

Chap 9 - Les hydrosystèmes, continentaux, côtiers et océaniques, filière pêche et aquaculture¹

Jean-Luc Baglinière (Inra, UMR ESE, Rennes), Daniel Gerdeaux (INRA, UMR CARTELL, Thonon-les-bains), François Médale (Inra UMR Nuage, St Pée/Nivelle), Didier Gascuel (Agrocampus Ouest, UMR ESE, Rennes), Olivier Le Pape (Agrocampus Ouest, UMR ESE, Rennes) et Didier Pont (Irstea, Anthony)

91. Hydrosystèmes continentaux – Filière : pêche lacs et cours d'eau

Les écosystèmes d'eau douce jouent un rôle important dans le maintien de la biodiversité terrestre, services écologiques, régulation et épuration de l'eau, énergie renouvelable... Si les conventions internationales et les directives européennes protègent certains types d'espèces et d'habitats, la directive cadre eau (DCE) demande le retour au bon état écologique (qualité et connectivité) de toutes les masses d'eau d'ici 2015. Ces mesures (maintien des régimes hydrologiques, renaturation des cours d'eau, réhabilitation et conservation des zones humides) devraient permettre aux hydrosystèmes de supporter les impacts du changement global. Néanmoins, il est également important de pouvoir évaluer la capacité adaptative des espèces et de résilience des hydrosystèmes et aller au-delà de la simple évaluation de l'impact du changement climatique souvent abordée dans les études. Ainsi, un certain nombre de recherches prioritaires ont été identifiées ; amélioration de la précision des modèles reliant températures eau/air et hydrologie/thermie dans différents contextes géographiques et à des échelles spatiales pertinentes pour la gestion ; développement des connaissances en écophysiologie par un couplage d'approches terrain/expérimentation en intégrant le contexte génétique ; élaboration d'indicateurs du bon état écologique plus proches des fonctions et recourant à des outils de modélisation intégrant les conditions climatiques dans l'évaluation de l'écart à l'état de référence...

Des études prioritaires sont à engager ou à renforcer dans le domaine cognitif (approche systémique et fonctionnelle, diversité génétique) et sur le fonctionnement des zones humides, milieux très sensibles à l'impact du changement climatique et essentiels dans la continuité écologiques des hydrosystèmes.

91.1. Contexte, enjeux et objectifs

Les écosystèmes d'eau douce constituent d'importants réservoirs de biodiversité et sont, à ce titre, extrêmement sensibles au changement global (Heino et al, 2009). Parmi ceux-ci les zones humides, du fait de leur capacité d'adaptation limitée, font partie des écosystèmes les plus vulnérables au changement climatique (Bates et al,

¹ Contributeurs à l'Atelier de réflexion Prospective ADAGE (Adaptation de l'Agriculture et des Ecosystèmes anthropisés au changement climatique : JL Baglinière (INRA), D. Gerdeaux (INRA), F. Médale (INRA), Didier Pont (Cemagref), Nirmala Seon-Massin (ONEMA), Yves Souchon (CEMAGREF), Sami Souissi (Univ. Lille), Fabian Blanchard (Ifremer), Didier Gascuel (Agrocampus Ouest), Olivier Le Pape (Agrocampus Ouest), Richard Sabatié (Agrocampus Ouest), G. Choubert (INRA), M. Dupont-Nivet (INRA), J. Gatesoupe (INRA), P.Y. LeBail (INRA), P. Prunet (INRA), E. Quillet (INRA), J.P. Baud (IFREMER), C. Cahu (IFREMER), N. Devauchelle (IFREMER), S. Girard (IFREMER), A. Huvet (IFREMER), T. Renaud (IFREMER), C. Marijouis (AgroParisTec), P. Fontaine (Univ. Nancy), P. Haffray (SYSAAF).

2008). Ces zones présentent les plus fortes productivités et diversités floristiques et faunistiques. Ce sont actuellement les milieux les plus menacés et dégradés de la planète. Les zones humides ont un rôle essentiel dans le fonctionnement hydrologique et biologique des cours d'eau synthétisé notamment sous le développement du *Flood pulse concept* (Junk et al., 1989). D'autres concepts ont été développés pour comprendre, à une échelle multidimensionnelle, l'influence des variations climatiques et hydrologiques sur le fonctionnement de ces zones : *Wetland Continuum concept* (Euliss et al., 2004) permettant de mettre en évidence les différentes adaptations des organismes inféodés à ces zones.

Des enjeux multiples dans un cadre international

Outre l'intérêt propre des écosystèmes d'eau douce, les enjeux qui s'y rattachent sont multiples : importance pour le maintien de la biodiversité terrestre, services écologiques (régulation et épuration de l'eau et énergie renouvelable notamment) et engagements réglementaires. En effet, aux conventions internationales et directives européennes protégeant certains types d'espèces et d'habitats (RAMSAR, CITES, Directives Habitats Faune Flore...) s'ajoute la DCE. Le concept de connectivité pris en compte par la DCE pour les masses d'eau permet de décrire une continuité de structure et de fonction à travers les trois dimensions de l'espace et le temps (Amoros & Bornette, 2002). Il est considéré comme un indicateur de l'état de santé du cours d'eau puisque la perte de connectivité se traduit par une forte érosion de la biodiversité (Bannerman, 1997).

Pressions locales et changement climatique

Dans le cas de ces écosystèmes, il est particulièrement difficile de distinguer les effets du changement climatique de ceux des pressions anthropiques locales. Ainsi, les aménagements humains au sein des réseaux hydrographiques (barrages, artificialisation des berges, prélèvements d'eau, pollution, eutrophisation, sédimentation, etc.) vont dans la plupart des cas conduire à une aggravation de certains des processus entraînés par le changement climatique, comme l'augmentation de la température de l'eau et la modification des débits, la dégradation des zones humides riveraines et littorales (McCormick et al., 2009 ; Scheurer et al., 2009). Il est ainsi relativement délicat de déterminer la part de chacun de ces facteurs (global vs local) dans les pressions que subissent ces écosystèmes (Baglinière et al, 2010).

Qualité des eaux, qualité des aliments

La filière pêche continentale (professionnelle et amateur) en France métropolitaine et DOM est relativement peu importante sur le plan économique, les problèmes de pollution et les nouvelles normes de qualité des aliments (PCB) ont récemment porté atteinte à l'activité professionnelle (7000 pêcheurs au début des années 1970 à 666 en 2007) et notamment sur de grands bassins comme ceux de Rhône-Saône et de la Seine. Indépendamment des impacts du changement climatique, la filière pêche continentale sera sans doute de plus en plus réduite à l'activité de loisirs qui représente en France environ 2 millions de pêcheurs. Le poisson est un des indicateurs de la qualité écologique selon la DCE. L'IPR (Indice poisson rivière) est également un des indicateurs de la stratégie nationale pour la biodiversité ; il en est de même pour le futur indice poisson estuaire (IPE) en cours de développement au niveau national.

La DCE impose des mesures de réhabilitation des masses d'eau qui sont pour la plupart des mesures d'adaptation potentielle aux effets du changement climatique :

- Maintien des régimes hydrologiques des cours d'eau pour prévenir les risques d'**assec*** et limiter les effets des crues
- Restauration de l'espace de liberté des cours d'eau (reméandrage, réhabilitation des berges, défragmentation et rétablissement de la connectivité du cours d'eau, ...)
- Réhabilitation et conservation des zones humides
- Reconquête de la qualité physico-chimique des eaux (MES, polluants)
- Retour au bon état écologique basé sur les compartiments poissons, macro-invertébrés, macrophytes, phytoplancton.

Ces mesures 'sans regret' du retour au bon état écologique devraient permettre aux hydrosystèmes de supporter les impacts du changement climatique et de continuer à fournir les services rendus au « bien-être humain » tels qu'ils ont été définis par l'initiative du Millenium Ecosystem Assessment (services récréatifs, épuration, irrigation, protection contre les événements extrêmes...).

91.2. Impacts du changement climatique et pistes d'adaptation

Le réchauffement des eaux, conséquences sur la structure et le fonctionnement des hydrosystèmes

Le changement climatique provoque un réchauffement estival des eaux des rivières d'amplitude variable suivant l'altitude du bassin versant de la rivière et son type d'alimentation. Poirel et al. (2008) notent une augmentation moyenne annuelle de 1,5°C sur le bassin du Rhône entre 1977 et 2006. Ces augmentations sont plus élevées sur le Rhône aval et sur ses affluents chauds. L'effet est plus marqué au printemps et en été. Il en est de même sur la Loire où sur le cours moyen, est observé un échauffement estival tendanciel de 0,5 °C de 1947-1949 à 2003 (Gosse et al., 2008). En Suisse, l'écart de température entre les périodes 1978-1987 et 1988-2002 varie de 1,2°C à zéro depuis les rivières du plateau suisse aux torrents alimentés par les glaciers. Dans le lac Léman, la température moyenne annuelle au fond (309 m) a augmenté de plus de 1°C en 40 ans (www.cipel.org). La température hivernale de la masse d'eau lacustre est passée de 4,5°C en 1963 à 5,15°C en 2006. La température de l'eau **des tributaires*** des lacs, issue de la couche superficielle, peut atteindre des seuils létaux (25°C) pour certaines espèces comme les ombres communs dans le Rhin en aval du lac de Constance en 2003. Les changements hydrologiques sont moins bien documentés. D'une manière générale, les modifications climatiques prévues dans le cadre des scénarios actuels (augmentation de la température de l'eau et amplification de la variabilité saisonnière des débits) devraient avoir de profondes conséquences sur la structure et le fonctionnement des hydrosystèmes, les conditions extrêmes jouant un rôle prépondérant (Schindler, 2001).

