hypersalés, sur des échelles spatiales et temporelles, en faisant appel à la biologie intégrative. Un typage génétique des différentes larves et juvéniles de Mugilidae échantillonnés le long d'un gradient de salinité dans l'estuaire du Saloum permettra de reconnaître les espèces. La date de naissance et les taux de croissance, estimés à partir des microstructures des otolithes, seront utilisés comme indicateurs des

conditions environnementales vécues par les individus et les populations, et des réponses face à des conditions d'hyperhalinité.

Le travail de thèse vient de débiter.

Comité de pilotage de thèses

- **Malam Massou A. 1997-2002.** Thèse de doctorat, ENSA de Rennes (voir précédemment).
- **Monteiro A. 1999-2002.** Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale. Biologie et pêche des aiguillettes, *Hemiramphus brasiliensis* et *Hyporhamphus unifasciatus* (Pisces, Teleostei, Hemiramphidae) de la région du Nordeste au Brésil. Directeur : C. Deniel (UBO).
- **Diouf Goudiaby K. 2003-2006.** Thèse de doctorat, Université Montpellier 2 (voir précédemment).
- **Marcante Santana da Silva F. 2004-2007.** Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale. Biologie, pêche et dynamique de la population de mullet blanc de l'Etat de Pernambuco. Directeur : J. Clavier (UBO).
- **Tine M. 2004-2007.** Thèse de doctorat, Université de Montpellier 2. Mécanismes d'acclimatation et effets sélectifs liés aux variations de salinité chez le tilapia *Sarotherodon melanotheron*. Directeur : F. Bonhomme (UM2).
- **Ouattara N. 2006-2009.** Thèse de doctorat, Université Montpellier 2. Adaptation écophysologique aux conditions d'hyperhalinité rencontrées par les tilapias *Sarotherodon melanotheron* en Afrique de l'ouest : réponses des cellules branchiales. Directeur : G. Charmantier (UM2).
- **Trape S. 2006-2009.** Thèse de doctorat, Université Montpellier 2 (voir précédemment).

Jury de thèses

- **N. Diaz. 2000.** Otolithométrie et croissance chez trois espèces de poissons tropicaux des Antilles françaises. Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, 30 novembre 2000 (Jury : Bouchon, Deniel, Do Chi, Glémarec, Louis, Panfili).
- **A. Ould Samba Ould Bilal. 2005.** Etude écobiologique d'*Oreochromis niloticus* (Téléostéen, Cichlidae) du fleuve Sénégal. Thèse de 3ème Cycle, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 14 juin 2005 (Jury : Thiaw, Panfili, Ndiaye, Ndiaye, Kone).
- **H. Bandulage Asanthi. 2006.** Etude des assemblages ichtyologiques et accumulation de métaux dans des écosystèmes lagunaires au Sri Lanka - Evaluation of metal accumulation and fish community structures in selected lagoon ecosystems of Sri Lanka. Thèse de Doctorat, Université Montpellier 1, 14 avril 2006 (Jury : Soto, Aliaume, Casellas, Gomez, Lasserre, Moreau, Panfili, Potin-Gautier).
- **K. Diouf Goudiaby. 2006.** Influences de la salinité sur les déplacements et la croissance des juvéniles d'un poisson ubiquiste, *Sarotherodon melanotheron* (Téléostéen, Cichlidae), dans les estuaires ouest africains. Thèse de Doctorat, Université Montpellier 2, 15 décembre 2006 (Jury : Aliaume, Do Chi, Harmelin-Vivien, Laë, Meunier, Ndiaye, Panfili).

3.3. Formation

La formation aux techniques de sclérochronologie que j'ai pu assurer concerne en fait trois genres de personnes : les étudiants universitaires, les chercheurs ou les techniciens d'autres instituts, et les techniciens travaillant pour l'IRD. Le Tableau 2 résume l'ensemble des stages de formations que j'ai pu encadrer. Il montre que j'ai pu former des personnes d'horizons très diversifiés et venant de pays du nord comme du sud. Malgré un nombre significatif de chercheurs du sud formé, la sclérochronologie est une discipline très peu représentée dans la communauté scientifique de ces pays (e.g. en Afrique). Ceci semble paradoxal compte tenu du fait que les pêches représentent une part importante de l'économie des pays du sud et concernent tous les types de milieux aquatiques, sans exception. Ces pêcheries seraient certainement mieux appréhendées si plus de chercheurs étaient impliqués dans le domaine de l'estimation de l'âge et de la croissance.

La formation de techniciens spécialisés pour l'IRD a concerné 4 personnes :

- **Pierre Campana (contrat CEC). 1994-1998** (IRD, Centre de Bretagne, Laboratoire de Sclérochronologie des Animaux Aquatiques). Formation à toutes les techniques de préparation des pièces calcifiées et en particulier pour la préparation et l'analyse des otolithes. Travail en collaboration pour les programmes de l'IRD.
- **Eric Dabas (contrat CEC). 1994-1999** (IRD, Centre de Bretagne, Laboratoire de Sclérochronologie des Animaux Aquatiques). Formation à toutes les techniques de préparation des pièces calcifiées et en particulier pour la préparation et l'analyse des otolithes. Travail en collaboration pour les programmes de l'IRD. E. Dabas a été recruté en 2005 comme adjoint technique de la recherche au centre IRD de Bretagne pour travailler au Laboratoire de Sclérochronologie des Animaux Aquatiques.
- **Louis Marec (technicien IRD). 1998-2000** (IRD, Centre de Bretagne, Laboratoire de Sclérochronologie des Animaux Aquatiques). Formation à toutes les techniques de préparation des pièces calcifiées et en particulier pour la préparation et l'analyse des otolithes. Travail en collaboration pour les programmes de l'IRD.
- **Khady Diop (technicienne IRD). 2001-2005** (IRD, Centre de Dakar, laboratoire de sclérochronologie de l'Unité de Recherche "Réponse Adaptative des peuplements et des populations de Poissons aux pressions de l'environnement"). Formation aux techniques de préparation et d'analyse des otolithes. Travail en collaboration pour les programmes de l'UR RAP.

Enfin, j'ai pu rédiger plusieurs postes profilés pour l'IRD (technicien, chercheur, poste d'accueil) et l'un d'entre eux a été retenu en 2005 sur un profil de "ichtyologiste spécialiste des traceurs biominéraux" à un niveau de CR1 (chargé de recherche de 1^{ère} classe). La personne recrutée travaille maintenant avec moi dans le volet "Biologie des Populations" de l'UR 070 RAP. Lors de mon affectation à l'IRD à Dakar j'ai participé au jury de recrutement de dix techniciens de recherche en 2001, dont 2 ont été recrutés pour travailler dans l'UR 070 RAP.

Tableau 2. Bilan des encadrements universitaires et de la formation de chercheurs ou de techniciens de différents instituts. Les techniciens IRD formés ne sont pas mentionnés.

Année	Type	Nom	Organisme	Pays	Durée
1993	DEA	Gaamour A.	UBO	Tunisie	7 mois
1994	Chercheur	Crivelli A.	Stat. Bio. Tour du Valat	France	2 semaines
1994	Chercheur	Ponton D.	ORSTOM	France	1 semaine
1994	Chercheur	Rojas Beltran R.	INRA	France	1 semaine
1994	DEA	Tomás J.	UBO	Espagne	7 mois
1994	Maîtrise	Colin F.	UBO	France	1 mois
1994	Maîtrise	Valdez M. E.	ORSTOM	Mexique	4 mois
1994	Technicien	Poisson F.	IFREMER	France	1 semaine
1994	Thèse	Diaz N.	Univ. Antilles-Guyane	France	1 semaine
1994	Vacataire	Tomás J.	ORSTOM	Espagne	2 mois
1995	Chercheur	Balta Camara S.	CNSHB	Guinée	3 semaines
1995	Chercheur	Lessa R. P.	Univ. Pernambuco	Brésil	3 semaines
1995	Chercheur	Niaré T.	Institut d'Etudes Rurales	Mali	3 semaines
1995	Vacataire	Tomás J.	ORSTOM	Espagne	5 mois
1996	Chercheur	Bargain R. M.	SFA	Seychelles	6 semaines
1996	Chercheur	Stéquert B.	ORSTOM	France	1 semaine
1996	Chercheur	Suwarso	RIMF/Pelfish	Indonésie	3 semaines
1996	DEA	Boussaid S.	UBO	Tunisie	5 mois
1996	Thèse	Diaz N.	Univ. Antilles-Guyane	France	3 mois
1996	Vacataire	de Kerros A.	ORSTOM	France	2 mois
1996	Vacataire	Hassani S.	ORSTOM	France	1 mois
1997	Chercheur	Lutuba Nsilulu H.	IIP	Angola	2 mois
1997	Chercheur	Suwarso	RIMF	Indonésie	2 mois
1997	Maîtrise	Lucas P.	UBO	France	1 mois
1997	Thèse	Jabeur C.	ORSTOM	France	2 mois
1997	Thèse	Malam Massou A.	ENSAR	Niger/France	48 mois
1997	Thèse	Le Corre M.	INRA	France	2 mois
1998	Chercheur	Niaré T.	Institut d'Etudes Rurales	Mali	6 mois
1998	Chercheur	Ponton D.	ORSTOM	France	3 semaines
1998	Chercheur	Zerbi A.	CNRS	Puerto Rico	3 semaines
1998	DEA	Millour A.	UBO	France	5 mois
1999	Chercheur	Mol J.	Univ. Paramaribo	Suriname	3 semaines
1999	Chercheur	Ponton D.	IRD	France	3 semaines
1999	DES	Rubin A.	Université Paris 6	France	7 mois
1999	Thèse	Monteiro A.	UBO	Brésil	3 semaines
2000	Chercheur	Bruggemann H.	Univ. Groningen	Hollande	1 semaine
2000	Chercheur	Vidy G.	IRD	France	2 semaines
2000	Maîtrise	Leciak E.	IRD	Bolivie	1 semaine
2000	Technicien	Sagliocco-Benoit M.	CEMAGREF	France	1 semaine
2000	Technicien	Sylla M.	CRODT	Sénégal	1 mois
2000	Thèse	Monteiro A.	UBO	Brésil	6 mois
2002	Chercheur	Malam Massou A.	INRAN	Niger	4 mois
2003	DEA	Thior D.	UCAD	Sénégal	11 mois
2003	Thèse	Diouf K.	UM2	Sénégal/France	42 mois
2005	Master 2	Vanderziepe C.	Université Paris 6	France	4 mois
2006	Master 2	Lasnier C.	Université Paris 6	France	5 mois
2006	Master 2	Bellec L.	Université Paris 6	France	5 mois
2006	Technicien	Diop K.	IRD	Sénégal	15 jours
2006	Vacataire	Jacquart A.	IRD-UM2	France	4 mois
2006	Chercheur	Duponchelle F.	IRD	France	1 mois
2006	Thèse	Trape S.	UM2	France/Sénégal	36 mois

4. Production et valorisation scientifiques

Bilan de la Valorisation	IF 2005	n
Publications		
Revue scientifique indexées		24
<i>Aquatic Living Resources</i>	0.905	2
<i>Bulletin Français de Pêche et Pisciculture</i>	0.780	2
<i>Canadian J. of Fisheries and Aquatic Sciences</i>	1.952	2
<i>Environmental Biology of Fishes</i>	0.907	2
<i>Fisheries Research</i>	1.160	1
<i>Fishery Bulletin</i>	1.575	2
<i>Journal of Fish Biology</i>	1.188	9
<i>Marine and Freshwater Research</i>	1.478	2
<i>Marine Ecology Progress Series</i>	2.315	1
<i>Molecular Phylogenetics and Evolution</i>	3.431	1
Revue scientifique non indexées		5
<i>Ichthyological Exploration of Freshwaters</i>		4
<i>International Revue ges. Hydrobiologie</i>		1
Edition d'ouvrages		2
Chapitres d'ouvrages		15
Colloques internationaux		
Organisation		7
Communications		18
Publications dans des actes		2
Colloques nationaux		
Organisation		1
Communications		10
Publications dans des actes		3
IF, Impact Factor (ISI Journal Citation Report)		

4.1. Publications dans des revues internationales avec comité de lecture

1. **Panfili J.**, Ximénès M.-C. & Do Chi T. 1990. Age determination of eels in the French Mediterranean lagoons using classical methods and an image analysis system. *International Revue der gesamtem Hydrobiologie*, 75 : 745-754.
2. Loubens G. & **Panfili J.** 1992. Estimation de l'âge individuel de *Prochilodus nigricans* (Teleostei, Prochilodidae) dans le Béni (Bolivie) : protocole d'étude et application. *Aquatic Living Resources*, 5 : 41-56.
3. **Panfili J.** & Ximénès M.-C. 1992. Measurements on ground or sectioned otoliths: possibilities of bias. *Journal of Fish Biology*, 41 : 201-207.
4. **Panfili J.** & Ximénès M.-C. 1994. Evaluation de l'âge et de la croissance de l'anguille européenne (*Anguilla anguilla* L.) en milieu continental : méthodologies, validation, application en Méditerranée et comparaisons en Europe. *Bulletin Français de Pêche et Pisciculture*, 335 : 43-66.
5. **Panfili J.**, Ximénès M.-C. & Crivelli A.J. 1994. Sources of variation in growth of the European eel (*Anguilla anguilla* L.) estimated from otoliths. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 51 : 506-515.

6. Loubens G. & **Panfili J.** 1995. Biologie de *Prochilodus nigricans* (Teleostei: Prochilodontidae) dans le bassin du Mamoré (Amazonie bolivienne). *Ichthyological Exploration of Freshwaters*, 6 : 17-32.
7. Stéguert B., **Panfili J.** & Dean J.M. 1996. Age and growth of yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, from the western Indian Ocean, based on otolith microstructure. *Fishery Bulletin*, 94 : 124-134.
8. Campana S.E., Thorrold S.R., Jones C.M., Günther D., Tubrett M., Longerich H., Jackson S., Halden N.M., Kalish J.M., Piccoli P., de Pontual H., Troadec H., **Panfili J.**, Secor D.H., Severin K.P., Sie S.H., Thresher R., Teesdale W.J. & Campbell J.L. 1997. Comparison of accuracy, precision and sensitivity in elemental assays of fish otoliths using the electron microprobe, proton-induced X-ray emission, and laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 54 : 2068-2079.
9. Loubens G. & **Panfili J.** 1997. Biologie de *Colossoma macropomum* (Teleostei: Serrasalminae) dans le bassin du Mamoré (Amazonie bolivienne). *Ichthyological Exploration of Freshwaters*, 8 : 1-22.
10. Duponchelle F. & **Panfili J.** 1998. Variations in age and size at maturity of female tilapia, *Oreochromis niloticus*, populations from man-made lakes of Côte d'Ivoire. *Environmental Biology of Fishes*, 52 : 453-465.
11. Loubens G. & **Panfili J.** 2000. Biologie de *Pseudoplatystoma fasciatum* et *P. tigrinum* (Teleostei : Pimelodidae) du bassin du Mamoré (Amazonie Bolivienne). *Ichthyological Exploration of Freshwaters*, 11 : 13-34.
12. Tomás J. & **Panfili J.** 2000. Otolith microstructure examination and growth patterns of *Vinciguerria nimbaria* (Photichthyidae) in the Tropical Atlantic ocean. *Fisheries Research*, 46 : 131-145.
13. Loubens G. & **Panfili J.** 2001. Biologie de *Piaractus brachipomus* (Teleostei : Serrasalminae) dans le bassin du Mamoré (Amazonie bolivienne). *Ichthyological Exploration of Freshwaters*, 12 : 51-64.
14. **Panfili J.** & Tomás J. 2001. Validation of age estimation and back-calculation of fish length based on otolith microstructures in Tilapias (Pisces, Cichlidae). *Fishery Bulletin*, 99 : 139-150.
15. Ponton D., Mol J.H. & **Panfili J.** 2001. Use of otolith microincrements for estimating the age and growth rate of young armoured catfish *Hoplosternum littorale*. *Journal of Fish Biology*, 58 : 1274-1285.
16. Massou A.M., **Panfili J.**, Laë R., Baroiller J.F., Mikolasek O., Fontenelle G. & Le Bail P.Y. 2002. Effects of different food restrictions on somatic and otolith growth in Nile tilapia reared under controlled conditions. *Journal of Fish Biology*, 60 : 1093-1104.
17. Acou A., Lefebvre F., Contournet P., Poizat G., **Panfili J.** & Crivelli A.J. 2003. Silvering of female eels (*Anguilla anguilla*) in two sub-populations of the Rhone Delta. *Bulletin Français de Pêche et Pisciculture*, 368 : 55-68.
18. Massou A.M., Le Bail P.Y., **Panfili J.**, Laë R., Baroiller J.F., Mikolasek O., Fontenelle G. & Aupérin B. 2004. Effects of confinement stress of variable duration on the growth and microincrement deposition in the otoliths of *Oreochromis niloticus* (Cichlidae). *Journal of Fish Biology*, 64: 1253-1269.
19. Massou A.M., **Panfili J.**, Le Bail P.Y., Laë R., Mikolasek O., Fontenelle G. & Baroiller J.F. 2004. Evidence of perturbations induced by reproduction on somatic growth and microincrement deposition in *Oreochromis niloticus* otoliths. *Journal of Fish Biology*, 64 : 380-398.
20. **Panfili J.**, Durand J.-D., Mbow A., Guinand B., Diop K., Kantoussan J., Thior D., Thiaw O.T., Albaret J.-J. & Laë R. 2004. Influence of salinity on life history traits of the bonga shad (*Ethmalosa fimbriata*, Pisces, Clupeidae): comparison between the Gambia and Saloum estuaries. *Marine Ecology Progress Series*, 270: 241-257.
21. **Panfili J.**, Mbow A., Durand J.-D., Diop K., Diouf K., Thior D., Ndiaye P. & Laë R. 2004. Influence of salinity on the life-history traits of the West African black-chinned tilapia *Sarotherodon melanotheron*: comparison between the Gambia and Saloum estuaries. *Aquatic Living Resources*, 17: 65-74.