Deux conséquences peuvent être prioritairement dégagées :

91.2.1. Changements dans l'abondance et la répartition des espèces, remplacement d'espèces

Au cours des 15 à 25 dernières années, le suivi de grands fleuves montre un accroissement significatif des proportions des poissons méridionaux et thermophiles et de la richesse spécifique au sein de communautés attribuable au changement climatique. Inversement, l'**équitabilité*** a diminué, soulignant une domination graduelle des peuplements par un nombre réduit d'espèces (Daufresne & Boët 2007 ; Daufresne, 2008). D'une manière générale, ces changements se traduisent par une

augmentation de l'abondance, une modification dans la structure de taille des communautés (les espèces comme les individus les plus petits étant favorisés), et par une modification de la répartition spatiale sur le bassin. Cette même observation est faite aussi chez les invertébrés aquatiques (Daufresne et al., 2004). Ainsi, les espèces d'eau chaude colonisent progressivement l'amont des fleuves au détriment des espèces d'eau plus froide. Ces déplacements vers l'amont seront facilités par le rétablissement de la connectivité du cours d'eau. Dans le bassin du Rhône à hauteur du Bugey, les espèces thermophiles comme le barbeau et la vandoise pour les poissons ou les taxons d'invertébrés thermophiles (e.g. *Athricops*, *Potamopyrgus*) remplacent progressivement en amont les espèces d'eau plus froide comme le chevesne ou des taxons d'invertébrés comme *Chloroperla*, *Protoneumura* (Daufresne et al., 2004). Par ailleurs, les études réalisées sur les populations de poissons des grands fleuves montrent bien l'importance des effets du changement climatique même dans les sites perturbés par des pressions non climatiques (Daufresne, 2008)

Les aires de répartition des espèces se déplacent vers le nord ou vers les plus hautes altitudes. Les populations les plus méridionales de beaucoup d'espèces vont probablement disparaître ou du moins être très réduites. Ces modifications traduisent les normes de réaction et de capacité adaptative des espèces aux changements thermiques et hydrologiques. Ainsi, la reproduction du saumon a lieu en dessous d'un seuil critique de la température de l'eau aux alentours de 11.5-12°C (De Gaudemar & Beall, 2003). Au dessus de ce seuil, la femelle ne pondrait pas. La fenêtre temporelle de frai est ainsi réduite dans les cours d'eau réchauffés. Toutefois les études conduites sur les saumons de la Nivelle ne mettent pas en évidence de préférence des femelles pour les températures les plus fraîches. Est-ce un signe d'adaptation ? De même, des changements profonds sont observés dans les traits d'histoire de vie du saumon, sans qu'ils soient mis clairement en évidence une probable relation avec le réchauffement. Une part importante des jeunes saumons mâles arrivent à maturité précocement sans migrer en mer. Ces individus de taille très inférieure à celles des mâles adultes participent efficacement au succès reproducteur. Néanmoins, ce succès reproducteur reste avant tout fonction de la survie des œufs qui semble diminuer avec l'augmentation de la température. Par ailleurs, on constate également un « raccourcissement » du cycle biologique du saumon, bien mis en évidence dans les rivières de Bretagne et Basse-Normandie à partir d'observations faites sur 30 ans. Les jeunes saumons migrent plus tôt en mer à un an ce qui semble lié à la fois à l'augmentation de la température de l'eau mais également à l'augmentation de la productivité primaire lié aux pressions anthropiques sur les bassins versants, deux facteurs conditionnant l'augmentation de croissance observée (Baglinière et al., 2010). De plus, la composante des gros saumons (poissons de plusieurs hivers en mer) a soit disparu soit fortement diminué en lien à la fois avec la réduction du taux de survie marine et une exploitation sélective des gros individus. La durée d'un cycle biologique (5-4 → 3-2 ans) s'accompagne de variations interannuelles plus fortes augmentant la sensibilité des populations aux facteurs environnementaux (Baglinière et al., 2004). Si ces changements dans les traits d'histoire de vie du saumon constituent une adaptation au changement climatique, seront-ils assez rapides et suffisants pour maintenir ces populations méridionales ?

Quelques études proposent des projections d'aire de répartition des espèces à partir d'une approche macroécologique et statistique des aires de répartition actuelle dont les espèces à intérêt halieutique (Pont et al., 2006 ; Lassalle et al., 2008 ; Buisson &

Grenouillet, 2009). Ainsi, dans leur étude, Lassalle et al. (2008) montrent une diminution vers le sud et une extension vers le Nord de l'aire de distribution de la grande alose en 2100, extension qui semble déjà se dessiner avec la (re)colonisation des petits fleuves français des côtes de la Manche (Baglinière et al., 2003) (Figure 9121). De même, Buisson & Grenouillet (2009) prédisent la distribution future de 35 espèces de poissons de rivière en extrapolant les modèles de distribution actuelle de 7 espèces. Les changements prédits dans la diversité sont plus importants en amont et en milieu des cours que dans les parties aval. Enfin, dans une autre étude, Lassalle & Rochard (2009) montrent sous le scénario climatique A2 en 2100 que sur 22 espèces diadromes, 14 verront leur aire de répartition se réduire, 5 ne verront aucun changement et 3 espèces verront leur aire de distribution s'agrandir, confirmant la très forte sensibilité des poissons diadromes aux modifications de leur environnement.

Espèces envahissantes

D'autres espèces qui étaient très rares dans certains milieux deviennent envahissantes parce que favorisées par les nouvelles conditions du milieu sans qu'il y ait réellement un changement dans leur aire de répartition. C'est le cas de la cyanobactérie *Cylindrospermopsis raciborskii* considérée comme tropicale (optimum de croissance vers 30°C), trouvée sur le bassin parisien puis dans 3 régions de France. Tous les sites sont des milieux peu profonds très chauds en été. Les souches trouvées en France ne sont pas issues d'un transfert récent depuis les régions tropicales, elles seraient issues de sites refuges en Europe (Briand et al., 2004; Gugger et al., 2005). Les atouts compétitifs de cette espèce (tolérance thermique et lumineuse étendue, résistance à de fortes concentrations en éléments minéraux dissous, tolérance à l'absence d'azote minéral dissous, accumulation de réserves en phosphore, lui permettent de se diviser plusieurs fois dans un milieu carencé. En revanche, l'élévation des températures ne semble pas être le seul facteur de succès de l'espèce (pas d'efflorescence relevée en 2003). Ces phénomènes invasifs concernent également des populations d'espèces de crustacés dont certaines ont colonisé le Rhône moyen en 20 ans en plusieurs vagues en liaison avec un réchauffement de l'eau et d'importants épisodes de crue et de canicule. Cette invasion s'est soldée par une diminution des populations de crustacés autochtones (Dessaix & Fruget, 2008). Dans d'autres cas, des espèces, introduites intentionnellement dans certains milieux, deviennent invasives car plus tolérantes que les espèces natives à la dégradation des conditions de milieux (élévation de la température de l'eau, pollution, fragmentation de l'habitat (Marchetti et al. 2004)). Ces introductions concernent avant tout les poissons d'eau douce qui sont les espèces dulçaquicoles les plus fréquemment introduites en Europe (Garcia-Berthou et al., 2005). On peut citer deux exemples : celui du poisson chat introduit dans les années 1930 dans le marais de Brière dont l'extension semble un facteur limitant à la diversité du peuplement pisciaire (Cucherousset, 2006) et celui des deux carpes asiatiques introduites dans la Rivière Illinois et en instance de colonisation du lac Michigan (Pimentel, 2005).

Impact accru des parasites

Le réchauffement des eaux favorisera également des parasites dont l'impact sera accru. Le parasite myxozoaire *Tetracapsuloïdes bryosalmonae* qui provoque la maladie prolifératrice des reins (Proliferative Kidney Disease) cause des mortalités chez les salmonidés. Ce parasite a un cycle à deux hôtes, un bryozoaire et un salmonidé. En Suisse, Wahli et al (2008) ont montré qu'il y a une bonne corrélation entre la prévalence de ce parasite et l'altitude ou la température de l'eau.

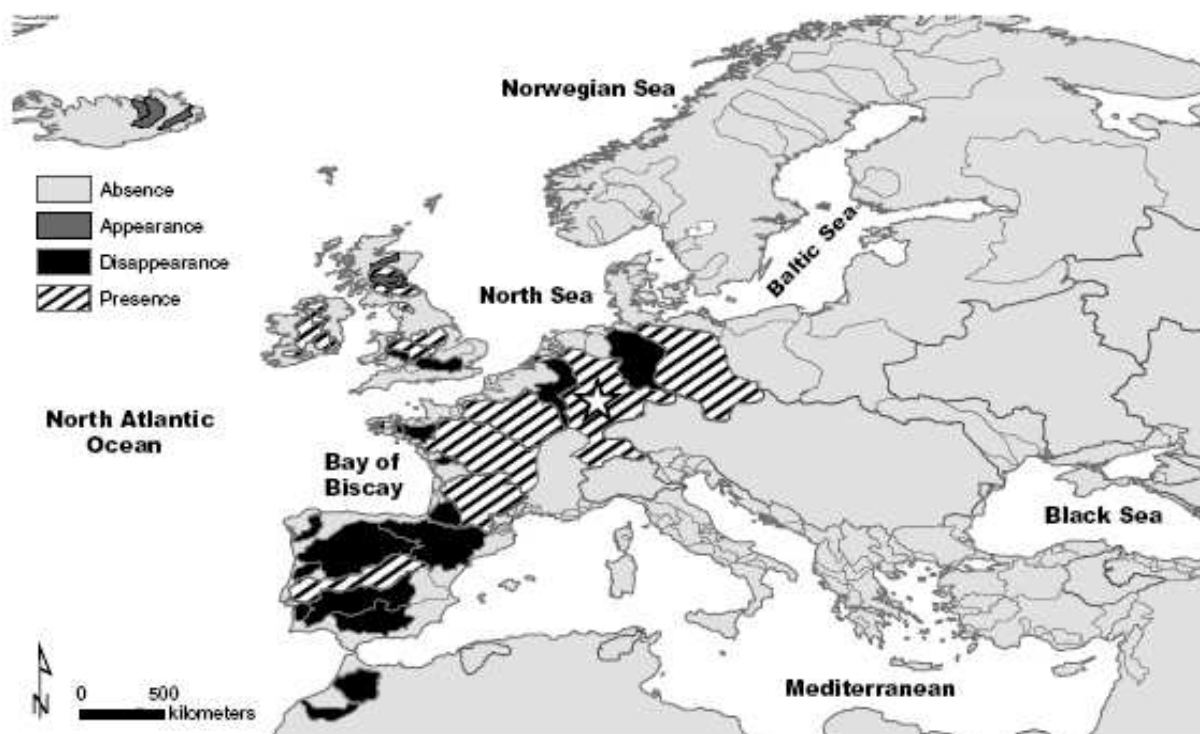


Figure 9121. Aire de distribution potentielle de la grande Alose (*Alosa alosa*) en 2100. Les projections sont faites à l'aide de modèles biogéographiques dans le cadre du scénario climatique A2 d'après Lassalle et al. (2008).

Actuellement le parasite n'est pas présent au-dessus de 800 m, mais il se propagera vers l'amont si les températures augmentent, mettant en péril des populations de truite.

Dans les eaux de transition, la baisse des débits conjuguée à l'élévation du niveau marin conduit globalement à une marinisation des estuaires avec pour conséquences l'augmentation des espèces marines aux dépens de migrateurs amphihalins (Delpech, 2007).

91.2.2. Changements phénologiques de fonctionnement des systèmes

Exemple du lac Léman

Le réchauffement climatique modifie la phénologie de la plupart des processus écologiques. Dans le Léman, la mise en place de la stratification thermique a été avancée en 30 ans d'environ un mois. Cette couche d'eau chaude superficielle est d'autant plus stable qu'elle se réchauffe fortement. La dynamique saisonnière du phytoplancton suit ce décalage thermique. La production primaire débute dès fin mars (Anneville et al., 2005). Le zooplancton herbivore (*Daphnies*) présente un maximum printanier avancé également d'un mois. Ce plancton consomme massivement le phytoplancton, provoquant une forte diminution de la biomasse algale se traduisant par une phase des eaux transparentes avancée de juin à mai. L'avancée dans la dynamique de la production et la stratification thermique du lac, la dynamique du phosphore, modifie la structure des assemblages d'espèces. Le phosphore disponible dans la couche d'eau superficielle est plus rapidement consommé par la production primaire. Il devient très tôt facteur limitant de la

production primaire alors qu'il reste en concentration favorable dans la couche d'eau profonde, froide et moins éclairée du lac. Ces conditions sont favorables au cortège d'algues "automnales" qui se développent ainsi dès l'été dans les couches profondes. Ces algues ne participent pas ou peu au transfert d'énergie vers les échelons supérieurs du réseau trophique car filamenteuses pour la plupart et difficiles à consommer par le zooplancton. Les transferts trophiques sont ainsi fortement modifiés dans le lac.

Reproduction des poissons

Les espèces de poisson ne réagissent pas de façon identique. Le gardon, cyprinidé d'eau chaude, a sa reproduction avancée d'un mois environ, alors que la perche n'a pas ou peu changé sa date de reproduction. Les relations interspécifiques de partage de la ressource nutritive zooplanctonique et de prédation sont modifiées. Leurs conséquences sur la dynamique des espèces restent à explorer. Le corégone et l'omble chevalier, espèces d'eau froide, réagissent différemment au réchauffement des eaux. Leur reproduction a lieu en hiver quand la photopériode et la température des eaux diminuent. La reproduction du corégone (*Coregonus lavaretus*) est ainsi retardée en décembre de deux semaines environ. La durée du développement embryonnaire est raccourcie par les eaux un peu plus chaudes en hiver. L'éclosion des larves est seulement avancée de quelques jours alors que la dynamique du plancton est, elle, avancée d'un mois. Les larves se trouvent dans des eaux plus chaudes qu'il y a 30 ans avec une ressource nutritive dont la dynamique est anticipée. Il est probable que leur survie soit meilleure et qu'elle explique la très bonne dynamique de la population de corégone dont les captures sont passées de moins de 50 tonnes dans les années 70 à plus de 300 tonnes depuis 1997 (Gerdeaux, 2004). L'impact descendant de cette population de corégone sur le réseau trophique n'a pas encore été étudié.

Migration du saumon

De même, dans les cours d'eau canadiens et américains, on assiste à des changements dans la phénologie de la migration du saumon atlantique se traduisant par des dates plus précoces de montaison des adultes. Ces changements de dates corrélés à des changements à long terme de température et de débit; peuvent représenter une réaction au changement climatique (Juanes et al., 2004). Des changements dans la phénologie de migration des adultes sont également observés sur les rivières françaises mais ils se traduisent par un retard à la migration couplée à une diminution de taille des poissons (Bal, 2011). Il semble donc apparaître des réponses différentes à ces changements en liaison avec les contextes géographiques et les caractéristiques écologiques et génétiques des espèces, populations et/ou communautés.

D'une manière générale, les conséquences du réchauffement et des modifications des régimes hydrologiques sur le fonctionnement global des écosystèmes aquatiques restent à explorer.

91.3. Perspectives de recherches

91.3.1. Priorités de recherche

Elles doivent s'orienter selon plusieurs axes qui approfondissent les connaissances déjà acquises ou bien abordent de nouvelles thématiques :

* Améliorer la précision des modèles prévisionnels en hydrologie et en thermie à différentes échelles

L'incertitude des projections climatiques et hydrologiques aux échelles pertinentes pour les hydrosystèmes continentaux (Grands bassins : Seine, Rhône, Loire, Garonne...) reste trop grande pour évaluer les impacts futurs et mettre en œuvre les stratégies d'adaptation. C'est en particulier le cas pour les prédictions en termes de précipitations et leurs incidences sur l'hydrologie. L'amélioration de la précision des modèles doit aller jusqu'aux échelles spatiales pertinentes pour la gestion: au moins à un niveau de district² au sens de la DCE, c'est à dire à un niveau où les opérationnels programment leurs mesures correctrices. Les relations entre la température de l'air, l'hydrologie et la température de l'eau, et ce à l'échelle du territoire national et dans différents contextes (altitudinal, régional, interactions avec différents types de masses d'eau souterraines,...).devront être mieux analysées. La mise en place récente des réseaux de suivis des températures de l'eau (rivières et lacs) constituera une base de données indispensable.

* Actualiser les connaissances en écophysologie de nombreuses espèces (notamment des nouvelles)

L'objectif est de pouvoir ajuster des modèles pour évaluer les possibilités d'adaptation des espèces ; cela nécessite de répondre à plusieurs questions : 1) Pour une espèce donnée, quelle est la relation entre les gammes de préférences écologiques et la répartition latitudinale ou altitudinale des populations et leurs caractéristiques génétiques ? 2) Quels sont les risques associés à l'arrivée d'espèces thermophiles (exotiques ou pas) ? 3) Quels sont les risques de retour d'épizooties plus ou moins latentes et d'apparition de nouvelles épizooties et comment les évaluer ? Sur ce point, il est nécessaire de coupler les approches terrain et expérimentales en prenant en compte le contexte génétique. L'ampleur de la tâche nécessitera probablement de se focaliser sur un petit nombre de modèles biologiques.

* Etudier les modifications dues au changement climatique de la dynamique des transferts d'éléments chimiques et de polluants.

* Affiner les modèles d'évolution d'aire de répartition des espèces

Ces modèles reposent pour l'instant sur des méthodes statistiques. Ces travaux doivent être compris comme des évaluations des changements potentiels des distributions des habitats favorables aux espèces, et ne sont que des approches préliminaires qui peuvent néanmoins fournir une image des altérations possibles des communautés des cours d'eau à large échelle. Ils doivent être poursuivis en cherchant à définir les réponses des espèces aux paramètres environnementaux (dont le climat) à l'échelle des aires de distributions, c'est à dire le plus souvent l'Europe mais à une échelle plus large pour certaines espèces (bassin méditerranéen, continent nord américain). Une meilleure connaissance de la capacité d'adaptation des espèces est indispensable pour affiner les modèles qui devraient s'appuyer sur une approche plus fonctionnelle et proche des processus éco-physiologiques. Il faut donc intégrer dans cette approche à la fois l'identification de normes de réaction des espèces à la modification des conditions environnementales (Reyjols et al. 2009) tant en termes physico-chimiques (température, nutriments, salinité, xénobiotiques), mésologiques (habitats) que biologiques (espèces invasives). Les autres impacts anthropiques comme la fragmentation et les mesures de restauration de la connectivité seront pris en compte simultanément.

² En clair un district égale un grand bassin (Rhône, Loire, etc...) soit plusieurs 10000 km²

* Elaborer des indicateurs du bon état écologique plus proches des fonctions (traits biologiques et écologiques)

Les objectifs actuels de la DCE sont focalisés sur le bon état écologique mais pas sur le bon fonctionnement. Le bon état écologique est dans son concept entendu comme représentatif d'un bon fonctionnement des systèmes mais actuellement son évaluation repose essentiellement sur des indicateurs de structure. Le manque d'indicateurs de fonctionnement rend difficile le suivi des tendances d'évolution des systèmes, l'estimation de la qualité des services rendus et l'évaluation économique des services rendus (évaluation coût-bénéfice des mesures de gestion et d'adaptation) tant pour les écosystèmes d'eau douce permanents que pour les zones humides. L'élaboration d'indicateurs recourant à des outils de modélisation permettra de prendre en compte les conditions climatiques (précipitations, températures) dans l'évaluation de l'écart à l'état de référence (Pont et al. 2006). L'application ou la finalisation de ces recherches doit tendre, sous couvert d'une analyse beaucoup plus fonctionnelle, vers l'identification et la caractérisation des processus clé indispensables aux services attendus pour développer des indicateurs de fonctionnement. Ce qui implique de : *i*) développer une analyse économique et dynamique des services écologiques rendus par ces hydrosystèmes dans le cadre de l'impact du changement climatique (aucune étude française et peu au niveau international : Ahn et al., 2000, Fausch, 2007, Butler et al. 2009) ; *ii*) bien lier les réseaux opérationnels et la recherche de façon à ce que ces réseaux, en les complétant si besoin est, puissent répondre aux questions concernant le changement climatique (stratification, données prises en compte, bancarisation, accessibilité de la donnée, temps de validation et de mise à disposition, rapprochements thématiques, outils d'aide à la décision) ; *iii*) faire émerger une masse critique de chercheurs permanents jeunes sur le sujet ; *iv*) Consolider et pérenniser les systèmes opérationnels de récolte de données sur le long terme ; en France métropolitaine, de longues chroniques d'état écologique (données environnementales et biologiques) sont disponibles, de nouvelles sont mises en place dans le cadre de la DCE. Dans cette optique d'application, deux outils doivent être privilégiés :

1) La modélisation (individus-centrés, populationnels déterministe ou stochastique). Son développement dans un **cadre statistique bayésien*** doit permettre de mieux représenter et quantifier l'incertitude et d'utiliser de sources multiples d'informations rendant les modèles plus performants.

2) Le maintien/renforcement ou la mise en place de systèmes d'observation et d'expérimentation au long terme pour la recherche en environnement qui sont labellisés par l'alliance des organismes de recherche pour l'environnement, AllEnvi (http://www.allenvi.fr/?page_id=412). Par ailleurs, la mise en place ou l'utilisation d'installations expérimentales liées à ces SOERE doivent permettre le couplage d'observation *in vivo* et *in vitro* et ainsi d'analyser plus précisément les mécanismes mis en jeu au cours des processus étudiés et des tendances observées.

91.3.2. Situations prioritaires

Elles concernent des études à engager impérativement ou à renforcer dans le domaine cognitif et sur des milieux très sensibles à l'impact du changement climatique :

* Développer une approche plus systémique et plus fonctionnelle en se focalisant sur quelques bassins pilotes.

Cela implique de dépasser les seules projections des distributions contemporaines des espèces et la vision mono-groupe biologique pour relier des évolutions biologiques mesurées avec les facteurs de forçage climatiques et anthropiques des bassins versants. Cet objectif suppose en préalable un effort collectif pour la définition d'une méthodologie adaptée.

Une des priorités françaises des dernières décennies a porté sur les poissons migrateurs et l'indice poisson rivière ce qui positionne très bien la France au niveau européen. Mais il importe d'aller plus loin en prenant en compte la biodiversité globale (végétaux, invertébrés et poissons) des différents milieux aquatiques (cours d'eau, zones humides et de transition). La DCE fait que le Réseau de Contrôle et Surveillance du SIE constitue un observatoire privilégié de la biodiversité aquatique. Plus spécifiquement, il importe de privilégier les études sur les populations en limite d'aire de répartition géographique (front de colonisation) et les espèces faisant l'objet de mesures de protection particulières. Des efforts doivent également être portés sur les milieux et les espèces des DOM-TOM en raison d'une certaine spécificité, voire vulnérabilité, liée au caractère insulaire et endémique.

* Mieux appréhender la plasticité phénotypique des espèces (voir aussi chapitres 4 et 7).

L'amélioration des connaissances sur la diversité génétique des espèces des organismes aquatiques est nécessaire pour analyser leurs normes de réaction et leur capacité adaptative au changement climatique et modifier en conséquence les modalités de leur gestion (conservation et exploitation).

* Etudier les zones humides du point de vue de 1) l'impact du changement climatique sur l'extension/diminution et le fonctionnement des zones humides riveraines dispersées au sein des paysages agricoles, 2) leur capacité de résilience en termes de modification de la qualité et de la quantité des eaux de surface et du niveau d'échanges biologiques avec les cours d'eau et 3) leur capacité à réduire le coût de l'adaptation.