22. Durand J.D., Tine M., **Panfil J.**, Thiaw O.T. & Laë R. 2005. Impact of glaciations and geographic distance on the genetic structure of a tropical estuarine fish, *Ethmalosa fimbriata* (Clupeidae, S. Bowdich, 1825). *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 36: 277-287.
23. Morales-Nin B. & **Panfil J.** 2005. Seasonality in deep-sea and tropics revisited: what can otoliths tell us? *Marine and Freshwater Research*, 56: 585-598.
24. **Panfil J.**, Durand J.-D., Diop K., Gourène B. & Simier M. 2005. Fluctuating asymmetry in fish otoliths and heterozygosity in stressful estuarine environments (West Africa). *Marine and Freshwater Research*, 56: 505-516.
25. Diouf K., **Panfil J.**, Labonne M., Aliaume C., Tomás J. & Do Chi T. 2006. Effects of salinity on strontium:calcium ratios in the otoliths of the West African black-chinned tilapia *Sarotherodon melanotheron* in a hypersaline estuary. *Environmental Biology of Fishes*, 77: 9-20.
26. Melià P., Bevacqua D., Crivelli A.J., De Leo G.A., **Panfil J.** & Gatto M. 2006. Age and growth of *Anguilla anguilla* in the Camargue lagoons. *Journal of Fish Biology*, 68: 876-890.
27. **Panfil J.**, Thior D., Ecoutin J.-M., Ndiaye P. & Albaret J.-J. 2006. Influence of salinity on the size at maturity for fish species reproducing in contrasting West African estuaries. *Journal of Fish Biology*, 69: 95-113.
28. Melià P., Bevacqua D., Crivelli A.J., **Panfil J.**, De Leo G.A. & Gatto M. 2006. Sex differentiation of the European eel in brackish and freshwater environments: a comparative analysis. *Journal of Fish Biology*, 69: 1228-1235.
29. Duponchelle F., Lino F., Hubert N., **Panfil J.**, Renno J.-F., Baras E., Torrico J.P., Dugué R. & Nuñez J. *accepté*. Environment-related life history trait variations of the red-bellied piranha, *Pygocentrus nattereri*, in two river basins of the Bolivian Amazon. *Journal of Fish Biology*.

4.2. Ouvrages

1. **Panfil J.** 1993. Estimation de l'âge individuel des poissons : méthodologies et applications à des populations tropicales et tempérées. *Collection Travaux et Documents Microfichés, ORSTOM*, Paris, 449p. + annexes.
2. **Panfil J.**, de Pontual H., Troadec H. & Wright P.J. 2002. Manual of Fish Sclerochronology. *Ifremer-Ird coedition*, Brest, France. 464 p + DVD-rom.
3. **Panfil J.**, de Pontual H., Troadec H. & Wright P.J. 2002. Manuel de Sclérochronologie des Poissons. *Coédition Ifremer-Ird*, Brest, France. 464 p + DVD-rom.

4.3. Chapitres d'ouvrages

1. Kalish J.M., Beamish R.J., Brothers E.B., Casselman J.M., Francis C., Mosegaard H., **Panfil J.**, Prince E.D., Thresher R.E., Wilson C.A. & Wright P.J. 1995. Glossary for otolith studies. In *Recent developments in fish otolith research*. Secor D.H., Dean J.M. & Campana S.E. (eds), Belle W. Baruch Library in Marine Science, no. 19. pp 723-729. University of South Carolina Press, Columbia, SC, USA.
2. McCurdy W.J., **Panfil J.**, Meunier F.J., Geffen A.J. & de Pontual H. 2002. Preparation of calcified structures. In *Manual of fish sclerochronology*. Panfil J., de Pontual H., Troadec H. & Wright P.J. (eds). pp 331-357. Ifremer-Ird coedition, Brest, France.
3. Meunier F.J. & **Panfil J.** 2002. Historical. In *Manual of fish sclerochronology*. Panfil J., de Pontual H., Troadec H. & Wright P.J. (eds). pp 23-28. Ifremer-Ird coedition, Brest, France.
4. Morales-Nin B. & **Panfil J.** 2002. Age estimation. In *Manual of fish sclerochronology*. Panfil J., de Pontual H., Troadec H. & Wright P.J. (eds). pp 91-98. Ifremer-Ird coedition, Brest, France.

5. Morales-Nin B. & **Panfili J.** 2002. Indirect validation. In *Manual of fish sclerochronology*. Panfili J., de Pontual H., Troadec H. & Wright P.J. (eds). pp 135-137. Ifremer-Ird coedition, Brest, France.
6. Morales-Nin B. & **Panfili J.** 2002. Verification. In *Manual of fish sclerochronology*. Panfili J., de Pontual H., Troadec H. & Wright P.J. (eds). pp 138-142. Ifremer-Ird coedition, Brest, France.
7. Morales-Nin B. & **Panfili J.** 2002. Observation. In *Manual of fish sclerochronology*. Panfili J., de Pontual H., Troadec H. & Wright P.J. (eds). pp 358-367. Ifremer-Ird coedition, Brest, France.
8. **Panfili J.** 2002. Extraction and conservation of calcified structures. In *Manual of fish sclerochronology*. Panfili J., de Pontual H., Troadec H. & Wright P.J. (eds). pp 317-329. Ifremer-Ird coedition, Brest, France.
9. **Panfili J.**, Meunier F.J., Mosegaard H., Troadec H., Wright P.J. & Geffen A.J. 2002. Glossary. In *Manual of fish sclerochronology*. Panfili J., de Pontual H., Troadec H. & Wright P.J. (eds). pp 373-384. Ird-Ifremer editions, Brest, France.
10. **Panfili J.** & Morales-Nin B.. 2002. Influence of shape and structure on the interpretation. In *Manual of fish sclerochronology*. Panfili J., de Pontual H., Troadec H. & Wright P.J. (eds). pp 105-110. Ifremer-Ird coedition, Brest, France.
11. **Panfili J.** & Morales-Nin B. 2002. Semi-direct validation. In *Manual of fish sclerochronology*. Panfili J., de Pontual H., Troadec H. & Wright P.J. (eds). pp 129-134. Ifremer-Ird coedition, Brest, France.
12. de Pontual H., **Panfili J.**, Wright P.J & Troadec H. 2002. General introduction. In *Manual of fish sclerochronology*. Panfili J., de Pontual H., Troadec H. & Wright P.J. (eds). pp 19-22. Ifremer-Ird coedition, Brest, France.
13. Wright P.J., **Panfili J.**, Folkvord A., Mosegaard H. & Meunier F.J. 2002. Direct validation. In *Manual of fish sclerochronology*. Panfili J., de Pontual H., Troadec H. & Wright P.J. (eds). pp 114-128. Ifremer-Ird coedition, Brest, France.
14. Wright P.J., **Panfili J.**, Morales-Nin B. & Geffen A.J. 2002. Otoliths. In *Manual of fish sclerochronology*. Panfili J., de Pontual H., Troadec H. & Wright P.J. (eds). pp 31-57. Ifremer-Ird coedition, Brest, France.
15. **Panfili J.**, Tomás J. & Morales-Nin B. 2007. Otolith microstructure in tropical fishes. In *Tropical Fish otoliths: information for assessment, management and ecology*. Green B., Begg G., Carlos G. & Mapstone B. (eds). Kluwer Academic, New York, USA, *in prep*.

4.4. Colloques internationaux

4.4.1. Organisation de colloques ou d'ateliers de travail

1. **EFAN (European Fish Ageing Network, Action Concertée FAIR PL 96.1304) : Plenary meeting and Workshops**, ORSTOM-IFREMER, LASAA, Brest, France, 26-31 May 1997 (60 participants).
2. **Second International Symposium on Fish Otolith Research and Application**, Bergen, Norway., 20-25 June 1998 (350 participants). Member of the International Scientific Committee.
3. **Manual of Fish Sclerochronology**, Authors coordination Meeting, Universitat Balears, Palma de Mallorca, Spain, 29 September - 1 October 2000 (12 participants).
4. **Manual of Fish Sclerochronology**, Authors coordination Meeting, Museum National d'Histoire Naturelle, Paris, France, 11-13 May 2001 (12 participants).
5. **Workshop "Otolith interpretation and difficulties associated with ageing tropical and deepwater species"**. James Cook University, Townsville, Australia, 10 July 2004 (50 participants).
6. **Third International Symposium on Fish Otolith Research and Application: Innovation and Implementation**, Townsville, Australia, 11-16 July 2004 (300 participants). Member of

the International Scientific Committee and Chairman of the "Age and growth estimation" session.

7. **MUGIL "Main Uses of the Grey mullet as Indicator of Littoral environmental changes"** (European commission, Specific Support Action, INCO-CT-2006-026180) : Kick-off meeting, IRD Dakar, Senegal, 2-4 November 2006.

4.4.2. Communications orales (O) et posters (P)

1. **Panfili J.**, Ximénès M.-C. & Do Chi T. 1989 (O). Age determination of eels in the French Mediterranean lagoons. *European Inland Fisheries Advisory Commission, Working Party on Eels*, Porto, Portugal, 29 May - 3 June 1989.
2. **Panfili J.**, Ximénès M.-C. & Crivelli A.J. 1993 (O). Use of tetracycline labelling of otoliths for individual growth estimation in eel (*Anguilla anguilla* L.). *Fish Otolith Research and Application International Symposium*, Hilton Head Island, South Carolina, U.S.A., 23-27 January 1993.
3. **Panfili J.** 1993 (O). Use of otoliths for stock discrimination and age estimation in Sardinellas: Proposal for a regional research project in West Africa. Colloque *Dynamique et usage des ressources en sardinelles de l'upwelling côtier du Ghana et de la Côte-d'Ivoire*, DUSRU, Accra, Ghana, 5-8 October 1993.
4. **Panfili J.** & Troadec H. 1996 (O). Laboratoire de Sclérochronologie des Animaux Aquatiques (LASAA) IFREMER-ORSTOM: presentation. *European Fish Ageing Network (EFAN) Meeting*, Ghent, Belgique, 11 - 13 January 1996.
5. **Panfili J.** 1997 (O). Computer assisted age reading in eels (*Anguilla anguilla* L.) from Mediterranean waters. *European Fish Ageing Network (EFAN): Cell 2 Workshop*, ORSTOM, Brest, France, 26 - 28 May 1997.
6. **Panfili J.** 1997 (O). The use of fluorescent age pigments for ageing fish. *European Fish Ageing Network (EFAN): Cell 5 Workshop*, ORSTOM, Brest, France, 27 - 28 May 1997.
7. **Panfili J.** 1998 (O). Interpretation of otolith structure: towards a reduced subjectivity (keynote speaker talk). *Second International Symposium on Fish Otolith Research and Application*, Bergen, Norway., 20-25 June 1998.
8. Tomás J. & **Panfili J.** 1998 (O). Otolith microstructure examination and growth patterns of *Vinciguerria nimbaria* (Photichthyidae) in the tropical Atlantic Ocean. *Second International Symposium on Fish Otolith Research and Application*, Bergen, Norway., 20-25 June 1998.
9. Suwarso & **Panfili J.** 1998 (P). Validation of microstructure deposition rates on otoliths of the small pelagic fishes of the Java sea, Indonesia. *Second International Symposium on Fish Otolith Research and Application*, Bergen, Norway., 20-25 June 1998.
10. **Panfili J.** & Troadec H. 1998 (O). Manual of Sclerochronology in Fishes. *European Fish Ageing Network (EFAN): Cell 5 Workshop and Plenary Meeting*, Porto, Portugal, 30 September - 3 October 1998.
11. **Panfili J.**, Fontenelle G., Hospital C. & Meunier F.J. 1999 (O). Age validation of the European eel (*Anguilla anguilla*) : why such a wide heterogeneity ? *European Fish Ageing Network (EFAN): Cell 4 Workshop on age validation of case species*, Heraklion, Crete, 4 - 9 October 1999.
12. **Panfili J.** & Troadec H. 2001 (O). Manual of Sclerochronology in Fishes. *Manual of Fish Sclerochronology - Authors coordination Meeting*, MNHN, Paris, France, 11 - 13 May 2001.
13. **Panfili J.**, Thior D., Ecoutin J.M. & Albaret J.J. 2003 (O). Influence of environment on size and age-at-maturity for fish species reproducing in West African estuaries. *Third International Conference of the Pan-African Fish and Fisheries Association - African Fish and Fisheries: Diversity and Utilisation*, Cotonou, Benin, 10-14 November 2003.
14. Morales-Nin B. & **Panfili J.** 2004 (O). Seasonality in deep-sea and tropics revisited: what can otoliths tell? (keynote speaker talk). *Third International Symposium on Fish Otolith Research and Application: Innovation and Implementation*, Townsville, Australia., 11-16 July 2004.
15. Massou A.M., **Panfili J.**, Le Bail P.-Y., Laë R., Mikolasek O., Fontenelle G. & Baroiller J.-F. 2004 (O). Influence of reproduction on otolith microincrement deposition. *Third*

International Symposium on Fish Otolith Research and Application: Innovation and Implementation, Townsville, Australia., 11-16 July 2004.

16. **Panfili J.**, Durand J.D., Diop K., Gourène B. & Simier M. 2004 (P). Fluctuating asymmetry in fish otolith shape and heterozygosity in stressful estuarine environments (West Africa). *Third International Symposium on Fish Otolith Research and Application: Innovation and Implementation*, Townsville, Australia., 11-16 July 2004.
17. Diouf Goudiaby K., **Panfili J.**, Labonne M., Aliaume C., Tomás J. & Do Chi T. 2006 (P). Could otolith Sr:Ca ratio be used as a tool for discriminating fish populations? Example of application for *Sarotherodon melanotheron* populations (Pisces, Cichlidae) in the hypersaline estuary of Saloum (Senegal). *International Conference on Coastal Ecosystems: Towards an Integrated Knowledge for an Ecosystem Approach for Fisheries*, Campeche, México, 26-29 June 2006.
18. **Panfili J.** 2006. IRD research institute, RAP research unit and its interest for Mugil research. MUGIL (European commission, Specific Support Action, INCO-CT-2006-026180), Kick-off meeting, IRD Dakar, Senegal, 2-4 November 2006.

4.4.3. Publications dans des actes de colloque

1. **Panfili J.** 1995. Use of otoliths for stock discrimination and age estimation in Sardinellas: Proposal for a regional research project in West Africa. In : *Dynamique et usage des ressources en sardinelles de l'upwelling côtier du Ghana et de la Côte-d'Ivoire*, Bard F.X. & Koranteng K.A. (eds), Colloques et Séminaires ORSTOM, Paris, 119-127.
2. Bard F.X., Amon Kothias J.B., **Panfili J.** & Hervé A. 1996. Unusual occurrence of "green tunas" in Abidjan landings, 1993-1995. *Collection Scientific Papers ICCAT*, 45(3) : 126-129.

4.5. Colloques nationaux

4.5.1. Organisation de colloques ou d'ateliers de travail

1. **La variable "âge" et l'étude des stratégies de croissance et de reproduction des populations de tilapias**, ORSTOM, Brest, France, 18-19 décembre 1996 (30 participants).