92. Hydrosystèmes océaniques : filière pêche hauturière et côtière

L'impact du changement climatique (températures plus chaudes et acidification des eaux) vient aggraver les déséquilibres et les dysfonctionnements déjà présents (surpêche, dégradation des milieux, habitat, qualité de l'eau...), entraînant une baisse de la productivité globale du milieu marin. L'enjeu majeur pour la filière pêche océanique est d'évaluer ses potentialités d'adaptation au changement climatique compte tenu des conditions de pressions anthropiques excessives et de la nécessité de baisser de 3 à 4 fois la pression de pêche actuelle.

Les recherches actuelles abordent toujours les effets majeurs de la surexploitation et de la dégradation du milieu. Les impacts climatiques sont plus souvent étudiés sous l'angle diagnostic que celui de réponse évolutive des ressources marines et des pêcheries. Le principal aspect à étudier pour comprendre et prévoir les conditions d'adaptation de ces pêcheries concerne la connaissance de ces impacts sur les fonctions des écosystèmes marins. En particulier, les changements d'abondance, de composition spécifique des espèces cibles, de productivité des écosystèmes et d'environnement physique et biologique.

Les recherches prioritaires identifiées dans ce chapitre doivent permettre de comprendre et de prévoir les réponses adaptatives du milieu et de ses ressources biologiques au changement climatique pour évaluer et anticiper leur évolution et moduler leur niveau d'exploitation. Une des difficultés résulte de la superposition entre variabilités naturelle et d'origine anthropique. Des situations prioritaires ont été identifiées en fonction de leur importance et de leur niveau de sensibilité au changement : des pêcheries fragilisées, les écosystèmes littoraux (incluant estuaires) et les écosystèmes coralliens.

92.1. Contexte, enjeux et objectifs

Les océans et les mers représentent une surface de plus de 361 millions de km² soit 71 % de la surface du globe. Ils constituent l'essentiel de la ressource en eau disponible (97 % contre 3% pour l'eau terrestre) soit un total de 1320 millions de km³ d'eau de mer plus 24 millions de km³ de glace.

Compte tenu de l'étendue et du volume d'eau qu'ils représentent, les océans constituent le moteur et le régulateur principal des cycles hydriques. De plus, ils représentent 1200 fois la capacité calorifique de l'atmosphère et jouent un rôle significatif dans la régulation du climat mondial et régional et dans la modération des systèmes de chaleur. L'Europe, qui a un des plus longs traits de côte, est particulièrement soumise à l'influence des océans. Quant à la France, elle dispose de la 2ème zone économique marine (ZEE) au monde en surface (11 035 milliers de km², après les USA et devant l'Australie), ce qui lui confère une responsabilité particulière en matière de gouvernance mondiale des océans.

Surexploitation...

La biomasse animale et végétale marine est estimée à 30 milliards de tonnes. Par rapport à la biomasse terrestre, c'est 200 fois moins (et 1000 fois moins par unité de surface). Mais en raison d'un très court cycle de vie pour la majeure partie des espèces marines, la production annuelle en mer est estimée à 430 milliards de tonnes par an, soit environ la moitié de la production globale de la planète. 90 % du monde marin animal et végétal vit en zone côtière, 97 % de la biomasse de la faune benthique se situant –à moins de 350 km des côtes et 58 % à moins de 200 m de

profondeur. Du fait de cette richesse en ressources biologiques, les mers et les océans font l'objet d'une forte exploitation qui sous-tend un secteur socio-économique très important au niveau mondial, intégrant la pêche hauturière et côtière, et l'aquaculture marine.

Les pêches maritimes mondiales produisaient 82 millions de tonnes en 2006 (FAO, 2009), soit 15% des protéines animales destinées à la consommation humaine et soit plus que la production mondiale de bovins (80 millions de tonnes). La valeur de première vente de la production de pêches de capture mondiale est de l'ordre de 65,25 milliards d'euros dont 2,43 milliards de d'euros pour le poisson destiné à la transformation (FAO, 2009). Au niveau des pays industrialisés, ces pêches marines intéressent 860 000 pêcheurs, ce nombre ayant chuté de 24 % depuis 1990 (FAO, 2009).

La mise en exploitation des océans à l'échelle mondiale est une histoire récente puisque elle est restée localisée à quelques zones côtières (principalement européennes), avec des volumes de production inférieurs à 5 millions de tonnes jusqu'à la fin du XIX^{ème} siècle. La croissance devenue très forte durant quasiment tout le XX^{ème} siècle, avec la mise en exploitation progressive des différents océans mondiaux, s'est stoppée dans la période récente. Ainsi, la production mondiale des captures marines est restée très stable depuis le début des années 90 et a même diminué depuis 15 ans lorsqu'on exclut du total l'anchois du Pérou (forte influence des phénomènes écologiques et climatiques). Cette évolution traduit une situation de pleine exploitation, voire de surexploitation des potentiels de production des océans mondiaux (FAO, 2009).

Actuellement, les stocks mondiaux sont très fortement exploités : 78 % sur- et pleinement exploités et 22 % sous exploités. L'Atlantique Nord-Est est parmi les grandes zones de pêche (elle est la 5^{ème} parmi les 10 grandes zones dont la production dépasse 2 millions de tonnes) est une des plus exploitées (FAO, 2009). En dépit des nombreuses mesures de gestion établies au sein de l'Union Européenne (ex : les totaux autorisés de captures mono spécifiques et annuels), les stocks ne se rétablissent pas, menaçant à la fois les ressources et les hommes qui en dépendent (Worm et al. 2006). La situation des espèces **démersales*** est particulièrement préoccupante, avec une division par 10 des abondances de la plupart des grands stocks exploités par la pêche, comparativement à l'état vierge (Myers & Worm, 2003 ; Devine et al., 2006).

...et dégradation des milieux marins

A cet impact de la surexploitation, s'ajoute celui de la dégradation des milieux marins (modification des habitats et qualité de l'eau). Notamment, l'augmentation des flux des diverses formes d'azotes provenant des rivières a conduit à un enrichissement excessif en nutriments des zones côtières et estuariennes et à des zones en situations d'anoxie dans de nombreux secteurs côtiers et estuariens (Caraco & Cole, 1999 ; Green et al., 2004). A cette situation s'ajoute une réduction de la surface des habitats côtiers et estuariens (Coleman *et al.*, 2008) et d'une manière générale leur pollution (Halpern et al., 2008) se traduisant par une baisse de leur capacité à produire. Ces deux pressions anthropiques majeures (surexploitation et dégradation de la qualité des secteurs côtiers) sont actuellement responsables d'importants changements dans les milieux océaniques, entraînant une baisse de la productivité globale du système.

Gérer durablement les ressources...

Devant ce constat alarmant et afin de permettre une exploitation durable des ressources marines, deux démarches ont été développées. La première, initiée à partir de 1995 par la FAO est l'approche écosystémique des pêches. Elle vise à dépasser la classique gestion stock par stock en prenant en compte les interactions entre espèces, les différents impacts de la pêche à l'échelle des écosystèmes, et réciproquement les impacts anthropiques autres que ceux de la pêche sur les ressources exploitées. Cette approche écosystémique se traduit par un profond renouvellement de la recherche et a déjà des implications très directes sur la gestion des pêches, notamment en Europe. Elle conduit notamment à changer les objectifs de gestion et à l'affirmation du principe de minimisation de l'impact de la pêche sur le fonctionnement des écosystèmes (Gascuel, 2009). Dans cette optique, les engagements pris par la France (et par l'Europe) dans le cadre du sommet de Johannesburg impliquent des changements considérables. L'objectif annoncé (retour d'ici 2015 à des niveaux d'exploitation correspondant au "rendement maximum durable") suppose en effet de diminuer par 3 ou 4 la pression de pêche exercée sur la plupart des grands stocks européens.

La seconde démarche est encore plus globale. Elle s'inscrit dans le prolongement de l'évaluation des écosystèmes pour le millénaire (Millennium Ecosystem Assessment conduit sous l'égide de l'ONU) et vise à préserver l'ensemble des services rendus par les écosystèmes marins. La traduction la plus directe de cette démarche est l'adoption de la directive cadre « Stratégie pour le milieu marin », validée en 2007 par la communauté européenne et qui constitue le pilier environnement de la mise en place d'une politique maritime intégrée. Cette directive a pour objectif d'atteindre un bon état écologique des eaux marines en 2020 et devrait se traduire par une protection environnementale marine accrue en Europe. Elle complète la directive cadre sur l'eau qui prend déjà en compte les eaux côtières et estuariennes depuis 2000. La motivation principale de la directive est de lutter contre les « nombreuses menaces pesant sur le milieu marin, telles que l'appauvrissement ou la dégradation de la diversité biologique et les modifications de sa structure, la disparition des habitats, la contamination par les substances dangereuses et les nutriments, et les répercussions du changement climatique ». De plus, l'importance des zones côtières en Europe, compte tenu des services et activités associées et de leur sensibilité plus forte aux changements climatiques, nécessite de développer une réelle gestion intégrée (e.g. Anonyme, 2009).

... dans un contexte de changement climatique

A ces diverses contraintes s'ajoute maintenant l'effet du changement climatique (températures plus chaudes et acidification des eaux marines) sur les écosystèmes marins. Ces changements, de par leurs multiples impacts observés ou envisagés, renforcent les déséquilibres et dysfonctionnements déjà présents. La modification des conditions environnementales et de la capacité d'accueil des écosystèmes marins impacte en retour la distribution spatiale des espèces et des communautés et perturbe certaines des grandes fonctions du cycle biologique des organismes marins (reproduction et alimentation), avec comme possible conséquence une réduction de la biodiversité marine. Par ailleurs, la surpêche et la concurrence entre pêcheurs conduisent à la fois à une réduction des rendements des navires, à une moindre efficacité économique et à une recherche de moyens de pêche toujours plus puissants et toujours plus consommateur d'énergie. Cette évolution participe à l'émission des gaz à effets de serre. Le rapport moyen carburant/émissions de dioxyde de carbone

pour les pêches de Capture a été estimé à 3 téragrammes (10^{12}) de CO_2 par million de tonnes de combustible utilisé (FAO, 2009) soit un niveau sensiblement équivalent à celui de l'aviation.

Dès lors, un challenge majeur se pose pour la pêche marine dans le futur : comment peut-elle s'adapter au changement climatique compte tenu des conditions de pressions anthropiques excessives, de la nécessité de diminuer fortement la pression de pêche actuelle, des engagements de Johannesburg et des implications de la directive cadre « Stratégie pour le milieu marin » ?

92.2. Changement climatique : Impacts, adaptation et verrous à lever

Les changements climatiques provoquent deux modifications importantes de la structure physico-chimique du milieu marin à savoir l'augmentation de la température de l'eau et l'acidification du milieu.

Ainsi dans le golfe de Gascogne, le réchauffement touche toute la colonne d'eau sur le plateau : entre 1970 et 2000, un réchauffement de $1,5^\circ\text{C}$ est observé dans la masse d'eau comprise entre 0 et 50 mètres de fond et de $0,8^\circ\text{C}$ dans la masse d'eau comprise entre 50 et 200 mètres de fond (Blanchard & Vandermeirsch, 2005). Ce réchauffement est particulièrement sensible après 1987/1988. De même, la quantité de carbone a augmenté dans les océans proportionnellement à l'élévation des concentrations atmosphériques en CO_2 (38 % depuis l'ère pré-industrielle à 2009) (IPCC, 2007b). Cette augmentation a entraîné dans le même temps celle des ions hydrogène (30 %, Raven et al., 2005) conduisant à une diminution du PH (0.1 unité depuis l'ère pré-industrielle) et donc une acidification du milieu marin (IPCC, 2007b). Le développement de ce phénomène est envisagé sur une échelle de temps plus grande que celle du changement climatique.

Les scénarii semblent montrer que les changements climatiques se traduisent ou devraient se traduire par différents types d'impacts. Certains d'entre eux ont déjà été observés, voire décrits, d'autres se mettent en place mais leur importance spatio-temporelle et les processus impliqués ont été encore peu étudiés. Leur étude revient à tenter d'estimer l'état de vulnérabilité (impact potentiel + capacité d'adaptation) de l'écosystème marin comme cela a été fait pour l'Ecorégion marine du plateau continental du Nord-Est Atlantique (Baker, 2005).

92.2.1. Une plus grande instabilité des écosystèmes et une rapidité des processus de changement

La surexploitation des écosystèmes marins conduit à des modifications de leur fonctionnement trophique et à un accroissement global de leur instabilité (e.g. Gascuel & Pauly, 2009). Les changements climatiques apparaissent comme relativement rapides et contribuent à aggraver l'instabilité des écosystèmes. En particulier, les écosystèmes en déséquilibre constituent des milieux de vie rapidement colonisables et colonisés par des espèces tolérantes et ubiquistes. Parmi ces espèces invasives, certaines sont pathogènes ou toxiques (cas des algues dinoflagellés). Plus généralement, l'arrivée de nouvelles espèces dans le système modifie les interactions biologiques existant entre les populations et les communautés, ce qui peut avoir des répercussions sur le fonctionnement de l'écosystème dans son ensemble. Il importe donc de connaître la vitesse à laquelle se font les changements et d'identifier les meilleurs bio-indicateurs ou bio-traceurs de cette instabilité et de la rapidité des processus du changement.

92.2.2. Une évolution du fonctionnement de la chaîne trophique.

Un des constats mettant en cause le changement climatique est la modification de la géographie de la production primaire (phytoplancton) notamment sa diminution aux basses latitudes du fait de l'augmentation de la stratification thermique des eaux (Behrenfeld et al., 2006) (Figure 92221). De ce fait, il apparaît que les zones tropicales stratifiées et très pauvres d'un point de vue de la productivité biologique vont s'étendre (Polovina et al., 2008). Cette situation concerne notamment les systèmes d'upwelling qui représentent 20 à 30 % de la production mondiale en ressources marines (pour 3 % de la surface océanique). Ces zones sont caractérisées par des remontées d'eaux profondes, riches et froides vers la surface, remontés qui induisent de très forte productivité. La disparition de certains upwellings et le renforcement d'autres risquent donc de modifier considérablement la localisation et l'étendue des zones à haute productivité. Ces modifications de production auront des conséquences importantes sur les ressources vivantes marines et leur exploitation. Ainsi par exemple, le réchauffement de la mer depuis le début des années 1980 en modifiant la production marine a entraîné une diminution de la survie en mer des leptocéphales et des juvéniles d'anguille européenne pendant leur trajet entre la mer des Sargasses et leur arrivée sur les côtes européennes (Bonhommeau et al., 2008). Cet impact sur la phase marine a contribué à faire passer l'anguille à un statut d'espèce en danger. Plus généralement, la production halieutique est liée directement aux capacités de production des écosystèmes et donc au niveau de production primaire (Chassot et al., 2010). La biogéographie des pêches mondiales sera donc affectée par le réchauffement climatique, avec des conséquences importantes notamment pour les régions tropicales dépendantes de la pêche (Cheung et al., 2010) (Figure 92222).

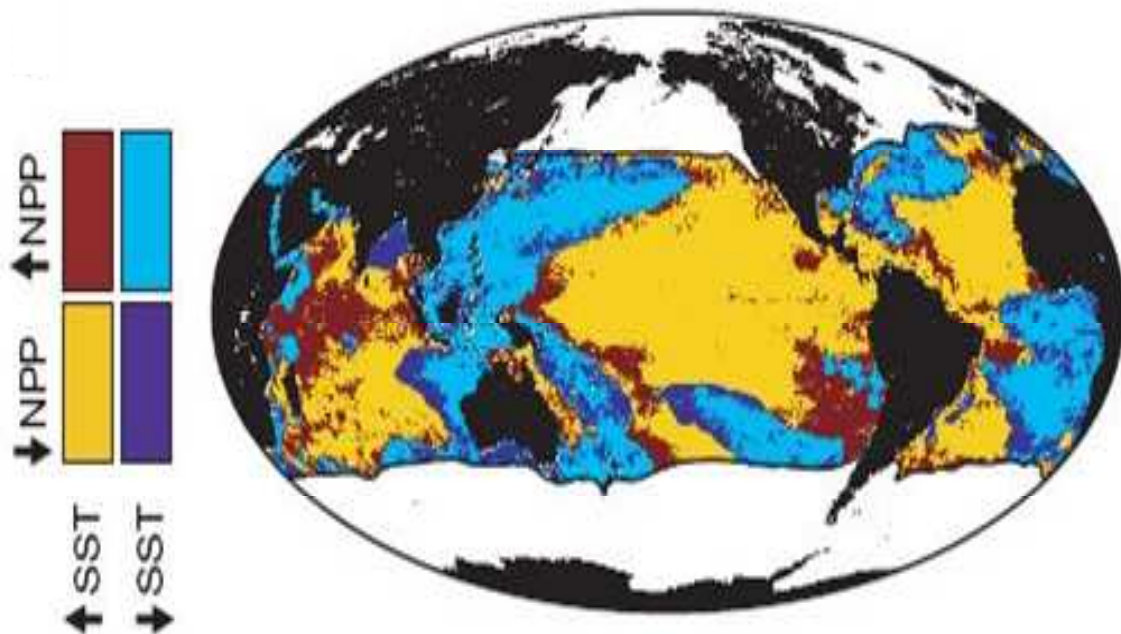


Figure 92221. Relation inverse entre la production primaire nette (NPP) et la température de l'eau de surface des Océans pour 74% des océans entre 1999 et 2004. En orange augmentation de la température et diminution de la production primaire, en bleu clair diminution de la température et augmentation de la production primaire, en noir diminution de la température et de la production primaire et en rouge foncé augmentation de la température et de la production primaire d'après Behrenfeld et al. (2006).

Cette situation de dysfonctionnement concerne également les zones sous influence des panaches estuariens avec notamment de fortes concentrations actuelles en nutriments et en **xénobiotiques***. Ces concentrations pourraient s'élever encore, en fonction de l'évolution des pratiques agricoles résultant du changement climatique. Elles sont le déterminant majeur des phénomènes d'eutrophisation en zone côtière, qui peuvent classiquement prendre deux grands types d'apparence, selon que les algues proliférantes sont planctoniques ou macrophytiques (Menesguen et al., 2001). D'autre part, ces mêmes systèmes subissent des apports importants de substances polluantes ainsi que de profondes modifications physiques (Halpern et al. 2008) qui affectent leurs fonctions écologiques. Ce constat soulève deux questions : Comment le changement climatique agit-il sur le maillon d'entrée de la chaîne trophique et comment modifie-t-il l'organisation de cette chaîne (relation entre stratification thermique, régime des vents, efficacité du transfert et dynamique trophique) ?

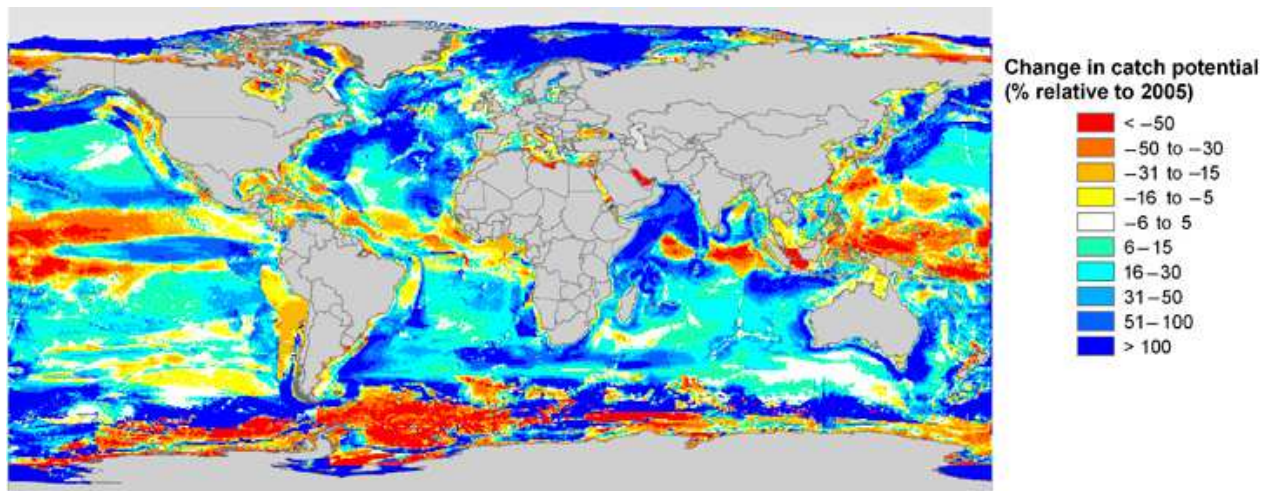


Figure 92222. Changement dans le potentiel de capture global sous le scénario de changement climatique A1B .Les zones de couleur montrent les changements en 2055 relativement au potentiel de capture de 2005 (d'après Cheung et al. 2010).

92.2.3. Des réponses adaptatives des organismes marins.

On observe actuellement une migration d'espèces des eaux tempérées vers les eaux froides. On peut citer deux exemples. Le Rouget barbet est devenu une ressource exploitée importante dans les pêcheries de Manche Est alors que l'espèce était inexistante il y a 20 ans. De même, l'abondance des populations de morue dans les parties froides de leur aire de répartition a tendance à augmenter avec la hausse des températures, tandis que celles vivant dans les eaux plus chaudes ont tendance à avoir des effectifs en baisse lorsque les températures augmentent (Planque & Frédou, 1999). D'une manière générale le remplacement d'espèces subpolaires par des espèces sub tropicales est général et rapide, comme en atteste la situation des poissons plats dans le golfe de Gascogne (Hermant et al., 2010). Ceci signifie un changement non seulement dans la répartition et donc dans l'abondance spatiale, mais également dans les stratégies démographiques et d'histoire de vie (âge de première maturité, phénotype et génotype). D'une manière plus concrète, cela signifie une baisse du potentiel d'exploitation halieutique car les espèces méridionales sont généralement de plus petite taille que les espèces septentrionales qu'elles remplacent et par conséquent d'un intérêt commercial moindre (Pauly,

1994). Ces modifications structurelles et fonctionnelles chez les peuplements exploités pourront être amplifiées par des conditions d'exploitation non adaptées à la "nouvelle" productivité des stocks. Tout dépendra alors de la capacité adaptative des espèces prélevées. Ces modifications s'observent également pour des espèces **diadromes*** comme le saumon atlantique pour lequel la baisse de productivité marine et la forte exploitation par pêche à la ligne sur les plus gros individus ont diminué la taille moyenne individuelle et l'abondance des stocks (Quinn et al., 2006). Se posent alors deux questions : Quelles sont les normes de réaction thermique des espèces et quelle est l'importance de la niche thermique et des autres facteurs d'habitat dans cette nouvelle répartition ?