4.5.2. Communications orales (O) et posters (P)

1. **Panfili J.** 1989 (P). Examen des structures de croissance saisonnières de l'otolithe de l'anguille européenne (*Anguilla anguilla* L.) par analyse d'images. Journées "50 ans de recherches sur l'anguille", Musée Océanographique, Monaco, novembre 1989 - janvier 1990.
2. **Panfili J.**, Ximénès M.-C., Crivelli A.J. & Do Chi T. 1991 (O). Validation de l'âge de l'anguille européenne dans les lagunes méditerranéennes françaises, Colloque National *Tissus durs et âge individuel des Vertébrés*, Bondy, France, 4-6 mars 1991.
3. **Panfili J.** 1991 (P). Analyse chimique des zones de croissance des otolithes de poissons. Colloque National *Tissus durs et âge individuel des Vertébrés*, Bondy, France, 4-6 mars 1991.
4. **Panfili J.** & Loubens G. 1991 (P). Mise en évidence des structures de croissance pour l'estimation de l'âge individuel des poissons. Exemple de *Prochilodus nigricans* (Prochilodidae, Characiforme). Colloque National *Tissus durs et âge individuel des Vertébrés*, Bondy, France, 4-6 mars 1991.
5. **Panfili J.** 1996 (O). Estimation de l'âge et de la croissance des populations naturelles de Tilapias (revue bibliographique). *La variable "âge" et l'étude des stratégies de croissance et de reproduction des populations de tilapias*, ORSTOM, Brest, France, 18 - 19 décembre 1996.

6. **Panfili J.**, Tomás J., Hem S. & Cecchi P. 1996 (O). Validation des estimations de l'âge à partir des microstructures des otolithes chez les Tilapias. *La variable "âge" et l'étude des stratégies de croissance et de reproduction des populations de tilapias*, ORSTOM, Brest, France, 18 - 19 décembre 1996.
7. **Panfili J.** & Diop K. 2002 (O). Utilisation des données d'âge individuel des poissons en écologie : applications dans RAP. *Atelier de travail RAP*, Présentation des travaux en cours et des résultats attendus, Dakar, Sénégal, 28-30 janvier 2002.
8. **Panfili J.**, Durand J.D. & Diop K. 2006 (O). Modification extrême des traits de vie des populations récentes de *Sarotherodon galilaeus* (Cichlidae) dans des lacs de retenue au Mali. *Troisièmes Rencontres de l'Ichtyologie en France (RIF 2006)*, Paris, France., 28-31 mars 2006.
9. Diouf Goudiaby K., **Panfili J.**, Labonne M., Aliaume C., Tomás J. & Do Chi T. 2006 (O). Effets de la salinité sur le rapport strontium-calcium des otolithes de *Sarotherodon melanotheron* (Pisces, Cichlidae) dans l'estuaire hypersalé du Saloum (Sénégal). *Troisièmes Rencontres de l'Ichtyologie en France (RIF 2006)*, Paris, France., 28-31 mars 2006.
10. Ouattara N., Nègre-Sadargues G., **Panfili J.**, D'Cotta H., Baroiller J.F., Charmantier G. 2007 (P). Adaptation to extreme salinity in Tilapia. *Troisièmes rencontres Ecologie et Comportement*, CNRS Montpellier, France, 13-16 mars 2007.

4.5.3. Publications dans des actes de colloque

1. **Panfili J.** 1992. Analyse chimique des zones de croissance des otolithes de poissons. *In : Tissus durs et âge individuel des Vertébrés*, Colloque National, Bondy, France, 4-6 mars 1991. Baglinière J.L., Castanet J., Conand F. & Meunier F.J. (eds), Colloques et Séminaires ORSTOM-INRA, 143-147.
2. **Panfili J.** & Loubens G. 1992. Mise en évidence des structures de croissance pour l'estimation de l'âge individuel des poissons. Exemple de *Prochilodus nigricans* (Prochilodidae, Characiforme). *In : Tissus durs et âge individuel des Vertébrés*, Colloque National, Bondy, France, 4-6 mars 1991. Baglinière J.L., Castanet J., Conand F. & Meunier F.J. (eds), Colloques et Séminaires ORSTOM-INRA, 335-340.
3. **Panfili J.**, Ximénès M.-C., Crivelli A.J. & Do Chi T. 1992. Validation de l'âge de l'anguille européenne dans les lagunes méditerranéennes françaises (Camargue) : résultats préliminaires. *In : Tissus durs et âge individuel des Vertébrés*, Colloque National, Bondy, France, 4-6 mars 1991. Baglinière J.L., Castanet J., Conand F. & Meunier F.J. (eds), Colloques et Séminaires ORSTOM-INRA, 119-127.

4.6. Projets internationaux

1. EFAN (European Fish Ageing Network) : European Commission, Action Concertée FAIR PL 96.1304, 1997-2001 (35 participant laboratories). Représentant pour l'IRD.
2. TACADAR (Towards accreditation and certification of age determination of aquatic resources) : European Commission, Concerted Action Q5CA-2002-01891, 2002-2006 (29 participant laboratories). Représentant pour l'IRD.
3. MUGIL (Main Uses of the Grey mullet as Indicator of Littoral environmental changes) : European commission, Specific Support Action, INCO-CT-2006-026180, 2006-2009 (10 participant laboratories). Coordinateur.

4.7. Rapports scientifiques principaux

1. **Panfili J.** 1988. Etude des populations d'anguilles (*Anguilla anguilla* L.) des lagunes du Languedoc et de Camargue : méthodes de lecture d'âge et comparaisons des croissances. DEA, Université des Sciences et Techniques du Languedoc - CEMAGREF Montpellier, 24p, annexes.
2. **Panfili J.** & Stéquert B. 1993. Rapport de mission pour le Symposium International "Fish Otolith Research and Application". Hilton Head Island, South Carolina, U.S.A., 23-27 janvier 1993. 7p. + annexes.
3. Tomás J. & **Panfili J.** 1995. Comparaison de la croissance de trois populations d'*Oreochromis niloticus* de Côte d'Ivoire (Solomougou, Korokara, Sambakaha). Rapport interne LASAA dans le cadre du Programme Petits-Barrages. 7p. + annexes.
4. **Panfili J.** 1998. Campagne océanographique Vinci98 (12-24 février 1998) : compte-rendu de mission. Rapport interne Orstom-Lasaa, 12p. + annexes.
5. Pontual de H., **Panfili J.**, Millner R. & Geffen A. 1998. Otolith microchemistry in Fishes: application to stock discrimination and temperature record. EFAN report 1-98, Wright P.J. (ed), The present status of otolith research and applications. Proceedings of a workshop held at Orstom, Brest, France, 27-29 May 1997. pp 32-53.
6. **Panfili J.** 1998. The use of fluorescent age pigments for ageing fish. EFAN report 1-98, Wright P.J. (ed), The present status of otolith research and applications. Proceedings of a workshop held at Orstom, Brest, France, 27-29 May 1997. pp 59-65.
7. Mosegaard H., Morales-Nin B., Weidman C., Geffen A., Arneri E., Millner R., **Panfili J.** & Folkvord A. 1998. Otolith thin-section preparation: some problems and new developments. EFAN report 2-98, Wright P.J. (ed), Otolith preparation and analysis. Proceedings of a workshop held at University of Bergen, Norway, 18-20 June 1998. pp 11-22.
8. Moksness E. et al. 2006. Towards accreditation and certification of age determination of aquatic resources (TACADAR Q5CA-2002-01891): final report. European Commission, 85p.
9. **Panfili J.**, Aliaume C., Berrebi P., Casellas C., Chang C.W., Diouf P.S., Durand J.D., Flores Hernández D., García de León F., Lalèyè P., Morales-Nin B., Tomás J., Tzeng W.N., Vassilopoulou V., Wang C.H., Whitfield A.K. 2007. State of the art on Mugil research. European Commission, INCO-CT-2006-026180 – MUGIL, 21p. + Annex.

II. Projets scientifiques et prospective

L'exposé de mes projets scientifiques et de ma prospective sera précédé d'un rappel bibliographique sur les otolithes, car même si des synthèses (Panfili et al. 2002a) ou des actes de symposiums (Begg et al. 2005, Campana 2005) ont été publiés récemment, la production scientifique consacrée aux recherches sur les otolithes et à leurs applications reste extrêmement prolifique. Cette synthèse bibliographique sera en partie extraite d'un chapitre (Panfili et al. 2007) d'un nouvel ouvrage sur les otolithes des poissons tropicaux qui devrait être publié en 2007 (Green et al. 2007).

Les propriétés des otolithes sont incomparables dans le monde animal et les applications qui en découlent sont immenses (Fossum et al. 2000, Panfili et al. 2002a, Begg et al. 2005, Campana 2005). L'exposé sera axé dans une première partie sur la structure de l'otolithe et sa calcification, puis sur les facteurs endogènes et exogènes qui régulent sa croissance. La prospective que je décrirai dans un second temps sera orientée sur l'utilisation de la microchimie des otolithes dans le but de suivre les déplacements et/ou les migrations des individus et des populations dans leur environnement naturel afin de répondre à des questions écologiques ou de gestion des populations. Enfin la troisième partie démontrera l'intérêt du couplage des études s'appuyant à la fois sur l'otolithométrie et sur d'autres disciplines, comme l'étude des traits d'histoire de vie et la génétique des populations, pour comprendre les réponses des populations de poissons face aux conditions environnementales qu'elles rencontrent et pour répondre aux questions fondamentales sur la biologie et l'écologie des Téléostéens. Ce projet scientifique consacré à l'utilisation des otolithes comme indicateur dans les recherches en biologie intégrative sera illustré par le nouveau projet européen que je coordonne, MUGIL.

1. Les otolithes, intégrateurs de l'histoire individuelle des poissons

Les otolithes sont des formations calcaires extracellulaires de l'oreille interne des Téléostéens dont la fonction essentielle est d'assurer l'équilibre, mais qui participent aussi à l'audition (voir pour synthèse Wright et al. 2002). Chez les Ostéichthyens, il y a trois otolithes par oreille, la *sagitta*, le *lapillus* et l'*asteriscus*, renfermés dans trois sacs otiques (otosacs) remplis d'un liquide aux propriétés de viscosité spéciales, l'endolymphe. Les otolithes des trois paires diffèrent en taille et en forme pour chaque espèce (Fig. 6) mais sont symétriques (droite-gauche), excepté chez les poissons plats. Les différences morphologiques des otolithes tendent à refléter la phylogénie et le développement, bien qu'il y ait une variation considérable inter- et intra- spécifique. Chez la plupart des espèces, la *sagitta* est le plus grand des otolithes et c'est donc le plus utilisé dans les études de sclérochronologie (Wright et al. 2002).

Les otolithes sont constitués de carbonate de calcium fixé sur une matrice organique (Degens et al. 1969, Watabe et al. 1982, Morales-Nin 1987) d'où leur étymologie grecque "pierre de l'oreille". A partir d'un noyau primaire, l'otolithe s'accroît par addition de couches concentriques de protéines et de carbonate de calcium, généralement déposées selon un rythme quotidien, et qui forment des microstructures visibles à fort grossissement (Fig. 6c-h). Les cellules de l'otosac sont responsables de la synthèse des protéines et de la sécrétion du calcium dans l'endolymphe (Payan et al. 2004a). Selon Romanek & Gauldie (1996), la bio-calcification de l'otolithe est liée à la composition

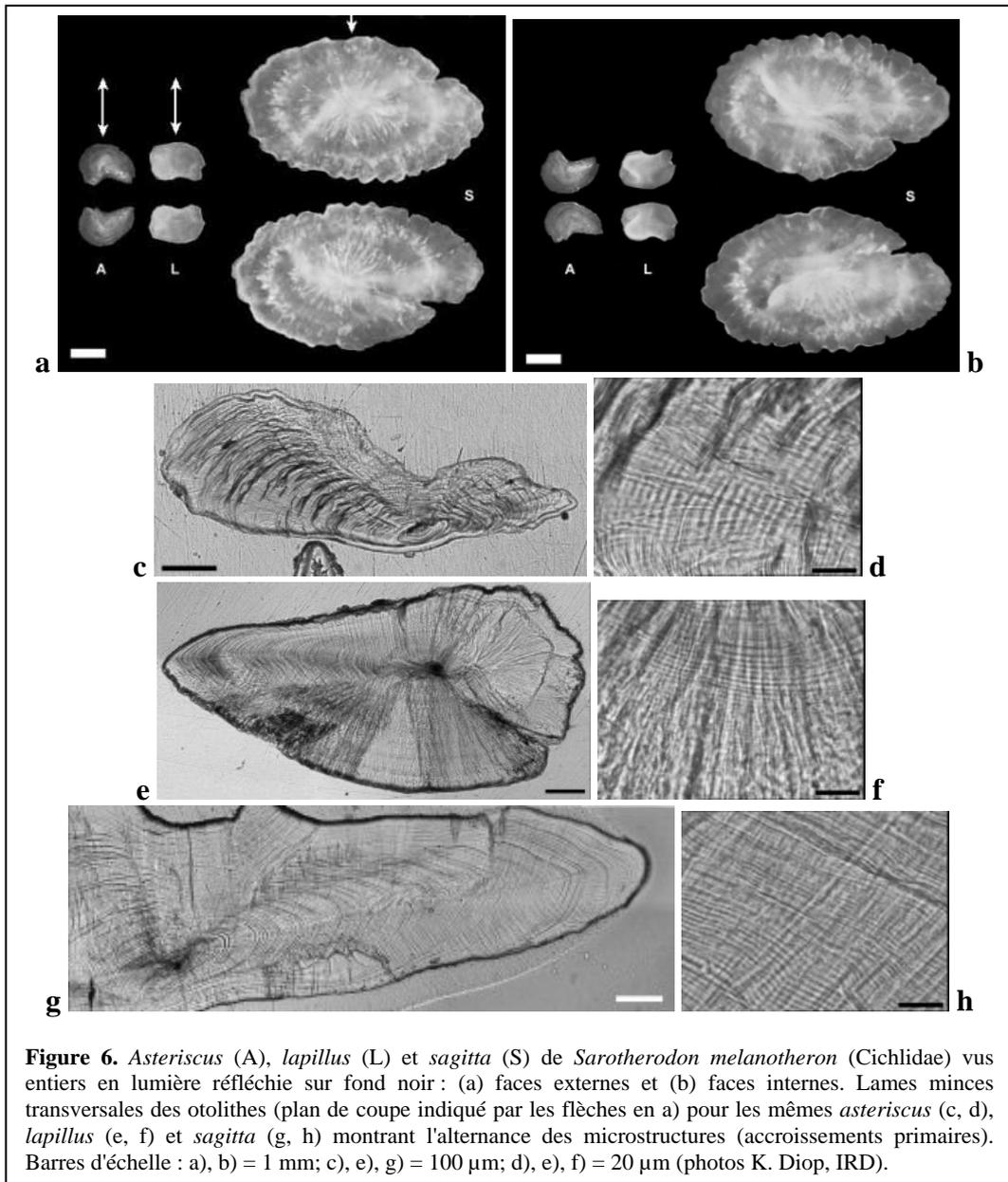


Figure 6. *Asteriscus* (A), *lapillus* (L) et *sagitta* (S) de *Sarotherodon melanotheron* (Cichlidae) vus entiers en lumière réfléchi sur fond noir : (a) faces externes et (b) faces internes. Lames minces transversales des otolithes (plan de coupe indiqué par les flèches en a) pour les mêmes *asteriscus* (c, d), *lapillus* (e, f) et *sagitta* (g, h) montrant l'alternance des microstructures (accroissements primaires). Barres d'échelle : a), b) = 1 mm; c), e), g) = 100 µm; d), e), f) = 20 µm (photos K. Diop, IRD).

chimique de l'endolymphe. Payan et al. (1999) ont suggéré que le dépôt de CaCO_3 était initié sur la face proximale de l'otolithe provoquant par la suite des hétérogénéités de croissance suivant différents plans. La régulation de la formation des microstructures est contrôlée à la fois par des facteurs endogènes et exogènes (voir après).

L'originalité des **otolithes** est qu'ils sont de **véritables intégrateurs de l'histoire individuelle des poissons** renfermant plusieurs niveaux d'information temporelle (Panfili et al. 2002a) : des microstructures journalières (accroissements primaires, Fig. 6c-h), des macrostructures saisonnières et annuelles, et des discontinuités structurales dues à différents stress. D'autres types de cycles temporels enregistrés ont été mentionnés dans la

littérature comme les cycles lunaires (Pannella 1980, Linkowski 1996) ou les marques secondaires aperiodiques (Karlou Riga 2000, Wright et al. 2002).

Les otolithes sont également susceptibles d'incorporer un certain nombre d'éléments chimiques issus du milieu ambiant et constituent de ce fait de véritables traceurs biologiques des individus et des populations (Campana 1999, Thresher 1999, Campana et al. 2000, Campana & Thorrold 2001). Même si l'incorporation d'éléments chimiques du milieu environnant est plus complexe qu'il n'y paraît, les applications concernant leur utilisation peuvent permettre de mieux comprendre le fonctionnement des populations de poissons et la réponse des individus et des populations aux pressions de l'environnement (Campana & Thorrold 2001).