92.2.4. Des changements de la physiologie des organismes et une diminution de leur survie.

L'acidification du milieu transforme la chimie du milieu marin en diminuant des ions carbonatés. Or ces ions sont nécessaires à l'élaboration du squelette de nombreuses espèces planctoniques benthiques et des coraux. Le changement climatique peut alors affaiblir les processus nécessaires au maintien des structures dures qui sont notamment à la base du fonctionnement des écosystèmes récifaux. Par ailleurs, cette diminution du PH du milieu marin peut se traduire par des modifications des taux de survie de certains stades clés dans le cycle biologique et du recrutement des espèces notamment. Enfin, cet effet de l'acidification, qui peut induire en retour des impacts sur le climat, viendra se rajouter au réchauffement de l'eau, voire à l'augmentation de la présence de xénobiotiques en milieu marin.

92.2.5. Une fragilisation d'habitats essentiels.

De nombreux habitats essentiels tels que les zones de nourriceries, les estuaires, les mangroves, les récifs coralliens se fragilisent en raison d'une modification de leur structure physique et trophique liée à l'élévation du niveau marin et l'augmentation des flux de nutriments et de xénobiotiques. Le niveau de la mer s'est élevé de 17 cm au cours du xxe siècle et de 3 mm par an entre 1993 et 2003, soit le double de la moyenne enregistrée durant tout le xxe siècle (US EPA, 2009). La diminution des apports d'eau douce en zone littorale suite à la diminution des débits fluviaux et les modifications inhérentes (réduction et/ou concentration) des flux terrigènes (MES, nutriments, xénobiotiques) va impacter fortement le fonctionnement des zones de transition entre les milieux eau douce et marin.

Ainsi, la connaissance de ces impacts et des réponses fonctionnelles et adaptatives de l'écosystème ou des organismes constitue le verrou à lever pour prédire les évolutions majeures. Il s'agit ainsi d'évaluer la capacité d'adaptation des écosystèmes marins et des exploitations halieutiques au changement climatique. Cette connaissance passe par l'identification et l'analyse *i*) des normes de réaction du milieu et de ses ressources biologiques *ii*) des conditions de résilience/résistance en conditions d'exploitation. Une des difficultés de cette estimation résulte de la superposition et des interactions entre variabilité naturelle et variabilité d'origine anthropique, cette dernière étant elle-même issue de l'impact de différentes contraintes humaines majeures sur le milieu marin (destruction d'habitats, surexploitation et pollution) (Gouletquer, 2008). Une telle analyse fonctionnelle de ces impacts doit permettre d'éviter que les changements opérés dans les systèmes naturels conduisent à augmenter la vulnérabilité au changement climatique.

92.3. Perspectives de recherche

On identifie ici, d'une part les priorités de recherche et d'autre part les chantiers jugés prioritaires parce qu'ils demandent des réponses sur le très court terme.

92.3.1. Priorités de recherches

Quatre priorités de recherche peuvent être identifiées pour accompagner l'adaptation des pêches au changement climatique. Elles se construisent à partir des enjeux écologiques et économiques auxquels les pêcheries sont confrontées.

1. Minimiser les impacts écologiques, dans un contexte de forte variabilité climatique, en répondant aux objectifs finaux des deux directives cadres *DCE* et *DCSM* (ressources et écosystèmes en bonne santé) selon trois axes : *i*) la modification des règles actuelles de gestion monospécifique, en passant de la mortalité par pêche (F_{pa}^*) à celle optimisant la capture (F_{MSY}^*) (approche plus précautionneuse), *ii*) le développement d'indicateurs et de modèles qui permettent de déterminer les paramètres de résilience des écosystèmes en tenant compte de la biodiversité et des réseaux trophiques, *iii*) la réduction des impacts sur les habitats.

2. Améliorer la viabilité économique des pêcheries dans un contexte de forte variabilité des quantités, des produits, ... Ceci signifie de mobiliser les sciences sociales pour répondre à des questions concernant *i*) l'adaptabilité des métiers, des flottilles et de la puissance de pêche, des marchés et *ii*) le type de régulations et leur échelle de temps et d'espace.

3. Répondre à la demande de produits aquatiques et valoriser un produit de plus en plus rare en *i*) analysant la complémentarité possible entre pêche et aquaculture (ce qui implique des localisations favorables et la domestication d'un plus grand nombre d'espèces), *ii*) développant de nouveaux produits (algues) et en réorientant les marchés en fonction des attentes des consommateurs ou des objectifs de développement durable (limiter la consommation de poisson sauvage pour l'aliment en aquaculture) et *iii*) élaborant des technologies innovantes avec notamment l'utilisation des co-produits de la pêche (produits médicaux, extraits de protéines et d'omega3, ...)?

4. Améliorer la gouvernance dans un monde changeant en mettant en œuvre une gestion adaptative impliquant les acteurs (co-expertise, co-gestion, ...) et en renforçant l'organisation régionale des pêches qui semble la pierre angulaire de la gestion internationale (FAO, 2009).

L'ensemble de ces recherches doit permettre d'identifier, de comprendre et de prévoir les réponses adaptatives des écosystèmes et de leurs ressources biologiques, pour anticiper leur évolution spatio-temporelle et moduler les niveaux d'exploitation. Leur mise en œuvre implique le développement complémentaire de trois types de démarches et outils permettant d'élaborer des outils d'aide à la décision et des stratégies alternatives de gestion :

* L'élaboration d'indicateurs pour caractériser et suivre l'évolution de l'état de santé des communautés de poissons et invertébrés exploitées et des écosystèmes marins (Bertrand et al., 2005).

* La modélisation prédictive avec la mise en œuvre de modèles d'évaluation des stocks intégrant une dimension spatiale et les interactions ressources/habitat, mais surtout avec le développement des modèles écosystémiques intégrant les interactions entre espèces, les comportements des pêcheurs et l'impact des phénomènes extrêmes (température, acidification).

* Le développement des Aires Marines protégées (AMP) comme systèmes d'observation (SO) et d'évaluation de l'évolution de l'écosystème marin. Ces AMP peuvent notamment concerner des zones sensibles (habitats essentiels, zones à forte biodiversité, ...). La possibilité de moduler l'exploitation sur ces zones permet à la fois des observations indirectes (suivi des pêcheries commerciales) et directes (pêches expérimentales, observations acoustiques et visuelles). De même, la mise en place ou le maintien/renforcement des ORE/SOERE reste à privilégier.

92.3.2. Situations prioritaires

Ces situations prioritaires concernent :

- Certaines pêcheries fragilisées telles celles du thon rouge, de l'anchois et de la morue.
- Les écosystèmes littoraux y compris les estuaires et les mangroves. Ces écosystèmes abritent les zones de nourriceries de nombreuses espèces et jouent un rôle essentiel dans la distribution et l'abondance des espèces de poissons. Actuellement, ces milieux côtiers et estuariens connaissent des phénomènes d'eutrophisation et de pollution grandissants qui pourraient éventuellement s'accélérer, suite notamment à l'apparition de nouvelles pratiques agricoles résultant du changement climatique. A cette modification de la qualité du milieu pourrait se surajouter à terme une augmentation du niveau de la mer, une possible réduction de la pluviométrie et un accroissement des ponctions d'eaux fluviales au détriment du débit naturel des fleuves se traduisant par une modification de la structure morpho-hydrodynamique des zones côtières, une plus grande salinité des estuaires et une limitation des échanges entre le milieu marin et continental.
- Certains milieux plus fragiles tels que les écosystèmes coralliens pour lesquels la France a le 4^{ème} rang mondial en superficie (soit 10% des récifs mondiaux). L'écosystème corallien est avec la forêt tropicale l'un des milieux abritant la plus grande biodiversité faunistique et floristique (90% des 30 000 espèces de poissons marins et 25% des espèces marines). Ce milieu très fragile aux relations entre compartiments physiques et biologiques très complexes a une grande importance socio-économique (intéresse 500 millions de personnes). Sa sensibilité aux contraintes anthropiques multiples (pollutions liées aux cultures et élevage intensifs, érosion des sols, pêche) fait que plus des 30 % des récifs coralliens ont déjà disparu et que leur disparition complète est annoncée dans 50 ans.

93. Aquaculture

Si la France se place en tête des pays européens pour la conchyliculture et occupe le troisième rang mondial pour la production de truites, l'approvisionnement du marché français est fortement dépendant des importations, en particulier venant d'Asie. L'enjeu actuel est le développement de l'aquaculture française malgré le changement climatique.

Cet objectif nécessite des adaptations à la fois des systèmes de production, des animaux et de la législation ainsi que l'évaluation de la durabilité des solutions envisagées. La majorité de la production aquacole française est réalisée en systèmes ouverts, vulnérables aux intempéries et aux variations des niveaux d'eau. Le développement des élevages aquacoles est actuellement limité par la compétition pour l'occupation de l'espace, et les contraintes environnementales liées à la directive cadre sur l'eau.

Les aspects à étudier concernent l'évaluation et la hiérarchisation des risques liés au changement climatique, la faisabilité d'innovations technologiques qui permettraient de produire au large, en eaux profondes ou en circuits fermés et leur acceptation par les producteurs et les consommateurs, les capacités d'adaptation des espèces aux modifications du milieu et leur résistance aux agents pathogènes. Ce qui implique de mobiliser des compétences de différentes disciplines : biologie, socio-économie, droit, afin d'aboutir à des mutations technologiques durables des systèmes de production, de permettre le choix raisonné de nouvelles espèces ou l'adaptation de souches plus résistantes aux changements du milieu et aux bio agresseurs ainsi que l'évolution de la législation pour accompagner les nouveaux modes de production et en limiter les risques sanitaires, environnementaux et économiques.

93.1. Contexte, enjeux et objectifs

L'aquaculture permet de répondre à la demande croissante en produits aquatiques que les captures de pêche ne peuvent pas couvrir. Au cours des 10 dernières années, la production aquacole mondiale a connu une croissance de 8% par an. Aujourd'hui, près de la moitié (47% en 2006) des produits aquatiques offerts sur le marché mondial proviennent de l'élevage. La production se répartit entre poissons d'eau douce (54%), poissons marins (9%), mollusques (27%) et crustacés (10%) (FAO, 2009a). Le maintien d'une croissance continue de l'aquaculture est nécessaire pour répondre à la demande du marché qui augmente avec la population mondiale. L'élevage aquacole est pratiqué principalement en Asie qui fournit 89% de la production mondiale. Le marché français est fortement dépendant des importations qui alimentent non seulement les étals mais aussi le secteur de la transformation très actif en France (300 entreprises générant 13 500 emplois et 3 milliards d'euros par an).