1.1. Facteurs endogènes et exogènes régulant la croissance de l'otolithe

L'otolithe est donc principalement composé de carbonate de calcium précipité dans une matrice protéique à partir du liquide endolymphatique de l'oreille interne. Le calcium atteint primitivement l'endolymphe à partir du plasma sanguin (Kalish 1989, 1990, Wright et al. 1992). La calcification de l'otolithe est limitée dans sa vitesse par le nombre de sites de nucléation produits par la matrice insoluble (Crenshaw 1982) et par les conditions physico-chimiques à sa surface. Le CaCO_3 est principalement cristallisé sous forme d'aragonite (Carlström 1963) à cause de l'action de la matrice organique dans laquelle les acides aminés acides prédominent (Degens et al. 1969). L'aragonite forme des microcristaux

d'environ $0,3 \mu\text{m}$ groupés en prismes radiaux d'épaisseur variable orientés du centre vers la face externe (Fig. 7). A des intervalles réguliers, les microcristaux montrent des discontinuités dans lesquelles la matière organique prédomine, même si certains peuvent traverser ces discontinuités

(Morales-Nin 1987).

La matrice protéique est déposée sous forme d'un réticulum lâche qui est pénétré ultérieurement par les cristaux et qui prédomine dans les discontinuités en formant des réseaux de fibres épaisses (Morales-Nin 1987). Cette matrice organique est composée de protéines hydrosolubles (PHS) et de protéines insolubles (PIS). Les deux fractions sont riches en acides aminés acides. La proportion totale de matrice organique dans l'otolithe est faible, entre 0,1 et 10% du poids (Borelli et al. 2001), et peut varier suivant la croissance et avec l'âge. Une partie des PHS a des capacités de fixation du calcium et joue un rôle très important dans la minéralisation de l'otolithe (Asano & Mugiya 1993). Elle

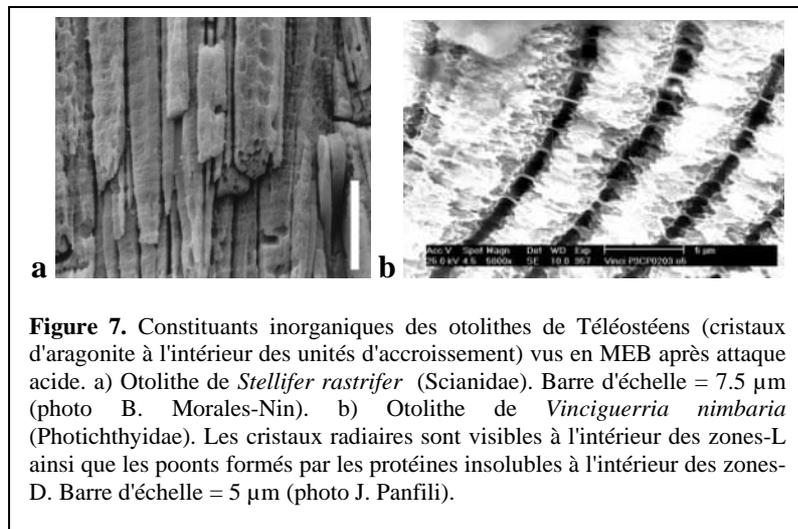


Figure 7. Constituants inorganiques des otolithes de Téléostéens (cristaux d'aragonite à l'intérieur des unités d'accroissement) vus en MEB après attaque acide. a) Otolithe de *Stellifer rastriifer* (Scianidae). Barre d'échelle = $7,5 \mu\text{m}$ (photo B. Morales-Nin). b) Otolithe de *Vinciguerria nimbaria* (Photichthyidae). Les cristaux radiaux sont visibles à l'intérieur des zones-L ainsi que les ponts formés par les protéines insolubles à l'intérieur des zones-D. Barre d'échelle = $5 \mu\text{m}$ (photo J. Panfili).

contient une glycoprotéine qui régule probablement le taux d'accrétion en agissant comme un inhibiteur de la calcification (Wright 1991). La matrice de l'otolithe la moins hydrosoluble est composée d'une protéine de type collagénique, appelée Otoline-1 (Degens et al. 1969, Murayama et al. 2002). Cette dernière est aussi un facteur significatif contrôlant la forme de l'otolithe (Degens et al. 1969, Dunkelberger et al. 1980, Gaudie 1991, Payan et al. 1999). Les PHS représentent 1,1% en poids de l'otolithe de *Oreochromis niloticus* alors que le total des protéines contribue pour 2,3% (Asano & Mugiya 1993). Les PHS sont composées d'une petite fraction incluant un complexe de polysaccharides avec une faible capacité de fixation du calcium, alors que les autres protéines de poids moléculaire plus léger ont une forte capacité de fixation (Sasagawa & Mugiya 1996). Cette matrice protéinacée soluble est donc capable de réguler le taux de dépôt du minéral (Wright 1991).

Le taux de production de matrice insoluble est le déterminant ultime de la vitesse de calcification de l'otolithe (Saitoh & Yamada 1989). Chez certaines espèces cette matrice, et surtout les protéines insolubles qui la constituent, peuvent être mises en évidence de façon très nette après décalcification en microscopie électronique à balayage (Fig. 8). Le réseau protéique constituant la trame de l'otolithe est alors très visible, montrant à la fois des constituants présents au niveau de chaque accroissement primaire (Fig. 8a) mais aussi des plaques protéiques traversant l'otolithe de part en part et créant probablement des champs de croissance particuliers (Fig. 8b-c). En lumière photonique, les champs protéiques donnent une impression de fractures dans l'otolithe et peuvent induire des erreurs dans l'interprétation. Ces fractures ne sont qu'apparentes et correspondent en fait à une réalité structurale. Ces observations montrent que la matrice protéique a un rôle structural majeur dans la croissance de l'otolithe, permettant une orientation du plan de la croissance à tout moment, et intégrant les centres accessoires de croissance en redynamisant l'accroissement de façon directionnelle.

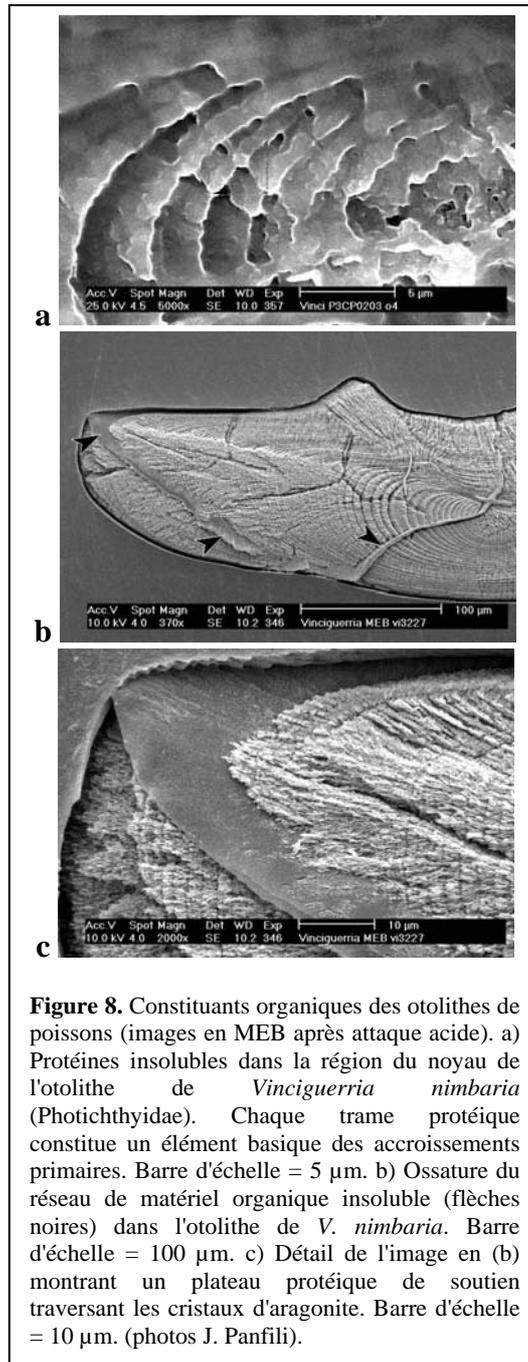


Figure 8. Constituants organiques des otolithes de poissons (images en MEB après attaque acide). a) Protéines insolubles dans la région du noyau de l'otolithe de *Vinciguerria nimbaria* (Photichthyidae). Chaque trame protéique constitue un élément basique des accroissements primaires. Barre d'échelle = 5 µm. b) Ossature du réseau de matériel organique insoluble (flèches noires) dans l'otolithe de *V. nimbaria*. Barre d'échelle = 100 µm. c) Détail de l'image en (b) montrant un plateau protéique de soutien traversant les cristaux d'aragonite. Barre d'échelle = 10 µm. (photos J. Panfili).

Les accroissements primaires (microstructures) des otolithes des poissons sont formés par dépôts successifs de couches riches en minéral et de couches riches en matrice protéique autour du noyau (Wright et al. 2002) : la microstructure est une structure bipartite composée d'une partie plus minérale, de 0,4 à 10 μm de largeur, translucide et d'une autre plus organique, de largeur inférieure à 1 μm , opaque (respectivement zone-L et zone-D). L'épaisseur totale d'une microstructure est donc comprise entre 1 μm et 12 μm et elle est principalement constituée par la zone-L.

Pour résumer, la base de la croissance de l'otolithe reste circadienne (voir précédemment et après), et se fait par apposition de microstructures journalières à partir d'un noyau (ou plusieurs) de calcification. La formation d'une zone-L riche en carbonate de calcium est influencée par un transport actif intracellulaire d'ions calcium (Mugiya 1986) et de protons à travers le saccule (Payan et al. 1997, Payan et al. 1999) qui, en retour, est sensible à la concentration de calcium plasmatique et au pH (Wright et al. 1992, Payan et al. 1997). L'incorporation des cristaux de carbonate de calcium est structurée par la matrice protéique de l'otolithe (Payan et al. 1999). La sécrétion de la matrice protéinée varie quotidiennement, avec un pic pendant la formation de la zone-D (Mugiya 1987b, Edeyer et al. 2000). La production du substratum de la matrice protéique et de la protéine soluble inhibitrice doit aussi avoir un rôle dans la limitation du taux d'accrétion du minéral durant la formation de la zone-L.

1.1.1. Facteurs endogènes de régulation

La formation quotidienne des microstructures est contrôlée par un rythme circadien endogène. Ceci a pu être démontré chez l'espèce *Tilapia mossambica* à la suite de manipulations expérimentales de facteurs exogènes (photopériode et alimentation) montrant que ces facteurs seuls ne pouvaient expliquer la formation des microstructures (Taubert & Coble 1977). Cependant, peu de choses sont connues actuellement sur la régulation endogène et le contrôle endocrine de la formation de l'otolithe. Les premières études ont souligné l'influence de l'œstradiol (une hormone provoquant l'hypercalcémie) sur la déposition ou la résorption du calcium dans l'otolithe du poisson rouge *Carassius auratus* (Mugiya 1977, 1978). Par la suite, il a été suggéré que la croissance de l'otolithe pouvait être sous contrôle d'une neuroprotéine (Gauldie & Nelson 1988), même si jusqu'à présent la démonstration d'une régulation hormonale a seulement été démontrée chez *Carassius auratus* (Shinobu & Mugiya 1995). Récemment il a été montré que chez le porte-épée d'eau douce *Xiphophorus helleri* la croissance de l'otolithe, et plus précisément l'incorporation de calcium, est régulée nerveusement, car elle cesse lorsque l'on sectionne le nerf vestibulaire (Anken et al. 2002).

La succession des stades de développement ontogéniques (éclosion, flexion, métamorphose, etc.) conduit à des changements structuraux de l'otolithe, tels que la formation d'un sillon (*sulcus acusticus*) et l'accroissement du degré de concavité (Lagardère et al. 1995), ou encore l'apparition de centres de croissance accessoires qui redirigent la croissance globale de l'otolithe (Zhang & Runham 1992a, Panfili & Tomás 2001), ou la formation de discontinuités associées aux étapes de métamorphose (Gjøsaeter 1987). Les phases de reproduction sont également à la base de marques de croissance particulières dans l'otolithe (Pannella 1980, Massou et al. 2004b).

1.1.2. Facteurs exogènes de régulation

Le dépôt des microstructures des otolithes est influencée par l'alternance des cycles nycthémeraux (jour-nuit) agissant comme un facteur de forçage sur leur formation. L'influence prépondérante de la photopériode a été démontrée pour le *Tilapia mossambica* chez lequel les accroissements étaient déposés quotidiennement pour les poissons élevés sur un cycle de 24h jour-nuit tandis que cette périodicité déviait d'un cycle journalier sous d'autres régimes de cycles de lumière (Taubert & Coble 1977). Des résultats similaires ont été trouvés chez des espèces tempérées, *Fundulus heteroclitus* (Radtko & Dean 1982), *Oncorhynchus mykiss* (Mugiya 1987a) et *Salmo salar* (Wright 1991). Le dépôt de la fraction aragonitique dans l'unité microstructurale semble avoir lieu pendant la phase lumineuse (Zhang & Runham 1992b, Tanabe et al. 2003), puis décline au crépuscule et redémarre à l'aurore, même s'il est probable qu'il y ait des variations suivant les espèces (Mugiya 1984, Edeyer et al. 2000). Le mécanisme à partir duquel la photopériode influence le dépôt quotidien des microstructures des otolithes doit encore être élucidé (Boeuf & Le Bail 1999).

La température agit également comme une variable de forçage primaire sur la formation des microstructures. Chez l'espèce tropicale *Lepomis cyanellus*, une diminution de la température de l'eau de 25°C à 10°C entraîne une cessation du dépôt des microstructures (Taubert & Coble 1977). L'effet de la température, reflété par la périodicité et la largeur des microstructures, peut néanmoins avoir des répercussions sur plus d'une journée (Gutiérrez & Morales-Nin 1986). Cependant, tant que le niveau de température du milieu ambiant est suffisant pour maintenir la croissance (Campana & Neilson 1985), la température est un facteur moins important que la photopériode pour maintenir le dépôts des microstructures, comme cela a pu être montré chez *Tilapia mossambica* élevé à température constante (Taubert & Coble 1977). Des marquages d'otolithes induits par des chocs thermiques ont démontré comment une forte et soudaine variation de température peut perturber la croissance de l'otolithe (Volk et al. 1994). Gaudie & Nelson (1990) ont proposé un système de régulation de l'anhydrase carbonique pour la formation de l'otolithe, système chimique qui aurait la température comme principal facteur externe de contrôle.

La fréquence de l'alimentation a été rapportée comme influençant la périodicité des accroissements chez diverses espèces avec un effet à la fois sur la largeur des accroissements et leur périodicité. Les changements dans les horaires de prise alimentaire n'entraînent pas de changements dans la formation de la partie cristalline des microstructures, comme montré chez *Tilapia nilotica* (Tanaka et al. 1981), mais le cycle d'alimentation peut provoquer la formation d'accroissements sub- ou supra- journaliers si de jeunes poissons sont nourris moins d'une fois par jour (Neilson & Geen 1985). A l'opposé plusieurs prises alimentaires quotidiennes n'ont pas augmenté le nombre de microstructures des otolithes de larves de *Chanos chanos* (Tzeng & Yu 1992). Finalement une période de jeûne provoque des taux de croissance plus faibles mais pas un arrêt des dépôts si l'individu a suffisamment de réserves énergétiques (Campana & Neilson 1985, Massou et al. 2002). Enfin le changement de ration alimentaire peut avoir un effet sur la structure de l'otolithe : chez les juvéniles de *Mycteroperca microlepis* du Golfe du Mexique, les individus alimentés avec de plus faibles rations ont eu des otolithes relativement plus gros que ceux nourris avec des rations plus élevées (Strelcheck et al. 2003).

A ma connaissance peu d'études ont essayé de montrer qu'un autre paramètre physico-chimique, comme par exemple la salinité, avait un effet sur la formation des microstructures des otolithes. La salinité elle-même n'est pas susceptible d'entraîner des

modifications mais ce facteur, combiné par exemple avec des variations de rations alimentaires, provoque des dépôts non journaliers, montrant ainsi qu'il pourrait y avoir un effet physiologique combiné (Hales & Hurley 1991). Une désoxygénation de l'eau est supposée provoquer une rupture dans la fréquence des dépôts des microstructures ou même une légère résorption (Mugiya & Uchimura 1989) mais les processus physiologiques qu'elle entraîne ont un effet général sur le métabolisme de l'animal, pouvant être rapidement létaux.

Des changements dans la structure de l'otolithe sous la forme de discontinuités ("checks" sensu Kalish et al. 1995) ont été enregistrés lorsque les individus ont subi un ou plusieurs stress. Des marques de stress associées à des manipulations de poissons ont été identifiées dans les otolithes d'*Oreochromis niloticus* (Panfili & Tomás 2001) et d'*Etropus crossotus* (Reichert et al. 2000). Ces marques indiquent généralement un arrêt de croissance représenté par une discontinuité de structure régulière et opaque à la lumière (Pannella 1980). Il a été suggéré que l'arrêt de croissance en condition de stress était induit par une rupture dans le métabolisme du calcium mais sans provoquer de résorption de la partie calcique de l'otolithe (Campana 1983). Le stress modifie également les balances ioniques et protéiniques dans l'endolymphe jusqu'au dépôt de la discontinuité structurale (Payan et al. 2004b).

Au niveau d'échelle supérieur, les macrostructures de l'otolithe, la régulation de la formation de ces marques annuelles n'est pas encore bien comprise, bien que l'on affirme communément que les marques saisonnières sont liées à la saisonnalité de la croissance corporelle et aux facteurs cycliques de l'environnement. Il est globalement admis que les variations saisonnières dans la formation de l'otolithe sont reliées à des changements physiologiques cycliques pour le poisson tels que le démarrage de l'activité de reproduction ou l'accélération de la croissance somatique au printemps en zone tempérée (Johnson 1983, Fowler 1990). Une proposition alternative est que la physiologie de la formation de l'otolithe est indépendante des autres processus somatiques et reproductifs du poisson, et qu'elle est une réponse physiologique indépendante des variations environnementales (Loubens 1978, Fowler & Doherty 1992). Des évidences pour ou contre ces hypothèses prennent généralement la forme de corrélations dans la chronologie des différents processus, mais des corrélations usuellement trop faibles et insuffisantes pour permettre à l'une ou l'autre des hypothèses d'être rejetée.

En conclusion, les études sur la formation des otolithes et les facteurs régulant leur croissance sont encore trop peu nombreuses, les recherches étant souvent axées sur les applications directes de l'utilisation des otolithes pour les études de biologie et d'écologie. Actuellement il n'existe à ma connaissance que deux équipes à travers le monde travaillant sur la physiologie de la croissance de l'otolithe, l'une française dirigée par P. Payan à Nice (Université de Nice - Sophia Antipolis) et l'autre japonaise dirigée par Y. Takagi à Hokkaido (Université d'Hokkaido). Leurs résultats sont significatifs mais posent encore énormément de questions quant à la régulation de la croissance de l'otolithe. Des recherches dans ce domaine sont certainement nécessaires pour mieux appréhender l'interprétation structurale des otolithes des Téléostéens. Pourtant ce n'est pas dans ce domaine que je développerai ma prospective, mais plutôt sur des applications et sur l'intégration du modèle "otolithe" avec d'autres disciplines.

1.2. Microchimie de l'otolithe et étude des déplacements des poissons

Pour les études en écologie, les milieux aquatiques sont très particuliers car ils sont la plupart du temps difficilement accessibles et donc la représentativité de leur échantillonnage peut être soumise à caution. Ceci est d'autant plus vrai pour les espèces animales, et en particuliers les vertébrés Téléostéens, capables d'effectuer de larges déplacements dans leur environnement naturel. Les chercheurs et les gestionnaires des populations testent en permanence des outils leur permettant d'évaluer et de mesurer précisément ces déplacements (Gillanders 2005). Historiquement les techniques de marquage direct (externe) ont semblé prometteuses car elles pouvaient donner une information directe sur les mouvements des individus, mais avec deux limitations majeures : 1) l'extrapolation du déplacement, qui ne pouvait se faire qu'entre l'endroit précis du marquage et celui de la recapture, sans savoir exactement le trajet parcouru par les individus entre ces deux dates ; 2) le faible taux de recapture, voisin de 5% en moyenne mais souvent bien inférieur, obligeant les chercheurs à des expérimentations à grande échelle souvent coûteuses pour des chances de réussites difficilement prévisibles. Depuis une dizaine d'année et les avancées technologiques en électronique, de nouveaux types de marques ont permis d'accéder à d'autres données, et le plus souvent d'enregistrer directement des paramètres environnementaux lors des mouvements individuels (Sibert & Nielsen 2001, Metcalfe et al. 2002), ou même de tracer les déplacements grâce à de la télémétrie électronique (e.g. Zeller 1999, Sibert & Nielsen 2001) ou encore plus récemment grâce à des données satellitaires (mais surtout pour les mammifères). Cependant ces marques possèdent encore des limites importantes représentées par leur taille, et donc une utilisation réservée aux individus de grande taille, ou par leur coût ou par la difficulté des expérimentations qu'elles impliquent.

Je distinguerai ici la notion de "déplacement" et celle de "migration", ou encore de "homing". Pour clarifier la suite de l'exposé, le terme "déplacement" sera réservé aux mouvements des individus dans leur milieu, quelque soit la distance, mais intervenant pour des espèces dont le cycle de vie ne dépend pas de ce comportement. Le terme "migration" sera réservé aux espèces dont le cycle de vie impose des mouvements de grande ampleur entre des masses d'eau différentes, ou entre des milieux très contrastés, et qui sont obligées de les réaliser pour leur survie : c'est le cas pour toutes les espèces amphihalines diadromes, anadromes (e.g. saumon, alose, omble...) ou catadromes (e.g. anguille, mulot...). Enfin le terme "homing" sera utilisé pour caractériser les espèces dont les individus se reproduisent précisément dans la zone où ils sont nés.

Il y a une vingtaine d'années, la découverte de l'incorporation d'éléments chimiques issus de l'environnement dans les otolithes a ouvert de nouvelles voies de recherche, en particulier pour ce qui concerne les déplacements des poissons, et la littérature sur le sujet n'a cessé d'augmenter (Begg et al. 2005). En effet, comparés à d'autres carbonates biogéniques, les otolithes sont d'une exceptionnelle pureté et leur microchimie va s'intéresser à des variations à micro-échelle des concentrations élémentaires (de Pontual & Geffen 2002). D'autre part ils sont particulièrement adéquats pour ce genre d'études car ils présentent deux propriétés fondamentales (Campana 1999) : ils sont métaboliquement inertes et ils grandissent de façon continue depuis la naissance et durant tout le cycle de vie en intégrant les variations de la croissance. Trente et un éléments chimiques ont été détectés au total dans les otolithes d'un large éventail d'espèces, mais dans des concentrations très variables (Campana 1999). Les otolithes sont composés à plus de 99% de CaCO_3 , et quatre grandes familles d'éléments chimiques se distinguent en fonction de

leur concentration : les éléments majeurs (Ca, C, O), les éléments mineurs ayant des concentrations supérieures à 100 ppm (Na, Sr, K, S, N, Cl, P), les éléments traces ayant des concentrations inférieures à 100 ppm (Mg, Si, Zn, B, Fe, Hg, Mn, Ba, Ni, Cu, Al, Br, Li), et enfin les éléments ultra-traces ayant des concentrations inférieures à 1 ppm (Pb, As...). La plupart de ces éléments ne peuvent être étudiés qu'au moyen de techniques analytiques extrêmement sensibles. Leur dosage dépend donc de toute une batterie d'outils technologiques issus de la chimie analytique et de la géochimie, mais dans la suite de l'exposé je ne rentrerai pas dans le détail des techniques et de leurs limites (voir pour revue de Pontual & Geffen 2002). Par contre toutes les études les plus récentes (après les années 2000), soulignent la nécessité d'établir la correspondance entre la teneur élémentaire des otolithes et celle de l'eau dans laquelle évoluent les individus (Elsdon & Gillanders 2003, 2005b, 2006a) car c'est le milieu ambiant, et non l'alimentation, qui influence l'incorporation dans l'otolithe (Walther & Thorrold 2006).

Je pense que les applications de la microchimie des otolithes restent l'une des voies majeures des futures recherches sur les déplacements des poissons dans leur environnement (Gillanders 2005). Je choisirai comme milieux d'études les écosystèmes de transition, i.e. les milieux estuariens *s.l.* (estuariens, lagunes, deltas...), car ils représentent des zones d'une importance écologique considérable au regard des espèces qui les fréquentent et qui y effectuent des déplacements ou des migrations (voir Chapitre II.2.). D'autre part ces environnements possèdent souvent des caractéristiques physico-chimiques contrastées, ou susceptibles de varier temporellement et spatialement, et présentent ainsi de remarquables sites pour les dosages chimiques du fait de ces variations. Sous réserve de l'utilisation d'outils analytiques adéquats, les applications de la microchimie de l'otolithe peuvent apporter des avancées considérables sur les réponses à certaines questions scientifiques concernant l'écologie et/ou la gestion des populations estuariennes :

- les milieux estuariens sont-ils le siège de déplacements important des individus et des populations ?
- dans ces milieux, quelle est la fréquence globale des espèces se déplaçant et sur quelle échelle spatiale et temporelle ?
- parmi les groupes écologiques des espèces estuariennes (marin, estuarien strict, dulçaquicole) quelles sont les proportions relatives des individus et des populations se déplaçant ?
- dans les estuaires hypersalés (salinité > 60), quelles sont les réponses des espèces en termes de déplacements spatio-temporels ?
- la notion de homing peut-elle être généralisable à un ensemble d'espèces (marines ou autres), de communautés ou de groupes fonctionnels particuliers dans les systèmes estuariens ?

Les réponses à ces questions pourraient assurément être abordées en utilisant les applications de la microchimie des otolithes. Elles engendreraient simultanément des outils indispensables aux gestionnaires des populations, et en particulier dans les pays du sud. Je développerai ci-après deux axes de recherche, l'un sur le couplage de différentes techniques de dosages élémentaires pour l'étude des déplacements et l'autre sur la compréhension des phénomènes de homing grâce à la chimie des otolithes, mais de nombreux autres champs d'applications pourraient être développés dans ce domaine. Je donnerai également des exemples d'environnements ou de modèles pour lesquels ces questions pourraient être justifiées. Et enfin j'évoquerai le contexte scientifique, en terme de collaborations, dans lequel ces recherches pourraient voir le jour.

Rapports élémentaires, isotopes stables et études des déplacements

Le strontium (Sr) incorporé dans les otolithes a été largement utilisé pour reconstruire l'histoire environnementale vécue par les individus (e.g. Kalish 1990, Secor & Rooker 2000). Plus précisément il est largement reconnu que le niveau de Sr de l'otolithe reflète le niveau de salinité dans l'eau (voir pour revue Secor & Rooker 2000). Les différences de concentrations de Sr dans l'otolithe, et plus particulièrement du rapport Sr:Ca, ont été utilisées pour caractériser les mouvements entre le milieu marin et le milieu dulçaquicole (Fig. 9), par exemple au niveau des estuaires, car la concentration de Sr dans l'eau de mer est huit fois supérieure à celle de l'eau douce (Gillanders 2005). Ces niveaux sont directement reflétés dans les otolithes (Fig. 9). Cependant les corrélations positives

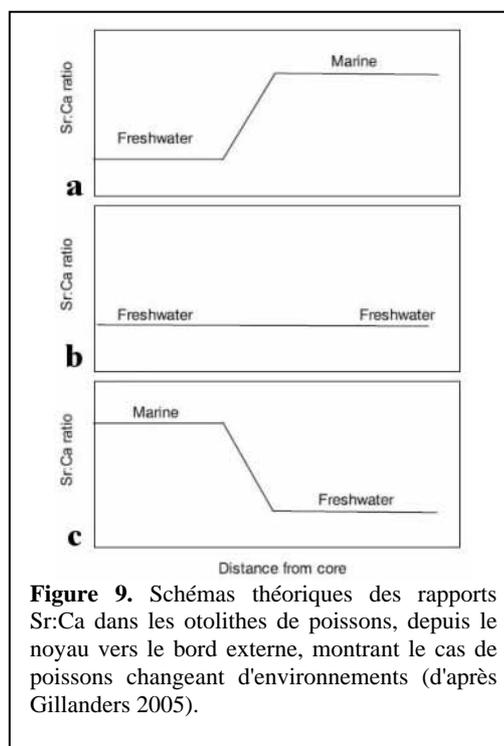


Figure 9. Schémas théoriques des rapports Sr:Ca dans les otolithes de poissons, depuis le noyau vers le bord externe, montrant le cas de poissons changeant d'environnements (d'après Gillanders 2005).

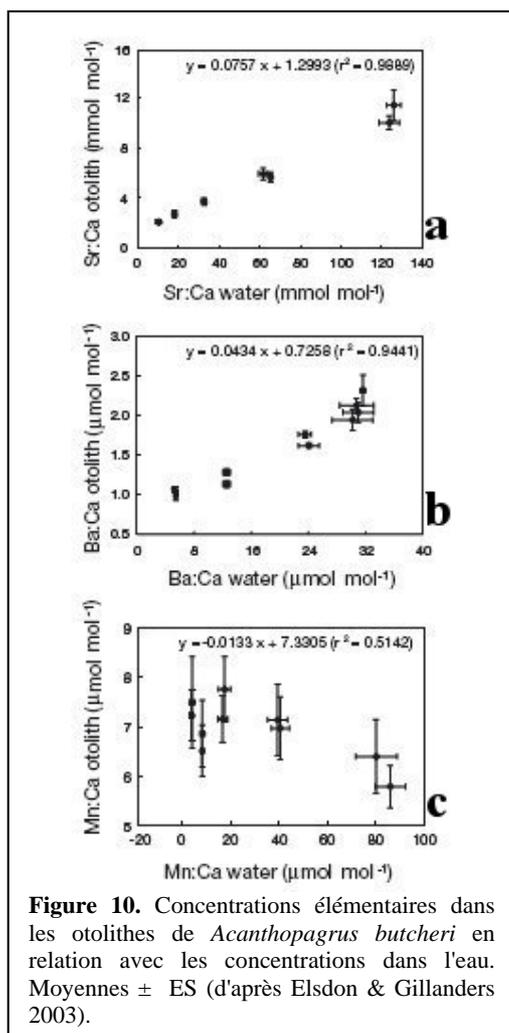


Figure 10. Concentrations élémentaires dans les otolithes de *Acanthopagrus butcheri* en relation avec les concentrations dans l'eau. Moyennes ± ES (d'après Elsdon & Gillanders 2003).

entre le Sr:Ca et la salinité ambiante n'ont pas toujours été significatives et il est toujours préférable d'associer les valeurs de concentrations de Sr dans l'otolithe avec celles mesurées directement dans l'eau environnante pour interpréter les résultats (Martin et al. 2004, Gillanders 2005, Walther & Thorrold 2006). Ceci est d'autant plus vrai que de fortes valeurs de Sr ont pu également être mesurées dans des milieux d'eau douce (Kraus & Secor 2004). D'autre part, même si l'association de valeurs de concentrations élémentaires sur l'otolithe et dans l'eau semblent être fortement corrélées (Fig. 10), les études les plus récentes ont montré que des mesures multi-élémentaires (e.g. Sr:Ca, Ba:Ca...) donnaient des informations beaucoup plus précises. Le choix des éléments dosés est primordial (Fig. 10) : Sr et baryum (Ba) sont de très bons candidats alors que le manganèse (Mn) par exemple ne donne pas de réponse positive (Elsdon & Gillanders 2003). Les éléments permettant de caractériser au mieux les déplacements entre les milieux de salinités différentes ne semblent pas

nombreux, et on peut citer principalement Sr et Ba (Elsdon & Gillanders 2005a, McCulloch et al. 2005, Elsdon & Gillanders 2006b). Cependant d'autres éléments bivalents pourraient certainement être testés pour reconstruire les salinités.

Une autre approche récente mise en évidence pour évaluer les migrations des poissons entre des milieux de transition consiste à utiliser les isotopes du Sr, et le rapport $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ (Gillanders 2005). En effet ce rapport isotopique n'est pas influencé par la température, la salinité ou des paramètres biologiques mais par les apports des bassins versants, la valeur de $^{87}\text{Sr}:^{86}\text{Sr}$ étant la même à travers les océans depuis 400 000 ans (Gillanders 2005). Des applications de l'utilisation de ce rapport ont été données par exemple pour différencier les stades de migration des saumons (Kennedy et al. 2002).

Les nouvelles voies de recherche pour reconstruire les déplacements et/ou les migrations des individus entre des milieux de salinités différentes doivent être recherchées dans le couplage des différentes méthodes d'analyse décrites précédemment (rapports multi-éléments et rapports isotopiques du Sr). Un bon exemple d'application de ce genre d'approche a été donné par les travaux des australiens sur le barramundi, une espèce estuarienne à forte valeur commerciale (Fig. 11).