L'élevage aquacole français se répartit entre métropole et outre-mer. L'aquaculture d'eau douce, principalement métropolitaine, repose sur la truite : 34 000 tonnes sont produites par an par 450 entreprises, en majorité de petite taille. Avec une valeur marchande de 95 millions d'euros, la production française de truites occupe le troisième rang mondial mais elle a baissé de plus de 20% en 10 ans et le nombre d'exploitations a diminué de moitié. La France produit aussi 8 000 tonnes de poissons d'étangs (GraphAgri2009).

L'aquaculture marine est dominée par la production d'huitres (130 000 tonnes) et de moules (64000 tonnes); 3250 fermes génèrent près de 10 000 emplois équivalents temps plein et 380 millions d'euros de revenus bruts. La France est en tête des pays européens pour la conchyliculture. La production de poissons marins concerne principalement les jeunes stades dont la moitié est exportée. Le grossissement s'est peu développé (8000 tonnes de bar, daurade, turbot et maigre produits en 2007 par une quarantaine de fermes, GraphAgri 2009) notamment en raison de la compétition avec le tourisme pour l'usage de l'espace littoral, des contraintes environnementales et de la concurrence avec des pays méditerranéens (Grèce, Turquie) où la main d'œuvre est moins couteuse et la législation plus favorable. L'élevage de poissons marins tropicaux à croissance rapide (tambour-rouge ou ombrine (*Scianops ocellatus*) et cobia (*Rachycentron canadum*)) a débuté (400 tonnes actuellement) dans les territoires français d'outre-mer comme la Réunion et Mayotte dans l'Océan indien ou encore la Martinique. L'élevage de crevettes est réalisé en Nouvelle-Calédonie depuis 1981. Enfin, signalons la production de perles d'huitres à Tahiti qui occupe 4000 personnes et constitue la seconde source de revenus de ce territoire après le tourisme.

L'enjeu est de maintenir voire de développer l'aquaculture française malgré le changement climatique afin de limiter le recours aux importations pour approvisionner le marché pour la consommation humaine et pour la transformation mais aussi de conserver les emplois et les revenus associés à la production aquacole.

93.2. Changement climatique : Impacts, adaptations et verrous à lever

93.2.1. Conséquences potentielles du changement climatique en fonction des conditions de production

L'aquaculture se pratique à la fois en eaux douces continentales, en eaux saumâtres et en eaux de mer, aussi, toute conséquence du changement climatique sur ces biomes aura-t-elle des répercussions sur la production aquacole. D'après la récente étude publiée par la FAO (2009b), le changement climatique pourrait se traduire par une augmentation de l'occurrence des phénomènes météorologiques instables tels que les tempêtes ou les ouragans, l'élévation du niveau de la mer, la modification de la géomorphologie des zones littorales, l'augmentation de l'amplitude des variations thermiques associée à une hausse générale de la température moyenne des eaux, l'allongement de la durée des étiages des cours d'eau alimentant les piscicultures et le changement des paramètres physico-chimiques (disponibilité en oxygène dissous, pH, salinité), nutritionnels et sanitaires (plancton, flore bactérienne..) des eaux.

Les organismes aquatiques sont particulièrement dépendants du milieu dans lequel ils vivent. Chez ces animaux poïkilothermes, les dépenses énergétiques augmentent avec la température de l'eau, entraînant un accroissement des besoins en oxygène. La limite supérieure de température que chaque espèce peut tolérer dépend de sa capacité à extraire l'oxygène de l'eau et à le transporter vers les tissus. Dans la zone de préférence thermique, l'élévation de température peut avoir un effet positif en stimulant l'appétit et la croissance des animaux. Les modifications des autres paramètres physico-chimiques de l'eau tels que la disponibilité en oxygène, la salinité, le pH (acidification) peuvent affecter les animaux directement en perturbant leur reproduction (fertilité, sex-ratio), leur croissance et leur résistance aux maladies ou indirectement en favorisant le développement de bio-agresseurs nouveaux ou plus virulents. Si certains changements concernent tous les systèmes aquatiques, d'autres auront des impacts spécifiques sur certains milieux : par exemple, l'élévation du

niveau de la mer affectera principalement les zones littorales, alors que l'allongement de la durée des étiages concernera spécifiquement les élevages en eaux continentales. Les impacts potentiels du changement climatique sur l'aquaculture française doivent donc être analysés pour chacune des productions.

Les huîtres (en majorité huîtres creuses du Pacifique *Crassostrea gigas*) et les moules sont produites principalement le long des côtes atlantiques (de la Basse Normandie à l'Aquitaine) et méditerranéennes (Languedoc-Roussillon). Le captage de larves d'huîtres en milieu naturel représente encore plus de 50% de l'approvisionnement de la filière en France, malgré le développement d'écloseries. De récentes études montrent qu'une acidification des océans de seulement 0,5 unité de pH affecterait négativement non seulement la formation de la coquille mais également le développement et la survie larvaire de l'huître (Dove et Sammut, 2007). Les mollusques peuvent être élevés directement sur les fonds en eaux profondes, dans des poches plastiques disposées sur des tables métalliques sur l'estran, ou sur des filières suspendues, des tables ou des pieux (bouchots). Ces dernières sont les techniques d'élevage les plus utilisées en France. La montée des eaux en zones côtières pourrait mettre en péril les élevages sur tables et sur pieux. Pour s'affranchir de ces risques, des évolutions technologiques relevant de l'ingénierie aquacole sont nécessaires. Les mollusques puisent leur nourriture dans le milieu, ils sont donc affectés par les variations d'abondance du plancton et les modifications de composition en éléments minéraux. Le changement climatique se traduit déjà par l'apparition de phénomènes nouveaux tels que la prédation conchylicole par des espèces à préférence thermique plus élevées (daurade) en Méditerranée et une occurrence de plus en plus importante de mortalités estivales des naissains d'huître creuse (35 millions d'indemnités de calamité agricole en 2008) fragilisant la profession et le tissu économique littoral qui en dépend. Les recherches conduites pour développer des approches et des outils permettant de limiter les épisodes de mortalité et d'améliorer la résistance des animaux aux conditions stressantes et aux agents infectieux doivent être intensifiées.

L'élevage de crevettes (principalement *Penaeus stylirostris*) en Nouvelle Calédonie est réalisé dans des bassins en terre qui pourraient être détériorés en cas de montée des eaux. L'augmentation de la salinité dans les zones littorales et estuariennes ainsi que l'acidification des eaux sont susceptibles de perturber la physiologie des animaux. Les capacités d'adaptation de cette espèce, et des crevettes en général, aux changements des paramètres physico-chimiques de l'eau sont mal connues. Par contre, il est avéré que les Pénéides sont particulièrement sensibles aux agents infectieux. Des progrès ont été réalisés au cours des dernières années pour réduire les pertes d'aliment qui contribuent à l'eutrophisation du milieu, favorisant les agents pathogènes ; ils doivent être poursuivis.

Les poissons sont élevés soit en systèmes ouverts, dans des bassins alimentés par des eaux de source, de rivière ou de mer (truite, bar) ou en cages principalement dans les eaux méditerranéennes (bar, daurade) et les zones tropicales (Mayotte Réunion – ombrine et cobia) soit en circuits recyclés (turbot et jeunes stades de différentes espèces notamment marines). Une des solutions envisagées pour le développement de la pisciculture marine est l'élevage en cages en eaux profondes afin de limiter la compétition avec d'autres usages du littoral. Le développement de systèmes de production (cages...) suffisamment robustes pour résister aux instabilités météorologiques constitue un enjeu de recherche en ingénierie appliquée déterminant pour l'essor des élevages en milieu ouvert. Les élevages en circuits d'eau recyclée épargnent aux poissons et aux structures les conséquences des aléas climatiques mais

ils sont peu développés en France. Des efforts restent à réaliser pour les rendre économiquement performants et compatibles avec les objectifs d'atténuation du changement climatique.

L'élevage de poissons et de crevettes en systèmes intensifs ou semi-intensifs nécessite l'apport de nourriture. Les aliments aquacoles contiennent des farines et huiles de poissons fabriquées à partir de poissons fourrage issus de la pêche minotière. L'anchois du Pérou est la principale espèce utilisée pour produire ces ingrédients alimentaires or son abondance est fortement affectée par les phénomènes climatiques tels que El Niño. Des recherches ont permis de réduire (de moitié en 10 ans) les quantités de matières premières d'origine marine dans les aliments aquacoles– Tacon et Metian, 2008 ; Kaushik et Troell, 2010) en les remplaçant par des produits végétaux (Corraze et Kaushik, 2009 ; Médale et Kaushik, 2009). Cependant, les recherches dans ce domaine doivent être poursuivies car le changement climatique risque de réduire la disponibilité de ces ressources alimentaires alors que l'essor de l'aquaculture mondiale fait augmenter la demande.

93.2.2. Verrous à lever pour l'adaptation des productions aquacoles au changement climatique

Des adaptations sont nécessaires à la fois au niveau des animaux, des structures de production et de la gouvernance de la filière.

Les verrous majeurs identifiés concernent:

- les risques liés au changement climatique: évaluation et hiérarchisation des risques sur les systèmes d'élevage aquacole et les animaux de nature à compromettre la production française métropolitaine et ultra-marine (dimension nationale) et l'approvisionnement du marché (dimension internationale);
- les capacités d'adaptation des animaux : conséquence des facteurs physico-chimiques et de leurs interactions sur la physiologie des organismes aquatiques et leur résistance aux perturbateurs et bio-agresseurs, différences de capacités d'adaptation aux facteurs du milieu entre espèces et souches;
- les ressources alimentaires : quelles alternatives efficaces et durables pour s'affranchir de l'emploi des farines et huiles de poissons pour les aliments aquacoles;
- les conditions de production: les concilier avec les exigences de la directive cadre sur l'eau (DCE) et les adapter pour faire face aux impacts du changement climatique, détecter l'émergence de nouveaux bio-agresseurs ou limiter l'augmentation de leur virulence nécessite des innovations technologiques, des évolutions des conduites d'élevage et des adaptations des systèmes de surveillance et de contrôle des échanges d'animaux et de leurs produits dans un cadre réglementaire.
- la socio-économie de la filière: capacités d'adaptation aux mutations technologiques, notamment des entreprises de faible taille, besoins en terme de politique publique pour accompagner les mutations, évaluation de la durabilité des différents systèmes de production, identification des besoins d'évolution de la législation, acceptabilité des nouveaux produits et modes de production.