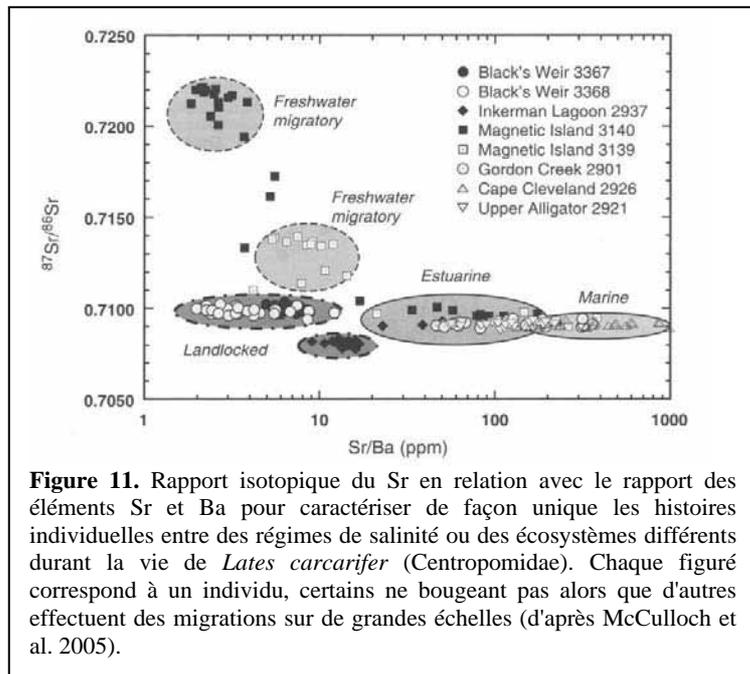


Figure 11. Rapport isotopique du Sr en relation avec le rapport des éléments Sr et Ba pour caractériser de façon unique les histoires individuelles entre des régimes de salinité ou des écosystèmes différents durant la vie de *Lates carcarifer* (Centropomidae). Chaque figuré correspond à un individu, certains ne bougeant pas alors que d'autres effectuent des migrations sur de grandes échelles (d'après McCulloch et al. 2005).

Je propose dans ce cadre une étude à large échelle régionale (Afrique de l'ouest) pour des estuaires ayant des caractéristiques contrastées (Fig. 12) : celui du Saloum (Sénégal)

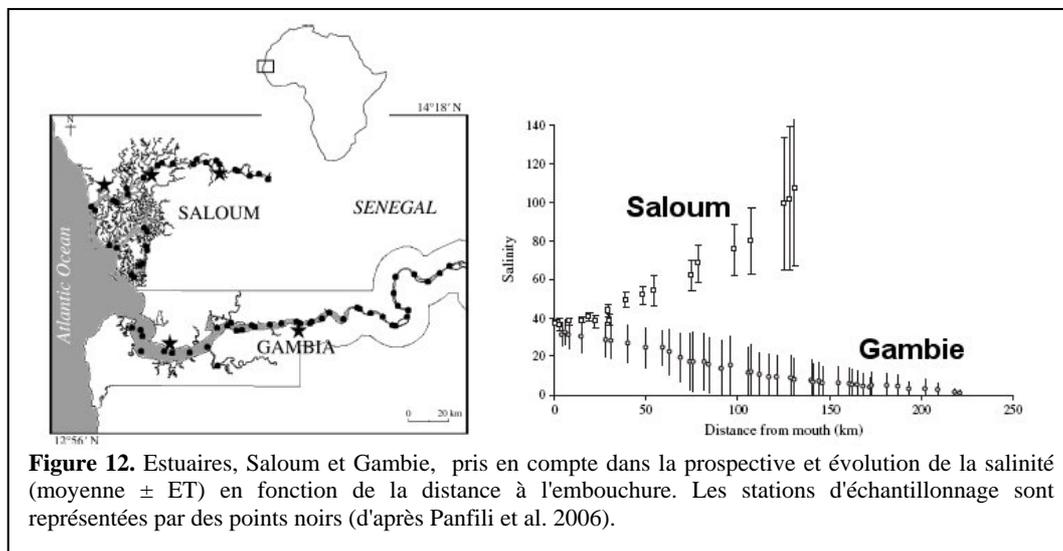


Figure 12. Estuaires, Saloum et Gambie, pris en compte dans la prospective et évolution de la salinité (moyenne \pm ET) en fonction de la distance à l'embouchure. Les stations d'échantillonnage sont représentées par des points noirs (d'après Panfili et al. 2006).

étant hypersalé et inversé, celui de la Gambie (Gambie) ayant un fonctionnement normal. La première étape du travail consistera à réaliser une cartographie élémentaire (spatiale et temporelle) des deux estuaires sur les concentrations des éléments énumérés précédemment (Sr, Ba, ^{87}Sr , ^{86}Sr). Les dosages de ces éléments seront également entrepris sur les otolithes de plusieurs espèces fréquentant ces estuaires et ayant des comportements et des modes de vie très différents, choisies parmi les familles des Clupeidae (pélagiques effectuant des déplacements importants), des Mugilidae (migrateurs catadromes ou se déplaçant à large échelle), des Cichlidae (sédentaires ou effectuant de faibles déplacements), des Géréidae (au comportement probablement catadrome) et des Sciaenidae (au comportement relativement peu connu dans ces milieux). Tous les aspects de migrations et/ou de déplacements pourront être pris en compte puisque les deux estuaires possèdent tous les gradients de salinité possibles, y compris hypersalés (> 60 et jusqu'à 130), et leurs bassins versants sont très différents. Une interprétation fine des résultats permettra d'aborder les réponses à l'ensemble des questions posées : quelles sont les échelles spatiales et temporelles des déplacements et sur quelles fréquences ? Quelles sont les proportions relatives des individus et des populations se déplaçant ? Les réponses sont-elles les mêmes dans les zones hypersalées ?

Incorporation d'éléments traces et homing

Les hypothèses sur un "homing généralisé" des espèces de poissons ont été émises dans les années 90 par Cury (1994) : partant du constat que les tortues marines, les saumons et de nombreux autres animaux marins ou aquatiques présentent des stratégies de reproduction similaires dans lesquelles les adultes retournent pour se reproduire dans l'endroit où ils sont nés, une généralisation est proposée avec des applications pour les espèces de poissons marins. Cette hypothèse séduisante présuppose que l'adaptation d'une population dans un environnement particulier n'est pas due aux adaptations individuelles mais à la diversité des individus imprégnés dès leur naissance. Cette notion de homing pourrait être particulièrement intéressante à tester dans les milieux de transition comme les estuaires, dont les caractéristiques physico-chimiques varient dans l'espace et dans le temps.

Je pense que la chimie des otolithes représente un outil unique pour tester ces hypothèses de homing généralisé. D'ailleurs un certain nombre de travaux issus de la littérature a démontré que le dosage de certains éléments présents dans le noyau de l'otolithe (e.g. Sr, Ba, Mn) pouvait permettre de caractériser à posteriori les lieux de naissance des individus (Thorrold et al. 2001). Ces dosages élémentaires spécifiques permettent en général de reclasser correctement les individus nés dans des conditions environnementales identiques pour 60 à 90% des cas (e.g. Thorrold et al. 2001, Sohn et al. 2005, Veinott & Porter 2005, Ashford et al. 2006).

Je propose donc de tester la notion de homing généralisé dans les mêmes milieux, les estuaires ouest africains (Fig. 12), et pour les mêmes modèles que ceux cités précédemment. Les discriminations des lieux de naissance se feraient en étroite relation entre les dosages dans l'eau et dans le noyau des otolithes en utilisant dans un premier temps les dosages élémentaires (Ca, Sr, Ba, Mn...) et les isotopes (^{87}Sr , ^{86}Sr). Dans une deuxième phase d'autres éléments traces (Mg, Li, Cu, Zn) ou des terres rares pourraient être testés et utilisés. L'objectif final sera d'évaluer si la notion de homing peut-elle être généralisable à un ensemble d'espèces estuariennes (d'origine marines ou autres), aux communautés ou à des groupes fonctionnels particuliers.

Contexte scientifique de réalisation

Le contexte scientifique présidant à la réalisation des actions de recherche proposées sur la chimie des otolithes est particulièrement favorable à l'Université Montpellier 2 (UM2), en liaison avec les partenaires universitaires de pays du sud (Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal). A l'UM2, plusieurs laboratoires sont susceptibles de participer à ce projet :

- l'UMR 5119 Ecolag (Ecologie Lagunaire), à laquelle je suis rattaché, qui possède une plateforme technique permettant de traiter et préparer les otolithes avant les analyses chimiques (inclusion, découpe et ponçage des lames minces) ;
- l'équipe ISTEEM (UMR 5243) qui possède les moyens analytiques (ICPMS, LA-ICPMS) permettant de réaliser les dosages élémentaires (cette équipe vient d'acquérir un ICPMS mono-collecteur ultrasensible et de haute performance) ;
- l'UMR 5554 (ISEM) qui est spécialisée sur les analyses chimiques de fossiles et qui possède un Micromill[®] permettant de réaliser des micro-prélèvements à la surface des matériaux et qui serait particulièrement utile pour effectuer les prélèvements au cœur du noyau des otolithes afin d'y réaliser le dosage des éléments en solution.

Un autre partenaire national potentiel est représenté par le LASAA (centre IRD de Bretagne) qui possède une certaine expertise dans le domaine de la chimie des otolithes et avec qui je collabore depuis toujours. Au niveau du sud, le partenariat s'effectuera naturellement avec l'Institut Fondamental d'Afrique Noire (UCAD, Dakar) avec qui les contacts sont établis depuis très longtemps et qui participe à des actions de recherche commune et à des encadrements de stagiaires et de thésards avec moi. Le terrain d'expérimentation, ainsi que les espèces considérées, constituent la base de mes activités depuis 2001. Par la suite, de nouveaux chantiers pourraient être ouverts de l'autre côté de l'Atlantique, dans les lagunes mexicaines, à titre comparatif. Cette dernière hypothèse de travail fait déjà l'objet du programme de coopération internationale dont je fais partie (voir Chapitre I.2.2.).

2. Les otolithes et la biologie intégrative

Dans les zones côtières, la situation d'interface des estuaires et des lagunes, qui reçoivent à la fois les influences de la mer et des rivières, conduit à des changements importants des conditions écologiques à différentes échelles spatiales et temporelles. Les effets combinés des changements climatiques et de l'activité humaine ont des conséquences diverses sur ces écosystèmes, notamment en modifiant les variations naturelles de leurs fonctions, au risque de mettre à l'épreuve leur résilience (Whitfield 2005). Bien que géographiquement limités, ces milieux constituent des zones aquatiques extrêmement productives. Leur conservation est l'un des enjeux majeurs pour l'humanité. Dans ce but, les chercheurs, les écologistes et les gestionnaires tentent d'identifier des indicateurs biologiques qui pourraient être utilisés pour l'évaluation de l'intégrité des zones estuariennes et lagunaires. Ces indicateurs sont choisis parmi les espèces vivantes ou parmi les paramètres physico-chimiques, ou issus d'une combinaison des deux, sachant qu'il est extrêmement délicat de trouver un indicateur universel. En termes d'indicateurs, les réponses des individus et des populations aux perturbations naturelles

et/ou anthropiques sont plus lentes que les réponses de certains paramètres physico-chimiques. Cependant les organismes sont de meilleurs intégrateurs, ce qui rend la considération de leurs réponses très pertinente pour évaluer les changements survenus dans les écosystèmes (Elliott et al. 2003). Cette thématique de recherche s'appuie sur l'analyse de l'acclimatation ou des diverses adaptations au stress (Elliott et al. 2003) qui constitue un enjeu actuel des recherches, tant sur le plan national (Rochet 2000, Laroche et al. 2002, Bierne et al. 2003) qu'international (Trexler & Travis 2000, Fromentin & Fonteneau 2001, Whitfield & Elliott 2002), afin de comprendre les réponses des individus et des populations de poissons à des perturbations d'origines variées.

Particularité des espèces cosmopolites

Parmi les espèces de poissons vivant dans les écosystèmes estuariens, très peu sont capables de fréquenter une grande diversité de régions. C'est pourtant le cas de l'une

d'entre elles, *Mugil cephalus*, un Mugilidae ubiquiste qui se retrouve à l'échelle mondiale dans pratiquement toutes les zones estuariennes tropicales mais aussi dans les zones tempérées (Fig. 13). Cette espèce, et celles de la même famille, sont importantes pour les pêcheries, particulièrement dans les pays du sud : les données FAO de 2004 relèvent des captures

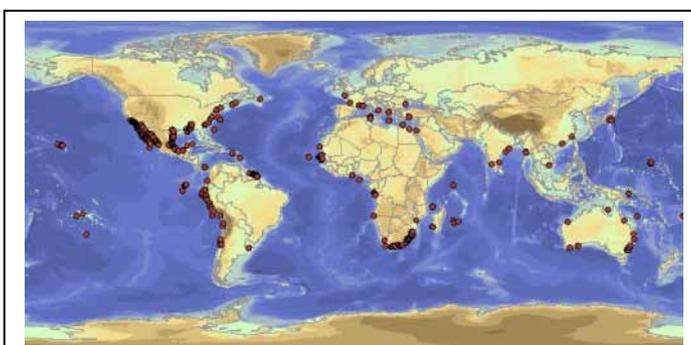


Figure 13. Aire de distribution de *Mugil cephalus* (Mugilidae).
Source : www.fishbase.org

mondiales supérieures à 190 000 tonnes pour *M. cephalus*. Cosmopolite, cette espèce peut fréquenter des environnements plus ou moins pollués, ou encore des milieux de salinité très variable, de l'eau douce aux milieux hypersalés (salinité > 60). Elle est capable de vivre et de se reproduire dans des environnements très divers mais les mécanismes écophysiologiques ou adaptatifs mis en œuvre pour y parvenir restent à être identifiés plus précisément. Les lieux de reproduction sont localisés en mer, bien que peu connus, même si les adultes peuvent passer leur vie entière dans les estuaires ou les lagunes (Cardona 2000). Un comportement de migration catadrome a donc lieu pendant la saison de reproduction et correspond au mouvement des adultes matures depuis les zones d'alimentation (généralement les estuaires) jusqu'en mer (Ibanez-Aguirre & Gallardo-Cabello 2004). Certains traits d'histoire de vie et caractéristiques physiologiques ont déjà fait l'objet d'études indépendantes dans plusieurs régions du monde mais en utilisant des techniques d'investigation variées (Ibanez-Aguirre & Gallardo-Cabello 1996, Cardona 1999, Chang et al. 2000, Nordlie 2000, McDonough et al. 2003, Smith & Deguara 2003). Les liens entre les traits d'histoire de vie sur une plus large échelle n'ont jamais été pris en considération. Pour ce qui concerne la génétique, jusqu'à aujourd'hui il n'existe pas de phylogénie des Mugilidae à l'échelle mondiale mais seulement pour les espèces vivant en sympatrie à une échelle régionale (Autem & Bonhomme 1980, Lee et al. 1995, Papisotiropoulos et al. 2002, Rossi et al. 2004, Turan et al. 2005). Plusieurs

questions se posent quant à l'adaptation et la présence de l'espèce *M. cephalus* face à des situations très contrastées :

- quelles sont les relations phylogénétiques des populations à l'échelle mondiale ?
- quel est le degré de connectivité de ces populations (flux géniques et migration) ?
- au niveau individuel, quels sont les gènes les plus sollicités dans l'acclimatation (entre autres à l'hyperhalinité et à la pollution) ?
- au niveau populationnel, quelles sont les variations des traits de vie (croissance et reproduction) impliquées pour le maintien dans les différents milieux ?
- quelles sont les répercussions des adaptations physiologiques à l'hyperhalinité ou à la pollution sur les traits de vie ?

Apport des otolithes et de la biologie intégrative

Les informations extraites des otolithes, en termes de croissance ou de marques environnementales (microchimie), couplées à des données de génétique des populations et à d'autres données sur les traits de vie ou les biomarqueurs, apporteraient nécessairement des réponses aux questions listées précédemment. On atteint ici le domaine de la biologie intégrative. C'est donc dans cette direction que je formulerai ma dernière prospective de recherche. Le couplage des recherches sur les otolithes avec d'autres disciplines de la biologie conduirait à proposer de nouveaux indicateurs individuels et populationnels, et par la même occasion de l'état des environnements dans lesquels vivent et se reproduisent les individus.

En particulier, l'espèce *Mugil cephalus* sera choisie comme modèle d'étude et, de par son aire de répartition extrêmement étendue, comme sentinelle de l'état d'écosystèmes spécifiques. Les chantiers choisis devront avoir de ce fait une répartition très large. Les otolithes seront utilisés comme marqueurs de croissance, en mettant au point une méthode d'estimation de l'âge universelle utilisable dans tous les environnements fréquentés par cette espèce. De la même façon il faudra veiller à standardiser une méthode de caractérisation des traits de reproduction de l'espèce pour que les résultats soient comparables à l'échelle mondiale. La microchimie des otolithes sera utilisée pour étudier les déplacements et les migrations de l'espèce à travers différents environnements (voir précédemment, prospective Chapitre II.1.2.). Les études de génétique des populations auront deux objectifs, réaliser une phylogéographie de l'espèce à l'échelle mondiale et caractériser le degré de connectivité des populations et les échanges géniques. Dans un premier temps il sera nécessaire de choisir les outils moléculaires pour réaliser ces analyses (enzymes, caryotypes, marqueurs nucléaires ADN, marqueurs mitochondriaux...). Enfin un certain nombre de biomarqueurs seront testés pour caractériser les réponses des individus et des populations face à des environnements contrastés. Les résultats devront être injectés dans une base de données globale permettant d'effectuer des traitements statistiques à grande échelle.

Contexte scientifique de réalisation

Le nouveau projet européen que je coordonne, MUGIL (Main Uses of Grey mullet as Indicator of Littoral environmental changes, INCO-CT-2006-026180, 2006-2009) représente le contexte scientifique de cette prospective et répond en tous points aux attendus et aux questions listés précédemment. Il s'appuie donc sur l'espèce *Mugil cephalus* comme modèle biologique et a pour objectifs de construire un réseau d'observation de ce modèle

à l'échelle mondiale et de coordonner des recherches conduisant à utiliser cette espèce comme un indicateur de changement d'intégrité des écosystèmes estuariens et lagunaires. Les recherches porteront à la fois sur les variations dans les traits d'histoire de vie, la génétique des populations et les réponses physiologiques. Le projet concerne quatre régions mondiales (Europe, Afrique, Asie, Amérique) et implique des collaborateurs européens (France, Espagne, Grèce) et de pays tropicaux (Mexique, Sénégal, Afrique du Sud, Taiwan). Dans chaque zone d'étude (France, Espagne, Grèce, Mexique, Sénégal, Afrique du Sud, Taiwan), il se base sur des approches comparatives impliquant des zones estuariennes très contrastées (e.g. estuaire saumâtre vs hypersalé, lagune non polluée vs polluée) et englobe les quatre thématiques suivantes : 1) génétique des populations, 2) traits de vie (croissance et reproduction), 3) migration et 4) réponses physiologiques à la salinité et aux polluants. Il se propose également de générer une base de données globale sur cette espèce en liaison avec la base internationale FishBase (www.fishbase.org). Enfin, une approche synthétique vise à rassembler les différents paramètres et/ou indicateurs pour rendre compte de l'état du milieu ou, ultérieurement, de changements rapides de cet état.

Dix laboratoires collaborent à ce projet : Institut de Recherche pour le Développement (coordinateur, France), CNRS - Universités Montpellier 1 & 2 (France), World Wide Fund for Nature (Sénégal), Universidad Autónoma de Campeche - Centro EPOMEX (Mexique), Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (Mexique), Université d'Abomey Calavi (Bénin), Universidad Islas Baleares (Espagne), Institute of Fisheries Science - National Taiwan University (Taiwan), Hellenic Centre for Marine Research (Grèce) et South African Institute for Aquatic Biodiversity (Afrique du Sud). Les chercheurs impliqués appartiennent tous aux thématiques scientifiques listées précédemment (génétique des populations, traits de vie, otolithométrie, biomarqueurs) et sont souvent des spécialistes des écosystèmes estuariens. Les opérations s'organisent autour de différents ateliers de travail centrés sur ces thématiques de recherche.

En conclusion c'est une prospective d'envergure internationale qui devrait déboucher en 2009 par la proposition d'un nouveau projet de recherche dans le cadre du 7^{ème} PCRD européen associant des thématiques de recherche dans les disciplines les plus porteuses de la biologie actuelle (génétique, génomique, microchimie des biocarbonates, etc.). D'autre part les applications qui pourront en découler intéresseront les gestionnaires des populations naturelles de poissons, exploitées ou non, et particulièrement au Sud.

III. Références bibliographiques

- Anken RH, Edelmann E, Rahmann H (2002) Neuronal feedback between brain and inner ear for growth of otoliths in fish. *Advances in Space Research* 30:829-833
- Asano M, Mugiya Y (1993) Biochemical and calcium-binding properties of water soluble proteins isolated from otoliths of the tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Comparative Biochemistry and Physiology* 104B:201-205
- Ashford JR, Arkhipkin AI, Jones CM (2006) Can the chemistry of otolith nuclei determine population structure of Patagonian toothfish *Dissostichus eleginoides*? *Journal of Fish Biology* 69:708-721
- Autem M, Bonhomme F (1980) Eléments de systématique biochimique chez les Mugilidés de Méditerranée. *Biochemical Systematics and Ecology* 8:305-308
- Baglinière JL, Castanet J, Conand F, Meunier FJ (1992) Terminologie en sclérochronologie chez les Vertébrés. In: Baglinière JL, Castanet J, Conand F, Meunier FJ (eds) *Tissus durs et âge individuel des Vertébrés. Colloques et Séminaires, ORSTOM-INRA, Paris, France, p 443-447*

- Begg GA, Campana SE, Fowler AJ, Suthers IM (2005) Otolith research and application: current directions in innovation and implementation. *Marine and Freshwater Research* 56:477-483
- Bierne N, Bonhomme F, David P (2003) Habitat preference and the marine-speciation paradox. *Proceedings of the Royal Society London Serie B* 270:1399-1406
- Boeuf G, Le Bail PY (1999) Does light have an influence on fish growth? *Aquaculture* 177:129-152
- Borelli G, Mayer Gostan N, de Pontual H, Boeuf G, Payan P (2001) Biochemical relationships between endolymph and otolith matrix in the trout (*Oncorhynchus mykiss*) and turbot (*Psetta maxima*). *Calcified Tissue International* 69:356-364
- Campana SE (1983) Calcium deposition and otolith check formation during periods of stress in coho salmon, *Oncorhynchus kisutch*. *Comparative Biochemistry and Physiology* 75A:215-220
- Campana SE (1999) Chemistry and composition of fish otoliths: pathways, mechanisms and applications. *Marine Ecology Progress Series* 188:263-297
- Campana SE (2001) Accuracy, precision and quality control in age determination, including a review of the use and abuse of age validation methods. *Journal of Fish Biology* 59:197-242
- Campana SE (2005) Otolith science entering the 21st century. *Marine and Freshwater Research* 56:485-495
- Campana SE, Chouinard GA, Hanson JM, Frechet A, Bratney J (2000) Otolith elemental fingerprints as biological tracers of fish stocks. *Fisheries Research* 46:343-357
- Campana SE, Neilson JD (1985) Microstructure of fish otoliths. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 42:1014-1032
- Campana SE, Thorrold SR (2001) Otoliths, increments, and elements: keys to a comprehensive understanding of fish populations? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 58:30-38
- Campana SE, Thorrold SR, Jones CM, Gunther D, Tubrett M, Longerich H, Jackson S, Halden NM, Kalish JM, Piccoli P, de Pontual H, Troadec H, Panfili J, Secor DH, Severin KP, Sie SH, Thresher R, Teesdale WJ, Campbell JL (1997) Comparison of accuracy, precision, and sensitivity in elemental assays of fish otoliths using the electron microprobe, proton-induced X-ray emission, and laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 54:2068-2079
- Cardona L (1999) Age and growth of leaping grey mullet (*Liza saliens* (Risso, 1810)) in Minorca (Balearic Islands). *Scientia Marina* 63:93-99
- Cardona L (2000) Effects of salinity on the habitat selection and growth performance of Mediterranean flathead grey mullet *Mugil cephalus* (Osteichthyes, Mugilidae). *Estuarine Coastal and Shelf Science* 50:727-737
- Carlström D (1963) A crystallographic study of vertebrate otoliths. *Biological Bulletin* 124:441-463
- Chang CW, Tzeng WN, Lee YC (2000) Recruitment and hatching dates of grey mullet (*Mugil cephalus* L.) juveniles in the Tanshui estuary of northwest Taiwan. *Zoological Studies* 39:99-106
- Crenshaw MA (1982) Mechanisms of normal biological mineralization of calcium carbonates. In: Nancollas GH (ed) *Biological mineralization and demineralization*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, p 243-257
- Cury P (1994) Obstinate nature: an ecology of individuals. Thoughts on reproductive behavior and biodiversity. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 51:1664-1673
- de Pontual H, Geffen AJ (2002) Otolith microchemistry. In: Panfili J, de Pontual H, Troadec H, Wright PJ (eds) *Manual of Fish Sclerochronology*. Ifremer-Ird coedition, Brest, France, p 245-303
- Degens ET, Deuser WG, Haedrich RL (1969) Molecular structure and composition of fish otoliths. *Marine Biology* 2:105-113
- Diouf K, Panfili J, Labonne M, Aliaume C, Tomas J, Chi TD (2006) Effects of salinity on strontium:calcium ratios in the otoliths of the West African black-chinned tilapia *Sarotherodon melanotheron* in a hypersaline estuary. *Environmental Biology of Fishes* 77:9-20
- Dunkelberger DG, Dean JM, Watabe N (1980) The ultrastructure of the otolithic membrane and otolith in the juvenile mummichog, *Fundulus heteroclitus*. *Journal of Morphology* 163:367-377
- Duponchelle F, Panfili J (1998) Variations in age and size at maturity of female Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, populations from man-made lakes of Cote d'Ivoire. *Environmental Biology of Fishes* 52:453-465
- Durand J-D, Tine M, Panfili J, Thiaw OT, Laë R (2005) Impact of glaciations and geographic distance on the genetic structure of a tropical estuarine fish, *Ethmalosa fimbriata* (Clupeidae, S. Bowdich, 1825). *Molecular Phylogenetics and Evolution* 36:277-287
- Edeyer A, de Pontual H, Payan P, Troadec H, Severe A, Mayer Gostan N (2000) Daily variations of the saccular endolymph and plasma compositions in the turbot *Psetta maxima*: relationship with the diurnal rhythm in otolith formation. *Marine Ecology Progress Series* 192:287-294
- Elliott M, Hemingway KL, Krueger D, Thiel R, Hylland K, Arukwe A, Förlin L, Sayer M (2003) Chapter 6: Links between the individual response and the population and community response to pollution. In: Lawrence AJ, Hemingway KL (eds) *Effects of pollution on fish. Molecular effects and population responses*. Blackwell Publishing, Oxford, p 221-255

- Elsdon TS, Gillanders BM (2003) Relationship between water and otolith elemental concentrations in juvenile black bream *Acanthopagrus butcheri*. *Marine Ecology Progress Series* 260:263-272
- Elsdon TS, Gillanders BM (2005a) Consistency of patterns between laboratory experiments and field collected fish in otolith chemistry: an example and applications for salinity reconstructions. *Marine and Freshwater Research* 56:609-617
- Elsdon TS, Gillanders BM (2005b) Strontium incorporation into calcified structures: separating the effects of ambient water concentration and exposure time. *Marine Ecology Progress Series* 285:233-243
- Elsdon TS, Gillanders BM (2006a) Identifying migratory contingents of fish by combining otolith Sr:Ca with temporal collections of ambient Sr:Ca concentrations. *Journal of Fish Biology* 69:643-657
- Elsdon TS, Gillanders BM (2006b) Temporal variability in strontium, calcium, barium, and manganese in estuaries: Implications for reconstructing environmental histories of fish from chemicals in calcified structures. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 66:147-156
- Fossum P, Kalish J, Moksness E (2000) Special issue: 2nd International Symposium on Fish Otolith Research and Application, Bergen, Norway, 20-25 June 1998 - Foreword. *Fisheries Research* 46:1-2
- Fowler AJ (1990) Validation of annual growth increments in the otoliths of a small, tropical coral reef fish. *Marine Ecology Progress Series* 64:25-38
- Fowler AJ, Doherty PJ (1992) Validation of annual growth increments in the otoliths of two species of damselfish from the southern Great Barrier Reef. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research* 43:1057-1068
- Fromentin J-M, Fonteneau A (2001) Fishing effects and life history traits: a case study comparing tropical versus temperate tunas. *Fisheries Research* 53:133-150
- Gauldie RW (1991) The morphology and periodic structures of the otolith of chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*), and temperature-dependent variation in otolith microscopic growth increment width. *Acta Zoologica* 72:159-179
- Gauldie RW, Nelson DGA (1988) Aragonite twinning and neuroprotein secretion are the cause of daily growth rings in fish otoliths. *Comparative Biochemistry and Physiology* 90A:501-509
- Gauldie RW, Nelson DGA (1990) Otolith growth in fishes. *Comparative Biochemistry and Physiology* 97A:119-135
- Gillanders BM (2005) Otolith chemistry to determine movements of diadromous and freshwater fish. *Aquatic Living Resources* 18:291-300
- Gjøsaeter H (1987) Primary growth increments in otoliths of six tropical myctophid species. *Biological Oceanography* 4:359-382
- Green B, Begg G, Carlos G, Mapstone B (2007) Tropical fish otoliths: information for assessment, management and ecology, Vol. Kluwer Academic, New York, *in prep*
- Gutiérrez E, Morales-Nin B (1986) Time series analysis of daily growth in *Dicentrarchus labrax* L. otoliths. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 103:163-179
- Hales LSJ, Hurley DH (1991) Validation of daily increment formation in the otoliths of juvenile silver perch, *Bairdiella chrysoura*. *Estuaries* 14:199-206
- Ibanez-Aguirre AL, Gallardo-Cabello M (1996) Age determination of the grey mullet *Mugil cephalus* and the white mullet *M. curema* V. (Pisces: Mugilidae) in Tamiahua lagoon, Veracruz. *Ciencias Marinas* 22:329-345
- Ibanez-Aguirre AL, Gallardo-Cabello M (2004) Reproduction of *Mugil cephalus* and *M. curema* (Pisces: Mugilidae) from a coastal lagoon in the Gulf of Mexico. *Bulletin of Marine Science* 75:37-49
- Johnson AG (1983) Age and growth of yellowtail snapper from South Florida. *Transaction of the American Fisheries Society* 112:173-177
- Kalish JM (1989) Otolith microchemistry: validation of the effects of physiology, age and environment on otolith composition. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 132:151-178
- Kalish JM (1990) Use of otolith microchemistry to distinguish the progeny of sympatric anadromous and non-anadromous salmonids. *Fishery Bulletin* 88:657-666
- Kalish JM, Beamish RJ, Brothers EB, Casselman JM, Francis C, Mosegaard H, Panfili J, Prince ED, Thresher RE, Wilson CA, Wright PJ (1995) Glossary for otolith studies. In: Secor DH, Dean JM, Campana SE (eds) Recent developments in fish otolith research, Vol 19. University of South Carolina Press, Columbia, SC, USA, p 723-729
- Karlou Riga C (2000) Otolith morphology and age and growth of *Trachurus mediterraneus* (Steindachner) in the Eastern Mediterranean. *Fisheries Research* 46:69-82
- Kennedy BP, Klaue A, Blum JD, Folt CL, Nislow KH (2002) Reconstructing the lives of fish using Sr isotopes in otoliths. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 59:925-929
- Kraus RT, Secor DH (2004) Incorporation of strontium into otoliths of an estuarine fish. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 302:85-106
- Lagardère F, Chaumillon G, Amara R, Heineman G, Lago JM (1995) Examination of otolith morphology and microstructure using laser scanning microscopy. In: Secor DH, Dean JM, Campana SE (eds) Recent developments in fish otolith research. University of South Carolina Press, Columbia, SC, USA, p 7-26

- Laroche J, Quiniou L, Juhel G, Auffret M, Moraga D (2002) Genetic and physiological responses of flounder (*Platichthys flesus*) populations to chemical contamination in estuaries. *Environmental Toxicology and Chemistry* 21:2705-2712
- Lee SC, Chang JT, Tsu YY (1995) Genetic relationships of four Taiwan mullets (Pisces: Perciformes: Mugilidae). *Journal of Fish Biology* 46:159-162
- Linkowski TB (1996) Lunar rhythms of vertical migrations coded in otolith microstructure of North Atlantic lanternfishes, genus *Hygophum* (Myctophidae). *Marine Biology* 124:495-508
- Loubens G (1978) Biologie de quelques espèces de Poissons du lagon néo-calédonien. I. Détermination de l'âge (otolithométrie). *Cahiers ORSTOM, série Océanographie* 16:263-283
- Loubens G, Panfili J (1992) Estimation de l'âge individuel de *Prochilodus nigricans* (Teleostei, Prochilodontidae) dans le Béni (Bolivie) : protocole d'étude et application. *Aquatic Living Resources* 5:41-56
- Loubens G, Panfili J (1995) Biologie de *Prochilodus nigricans* (Teleostei: Prochilodontidae) dans le bassin du Mamoré (Amazonie bolivienne). *Ichthyological Exploration of Freshwaters* 6:17-32
- Loubens G, Panfili J (1997) Biologie de *Colossoma macropomum* (Teleostei: Serrasalminidae) dans le bassin du Mamoré (Amazonie bolivienne). *Ichthyological Exploration of Freshwaters* 8:1-22
- Loubens G, Panfili J (2000) Biologie de *Pseudoplatystoma fasciatum* et *P. tigrinum* (Teleostei : Pimelodidae) du bassin du Mamoré (Amazonie Bolivienne). *Ichthyological Exploration of Freshwaters* 11:13-34
- Loubens G, Panfili J (2001) Biologie de *Piaractus brachipomus* (Teleostei : Serrasalminidae) du bassin du Mamoré (Amazonie Bolivienne). *Ichthyological Exploration of Freshwaters* 12:51-64
- Martin GB, Thorrold SR, Jones CM (2004) Temperature and salinity effects on strontium incorporation in otoliths of larval spot (*Leiostomus xanthurus*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 61:34-42
- Massou AM, Le Bail PY, Panfili J, Lae R, Baroiller JF, Mikolasek O, Fontenelle G, Auperin B (2004a) Effects of confinement stress of variable duration on the growth and microincrement deposition in the otoliths of *Oreochromis niloticus* (Cichlidae). *Journal of Fish Biology* 65:1253-1269
- Massou AM, Panfili J, Lae R, Baroiller JF, Mikolasek O, Fontenelle G, Le Bail PY (2002) Effects of different food restrictions on somatic and otolith growth in Nile tilapia reared under controlled conditions. *Journal of Fish Biology* 60:1093-1104
- Massou AM, Panfili J, Le Bail PY, Lae R, Mikolasek O, Fontenelle G, Baroiller JF (2004b) Evidence of perturbations induced by reproduction on somatic growth and microincrement deposition in *Oreochromis niloticus* otoliths. *Journal of Fish Biology* 64:380-398
- McCulloch M, Cappel M, Aumend J, Muller W (2005) Tracing the life history of individual barramundi using laser ablation MC-ICP-MS Sr-isotopic and Sr/Ba ratios in otoliths. *Marine and Freshwater Research* 56:637-644
- McDonough CJ, Roumillat WA, Wenner CA (2003) Fecundity and spawning season of striped mullet (*Mugil cephalus* L.) in South Carolina estuaries. *Fishery Bulletin* 101:822-834
- Metcalfe JD, Arnold GP, McDowall PW (2002) Migration. In: Hart PJB, Reynolds JD (eds) *Handbook of fish biology and fisheries*. Volume 1. Fish Biology. Blackwell Publishing, Oxford, UK, p 175-199
- Meunier FJ, Panfili J (2002) Historical. In: Panfili J, de Pontual H, Troadec H, Wright PJ (eds) *Manual of Fish Sclerochronology*. Ifremer-Ird coedition, Brest, France, p 23-28
- Morales Nin B, Panfili J (2005) Seasonality in the deep sea and tropics revisited: what can otoliths tell us? *Marine and Freshwater Research* 56:585-598
- Morales-Nin B (1987) Ultrastructure of the organic and inorganic constituents of the otolith of the sea bass. In: Summerfelt RC, Hall GE (eds) *Age and growth of fish*. Iowa State University Press, Ames, Iowa, USA, p 331-343
- Mugiya Y (1977) Studies on fish scale formation and resorption-II. Effect of estradiol on calcium homeostasis and skeletal tissue resorption in the goldfish, *Carassius auratus*, and the killifish, *Fundulus heteroclitus*. *Comparative Biochemistry and Physiology* 57A:197-202
- Mugiya Y (1978) Effects of estradiol-17 β on bone and otolith calcification in the goldfish, *Carassius auratus*. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries* 44:1217-1221
- Mugiya Y (1984) Diurnal rhythm in otolith formation in the rainbow trout, *Salmo gairdneri* : seasonal reversal of the rhythm in relation to plasma calcium concentrations. *Comparative Biochemistry and Physiology* 78A:289-293
- Mugiya Y (1986) Effects of calmodulin inhibitors and other metabolic modulators on in vitro otolith formation in the rainbow trout, *Salmo gairdneri*. *Comparative Biochemistry and Physiology (A)* 84A:57-60
- Mugiya Y (1987a) Effects of photoperiods on the formation of otolith increments in the embryonic and larval rainbow trout *Salmo gairdneri*. *Nippon Suisan Gakkaishi* 53:1979-1984
- Mugiya Y (1987b) Phase difference between calcification and organic matrix formation in the diurnal growth of otoliths in the rainbow trout, *Salmo gairdneri*. *Fishery Bulletin* 85:395-401

- Mugiya Y, Uchimura T (1989) Otolith resorption induced by anaerobic stress in the goldfish, *Carassius auratus*. *Journal of Fish Biology* 35:813-818
- Murayama E, Takagi Y, Ohira T, Davis JG, Greene MI, Nagasawa H (2002) Fish otolith contains a unique structural protein, otolin-I. *European Journal of Biochemistry* 269:688-696
- Neilson JD, Geen GH (1985) Effects of feeding regimes and diel temperature cycles on otolith increment formation in juvenile chinook salmon, *Onchorhynchus tshawytscha*. *Fishery Bulletin* 83:91-101
- Nordlie FG (2000) Patterns of reproduction and development of selected resident teleosts of Florida salt marshes. *Hydrobiologia* 434:165-182
- Panfili J (1993) Estimation de l'âge individuel des poissons : méthodologies et applications à des populations tropicales et tempérées, Vol. Thèse de Doctorat, Univ. Montpellier II. Collection Travaux et Documents Microfichés, ORSTOM, Paris, France
- Panfili J, de Pontual H, Troadec H, Wright PJ (2002a) Manual of Fish Sclerochronology, Vol. Ifremer-Ird Editions, Brest, France
- Panfili J, de Pontual H, Troadec H, Wright PJ (2002b) Manuel de Sclérochronologie des Poissons, Vol. Editions Ifremer-Ird, Brest, France
- Panfili J, Durand J-D, Mbow A, Guinand B, Diop K, Kantoussan J, Thior D, Thiaw OT, Albaret JJ, Laë R (2004a) Influence of salinity on life history traits of the bonga shad *Ethmalosa fimbriata* (Pisces, Clupeidae): comparison between the Gambia and Saloum estuaries. *Marine Ecology Progress Series* 270:241-257
- Panfili J, Mbow A, Durand JD, Diop K, Diouf K, Thior D, Ndiaye P, Laë R (2004b) Influence of salinity on the life-history traits of the West African black-chinned tilapia (*Sarotherodon melanotheron*): Comparison between the Gambia and Saloum estuaries. *Aquatic Living Resources* 17:65-74
- Panfili J, Meunier FJ, Mosegaard H, Troadec H, Wright PJ, Geffen AJ (2002c) Glossary. In: Panfili J, de Pontual H, Troadec H, Wright PJ (eds) Manual of Fish Sclerochronology. Ifremer-Ird coedition, Brest, France, p 373-384
- Panfili J, Thior D, Ecoutin JM, Ndiaye P, Albaret JJ (2006) Influence of salinity on the size at maturity for fish species reproducing in contrasting West African estuaries. *Journal of Fish Biology* 69:95-113
- Panfili J, Tomás J (2001) Validation of age estimation and back-calculation of fish length based on otolith microstructures in tilapias (Pisces, Cichlidae). *Fishery Bulletin* 99:139-150
- Panfili J, Tomas J, Morales-Nin B (2007) Otolith microstructure in tropical fishes. In: Green B, Begg G, Carlos G, Mapstone B (eds) Tropical fish otoliths: information for assessment, management and ecology. Kluwer Academic, New York, *in prep*
- Panfili J, Ximénès MC (1994) Evaluation de l'âge et de la croissance de l'anguille européenne (*Anguilla anguilla* L.) en milieu continental : méthodologies, validation, application en Méditerranée et comparaisons en Europe. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture* 335:43-66
- Panfili J, Ximénès MC, Crivelli AJ (1994) Sources of variation in growth of the European eel (*Anguilla anguilla*) estimated from otoliths. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 51:506-515
- Panfili J, Ximénès MC, Crivelli AJ, Do Chi T (1992) Age validation of European eel in the French Mediterranean lagoons (Camargue): Preliminary results. In: Bagliniere JL, Castanet J, Conand F, Meunier FJ (eds) Tissus durs et âge individuel des Vertébrés. Collection Colloques et Séminaires ORSTOM-INRA, Paris, p 119-127
- Panfili J, Ximénès MC, Do Chi T (1990) Age determination of eels in the French Mediterranean lagoons using classical methods and an image analysis system. *International Revue der gesamten Hydrobiologie* 75:745-754
- Pannella G (1971) Fish otoliths: daily growth layers and periodical patterns. *Science* 173:1124-1127
- Pannella G (1980) Growth pattern in fish sagittae. In: Rhoads DC, Lutz RA (eds) Skeletal growth of aquatic organisms. Biological records of environmental change. Plenum Press, New York, USA and London, UK, p 519-560
- Papastotiropoulos V, Klossa-Kilia E, Kilia G, Alahiotis S (2002) Genetic divergence and phylogenetic relationships in grey mullets (Teleostei: Mugilidae) based on PCR RFLP analysis of mtDNA segments. *Biochemical Genetics* 40:71-86
- Payan P, De Pontual H, Boeuf G, Mayer Gostan N (2004a) Endolymph chemistry and otolith growth in fish. *Comptes Rendus Palevol* 3:535-547
- Payan P, De Pontual H, Edeyer A, Borelli G, Boeuf G, Mayer Gostan N (2004b) Effects of stress on plasma homeostasis, endolymph chemistry, and check formation during otolith growth in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 61:1247-1255
- Payan P, Edeyer A, de Pontual H, Borelli G, Boeuf G, Mayer Gostan N (1999) Chemical composition of saccular endolymph and otolith in fish inner ear: lack of spatial uniformity. *American Journal of Physiology, Regulatory Integrative and Comparative Physiology* 46:R123-R131
- Payan P, Kossmann H, Watrin A, Mayer Gostan N, Boeuf G (1997) Ionic composition of endolymph in teleosts: origin and importance of endolymph alkalinity. *Journal of Experimental Biology* 200:1905-1912

- Ponton D, Mol JH, Panfili J (2001) Use of otolith microincrements for estimating the age and growth of young armoured catfish *Hoplosternum littorale*. *Journal of Fish Biology* 58:1274-1285
- Radtke RL, Dean JM (1982) Increment formation in the otoliths of embryos, larvae, and juveniles of the mummichog, *Fundulus heteroclitus*. *Fishery Bulletin* 80:201-215
- Reichert MJM, Dean JM, Feller RJ, Grego JM (2000) Somatic growth and otolith growth in juveniles of a small subtropical flatfish, the fringed flounder, *Etropus crossotus*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 254:169-188
- Rochet M-J (2000) May life history traits be used as indices of population viability? *Journal of Sea Research* 44:145-157
- Romanek CS, Gauldie RW (1996) A predictive model of otolith growth in fish based on the chemistry of the endolymph. *Comparative Biochemistry and Physiology* 114(A):71-79
- Rossi AR, Ungaro A, De Innocentiis S, Crosetti D, Sola L (2004) Phylogenetic analysis of mediterranean Mugilids by allozymes and 16S mt-rRNA genes investigation: are the Mediterranean species of *Liza* monophyletic? *Biochemical Genetics* 42:301-315
- Saitoh S, Yamada J (1989) Ultrastructure of the saccular epithelium in the otolithic membrane in relation to otolith growth in tilapia, *Oreochromis niloticus* (Teleostei: Cichlidae). *Transactions of the American Microscopy Society* 108:223-238
- Sasagawa T, Mugiya Y (1996) Biochemical properties of water-soluble otolith proteins and the immunobiochemical detection of the proteins in serum and various tissues in the tilapia *Oreochromis niloticus*. *Fisheries Science* 62:970-976
- Secor DH, Rooker JR (2000) Is otolith strontium a useful scalar of life cycles in estuarine fishes? *Fisheries Research* 46:359-371
- Shinobu N, Mugiya Y (1995) Effects of ovine prolactin, bovine growth-hormone and triiodothyronine on the calcification of otoliths and scales in the hypophysectomized goldfish *Carassius auratus*. *Fisheries Science* 61:960-963
- Sibert JR, Nielsen JL (2001) *Electronic tagging and tracking in marine fisheries*, Vol. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London
- Smith KA, Deguara K (2003) Formation and annual periodicity of opaque zones in sagittal otoliths of *Mugil cephalus* (Pisces: Mugilidae). *Marine and Freshwater Research* 54:57-67
- Sohn D, Kang S, Kim S (2005) Stock identification of chum salmon (*Oncorhynchus keta*) using trace elements in otoliths. *Journal of Oceanography* 61:305-312
- Stéquet B, Panfili J, Dean JM (1996) Age and growth of yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, from the western Indian Ocean, based on otolith microstructure. *Fishery Bulletin* 94:124-134
- Strelcheck AJ, Fitzhugh GR, Coleman FC, Koenig CC (2003) Otolith-fish size relationship in juvenile gag (*Mycteroperca microlepis*) of the eastern Gulf of Mexico: a comparison of growth rates between laboratory and field populations. *Fisheries Research* 60:255-265
- Tanabe T, Kayama S, Ogura M, Tanaka S (2003) Daily increment formation in otoliths of juvenile skipjack tuna *Katsuwonus pelamis*. *Fisheries Science* 69:731-737
- Tanaka K, Mugiya Y, Yamada J (1981) Effects of photoperiod and feeding on daily growth patterns in otoliths of juvenile *Tilapia nilotica*. *Fishery Bulletin* 79:459-466
- Taubert BD, Coble DW (1977) Daily rings in otoliths of three species of *Lepomis* and *Tilapia mossambica*. *Journal of Fisheries Research Board of Canada* 34:332-340
- Thorrold SR, Latkoczy C, Swart PK, Jones CM (2001) Natal homing in a marine fish metapopulation. *Science* 291:297-299
- Thresher RE (1999) Elemental composition of otoliths as a stock delineator in fishes. *Fisheries Research* 43:165-204
- Tomás J, Panfili J (2000) Otolith microstructure examination and growth patterns of *Vinciguerria nimbaria* (Photichthyidae) in the tropical Atlantic Ocean. *Fisheries Research* 46:131-145
- Trexler JC, Travis J (2000) Can marine protected areas restore and conserve stock attributes of reef fishes? *Bulletin of Marine Science* 66:853-873
- Turan C, Caliskan M, Kucuktas H (2005) Phylogenetic relationships of nine mullet species (Mugilidae) in the Mediterranean Sea. *Hydrobiologia* 532:45-51
- Tzeng WN, Yu SY (1992) Effects of starvation on the formation of daily growth increments in the otoliths of the milkfish, *Chanos chanos* (Forsskål), larvae. *Journal of Fish Biology* 40:39-48
- Veinott G, Porter R (2005) Using otolith microchemistry to distinguish Atlantic salmon (*Salmo salar*) parr from different natal streams. *Fisheries Research* 71:349-355
- Volk EC, Schroder SL, Grimm JJ (1994) Use of a bar code symbology to produce multiple thermally-induced otolith marks. *Transactions of the American Fisheries Society* 123:811-816
- Walther BD, Thorrold SR (2006) Water, not food, contributes the majority of strontium and barium deposited in the otoliths of a marine fish. *Marine Ecology Progress Series* 311:125-130

- Watabe N, Tanaka K, Yamada J, Dean JM (1982) Scanning electron microscope observations of the organic matrix in the otolith of the Teleost fish *Fundulus heteroclitus* (Linnaeus) and *Tilapia nilotica* (Linnaeus). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 58:127-134
- Whitfield AK (2005) Fishes and freshwater in southern African estuaries - A review. *Aquatic Living Resources* 18:275-289
- Whitfield AK, Elliott M (2002) Fishes as indicators of environmental and ecological changes within estuaries: a review of progress and some suggestions for the future. *Journal of Fish Biology* 61:229-250
- Wright PJ (1991) Calcium binding by soluble matrix of the otoliths of Atlantic salmon, *Salmo salar* L. *Journal of Fish Biology* 38:625-627
- Wright PJ, Panfili J, Morales-Nin B, Geffen AJ (2002) Otoliths. In: Panfili J, de Pontual H, Troadec H, Wright PJ (eds) *Manual of Fish Sclerochronology*. Ifremer-Ird Editions, Brest, France, p 25-51
- Wright PJ, Thalbot C, Thorpe JE (1992) Otolith calcification in Atlantic salmon parr, *Salmo salar* L., and its relation to photoperiod and calcium metabolism. *Journal of Fish Biology* 40:779-790
- Zeller DC (1999) Ultrasonic telemetry; its application to coral reef fisheries research. *Fishery Bulletin* 97:1058 -1065
- Zhang Z, Runham NW (1992a) Otolith microstructure pattern in *Oreochromis niloticus* (L.). *Journal of Fish Biology* 40:325-332
- Zhang Z, Runham NW (1992b) Temporal deposition of incremental and discontinuous zones in the otoliths of *Oreochromis niloticus* (L.). *Journal of Fish Biology* 40:333-339