93.3. Priorités de recherche pour l'adaptation de l'aquaculture au changement climatique

Un programme national a été lancé avec les professionnels pour le développement de la pisciculture. Comme indiqué précédemment, des programmes de recherche sont en

cours depuis plusieurs années pour limiter les mortalités estivales des mollusques (huîtres en particulier) et améliorer leur résistance aux stress et aux agents pathogènes. Pour les poissons et les crevettes, l'effort de recherche a principalement porté sur l'adaptation aux conditions d'élevage (domestication), l'intensification de l'aquaculture étant une pratique relativement récente (1970). A notre connaissance, aucun programme n'est spécifiquement dédié à l'analyse des adaptations de ces animaux au changement climatique.

Les recherches nécessaires pour lever les verrous identifiés concernent différents domaines disciplinaires: économiques et juridiques, technologiques et biologiques (physiologie de l'adaptation, génétique, nutrition, pathologie...).

Droit et économie

- Analyser les conséquences socio-économiques des mutations technologiques (impacts en termes de restructuration du secteur, d'organisation des marchés, d'acceptabilité par les consommateurs, de politique publique de gestion du domaine public maritime, d'aménagement du littoral et du territoire...);
- Evaluer la durabilité des nouveaux systèmes d'élevages;
- Développer les connaissances nécessaires à l'évolution de la législation relative à l'environnement, à l'introduction de nouvelles espèces, à la régulation de la circulation transfrontalière des animaux et de leurs produits.

Ingénierie aquacole

- Etudier les alternatives aux élevages traditionnels? Explorer la faisabilité des élevages en eau profonde (rentabilité des investissements requis, gestion de l'accès à des concessions au large), susciter des innovations pour des systèmes mieux intégrés dans la frange littorale afin de limiter les conflits d'usage, économe en eau et peu polluants pour répondre aux contraintes environnementales, analyser la durabilité des circuits d'eau recyclée dans les conditions nationales;
- Tester des matières premières alternatives aux ressources marines, compatibles avec l'atténuation du changement climatique en fonction du système d'élevage: analyser les conséquences sur l'efficacité de production, la santé, la qualité des produits et l'environnement.

Biologie

- Connaître les seuils de tolérance des espèces et souches à l'égard des facteurs physico-chimiques de l'eau (température, oxygène, salinité, pH) pour des fonctions physiologiques clés telles que la reproduction et la croissance;
- Sélectionner des souches plus robustes et/ou très adaptables. Cet objectif nécessite de définir les fonctions biologiques les plus déterminantes pour la survie et le développement harmonieux des animaux afin d'identifier de nouveaux caractères dont le déterminisme génétique devra être évalué.
- Identifier de nouvelles espèces: quels critères prioritaires, quels besoins de domestication/adaptations aux conditions françaises, quels risques (notamment au regard de la biodiversité et de la protection sanitaire)
- Préserver la santé des animaux aquatiques: bien que les bio-agresseurs soient différents, les besoins de recherche sont identiques aux autres productions animales: détection des agents pathogènes, conditions de leur émergence, démonstration de leur implication dans un processus délétère ayant un impact économique, définition des risques (rôle des paramètres physicochimiques du milieu) et gestion de ces risques (méthodes prophylactiques) impliquant une coordination entre instituts de recherche, services de l'état et professionnels pour une gestion intégrée des élevages

aquacoles. Dans ce contexte, le rôle des populations sauvages (zones littorales et estuariennes) comme vecteur de pathogènes doit être évalué.

Les situations à privilégier concernent les deux productions majoritaires en France, la conchyliculture et la production de truites, mais une diversification des espèces et le développement de l'élevage de poissons marins sont nécessaires dans l'objectif de réduire le recours aux importations pour approvisionner le marché national et conserver la biodiversité dans le contexte des changements globaux.

Bibliographie

- Ahn S., De Steiguer J. E. Palmquist R.B. & Holmes T.P., 2000. Economic analysis of the potential impact of climate change on recreational trout fishing in the Southern Appalachian Mountains: An application of a nested multinomial logit model. *Climatic Change*, 45, 493-509.
- Amoros C. & Bornette G., 2002. Connectivity and biocomplexity in waterbodies of riverine floodplains. *Freshwater Biology*, 47, 761-776
- Anneville, O., S. Gammeter, et al., 2005. Phosphorus decrease and climate variability: mediators of synchrony in phytoplankton changes among European peri-alpine lakes. *Freshwater Biology*, 50, 1731-1746.
- Anonyme, 2009. Climate change and Water, Coasts and Marine Issues. Commission staff working document, Commission of the European Communities, Brussels, SEC 386/2, 8 p.
- Baglinière J.L., Rivot E., Roussel J-M, Perrier C., Bal G., Prévost E., Beall E., Piou C., Lassalle G. & Rochard E. 2010. Changements climatiques et dynamique de populations de saumon Atlantique (*Salmo salar*). In "ARP Gestion de l'Incidence du Changement climatique et biodiversité (GICC2-Biodiversité) : Changement climatique et stratégies démographiques des populations piscicoles D. Pont (coord). Rapport scientifique de fin de contrat, 135 p.
- Baglinière J.L., Sabatié M.R., Rochard E., Alexandrino P. & Aprahamian M.W., 2003. The allis shad (*Alosa alosa*): Biology, Ecology, Range, and Status of Populations. In K.E. Limburg and J.R. Waldman (Eds), *Biodiversity, Status and Conservation of the World's Shad*. American Fisheries Society Symposium, 35, 85-102.
- Baglinière, J. L., Denais L., Rivot E., Porcher J. P, Prévost E., Marchand F. & Vauclin V, 2004. Length and age structure modifications of the Atlantic salmon (*Salmo salar*) populations of Brittany and Lower Normandy from 1972 to 2002. Technical report, Institut National de la Recherche Agronomique and Conseil Supérieur de la Pêche, Rennes.
- Baker T., 2005. Vulnerability assessment of the North East Atlantic shelf marine ecoregion to climate change. Report of workshop to WWF.
- Bal G., 2011. Evolution des populations française de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) et changement climatique. Thèse Université de Rennes I, 165 p.
- Bannerman S., 1997. Landscape ecology and connectivity. British Columbia of Forests Research Program, 9 p.
- Bates, B.C., Kundzewicz, Z., W., Wu, S. & Palutikof, J., 2008. Le changement climatique et l'eau. Document technique VI du GIEC, OMM-PNUE, Genève, 228 p.
- Behrenfeld, M. J., O'Malley R. T. Siegel D. A., McClain C. R., Sarmiento J. L., Feldman G. C., Milligan A. J., Falkowski P. G., Letelier R. M. & Boss E. S. 2006. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature* 444, 752-755.

- Bertrand J., Cochard M-L., Coppin F., Le Pape O., Mahe J-C., Morin J., Poulard J-C., Rochet M-J., Schlaich I., Souplet A., Trenkel V. & Verin Y., 2005. Poissons et invertébrés au large des côtes de France : Indicateurs issus des pêches scientifiques. Bilan 2002. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00000/1091>.
- Blanchard F., Thebaud O., Guyader O., Lorange P., Boucher J. & Chevaillier P., 2006. Effets de la pêche et du réchauffement climatique sur la coexistence spatiale des espèces de poissons du golfe de Gascogne. Conséquences pour les pêcheries. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00000/6347/>
- Blanchard, F. & Vandermeirsh, F., 2005. Warming and exponential abundance increase of the subtropical fish *Capros aper* in the Bay of Biscay (1973-2002). *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Biologies*, 328: 505-509.
- Bonhommeau S., Chassot E. & Rivot E., 2008. Fluctuations in European eel (*Anguilla anguilla*) recruitment resulting from environmental changes in the Sargasso Sea. *Fisheries Oceanography*, 17, 32-44.
- Briand, J. F., Leboulanger C., et Humbert J-F., 2004. *Cylindrospermopsis raciborskii* (Cyanobacteria) invasion at mid-latitudes: Selection, wide physiological tolerance, or global warming? *Journal of Phycology*, 40, 231-238.
- Buisson L. & Grenouillet G., 2009. Contrasted impacts of climate change on stream fish assemblages along an environmental gradient. *Diversity & Distributions*, 15 (4), 613-626.
- Butler J.R.A., Radford A., Riddington G. & Laughton R., 2009. Evaluating an ecosystem service provided by Atlantic salmon, sea trout and other fish species in the River Spey, Scotland: The economic impact of recreational rod fisheries. *Fisheries Research* 96, 259-266.
- Caraco N. F. & Cole J. J., 1999. Human impact on nitrate export: An analysis using major world rivers. *Ambio*, 28, 167– 170.
- Chassot E., Bonhommeau S., Mélin F., Watson R., Gascuel D. & Le Pape O., 2010, sous presse) World fish catch primary production constrains fisheries catches. *Ecology Letters*, 13: 495–505.
- Cheung W.L., Lam V. W.Y., Sarmiento J.L., Kearnez K., Watson R., Zeller D. & Pauly D., 2010. Large-scale redistribution of maximum fisheries catch potential in the global ocean under climate change. *Global change biology*, 16: 24-35.
- Coleman J. M., Huh O. K., & DeWitt B., 2008. Wetland loss in world deltas. *Journal of coastal research*, 24, 1-14.
- Corraze G., Kaushik S., 2009. Alimentation lipidique et remplacement des huiles de poisson par des huiles végétales en aquaculture. *Cahiers de l'Agriculture*, 18, 112-118
- Cucherousset J., 2006. Rôle fonctionnel des milieux temporairement inondés pour l'ichtyofaune dans un écosystème sous contraintes anthropiques : approches communautaires, populationnelle et individuelle. Thèse doctorat, Université de Rennes 1, 267 p.
- Daufresne M. & Boët P., 2007 Climate change impacts on structure and diversity of fish communities in rivers. *Global Change Biology* (2007) 13, 1–12
- Daufresne M., 2008. Impacts des pressions climatiques et non climatiques sur les communautés piscicoles de grands fleuves français. *Hydroécologie Appliquée*, 16, 109–134.
- Daufresne M., Roger M.C., Capra H. & Lamouroux N., 2004. Long-term changes within the invertebrate and fish communities of the Upper Rhône River: effects of climatic factors. *Global Change Biology*, 10, 124-140.

- De Gaudemar, B. & Beall E., 2003. Variation of reproductive behaviour and success of males adopting different tactics in Atlantic salmon." *Journal of Fish Biology*, 63(Supplement A): 250.
- Delpech C., 2007. Évolution à long terme de la structure des communautés piscicoles estuariennes. Effet de la variabilité hydroclimatique. Rapport de stage de Master, Université Bordeaux I.
- Dessaix J. & Fruget J-F., 2008. Évolution des peuplements de crustacés du Rhône Moyen au cours des 20 dernières années, relation avec la variabilité hydroclimatique. *Hydroécologie Appliquée*, 16, 1–27.
- Devine J.A., Baker K.D. & Haedrich R.L., 2006. Deep-Sea fishes qualify as endangered. A shift from shelf fisheries to deep sea is exhausting late-maturing species that recover only slowly. *Nature*, 439, 29.
- Dove M-C. & Sammut J., 2007. Impacts of estuarine acidification on survival and growth of Sydney rock oysters *Saccostrea glomerata* (Gould, 1850). *Journal of Shellfish resources*, 26, 519-527.
- Euliss N.H., LaBaugh J.W., Frederickson L.H., Mushet D.M., Laubhan M.K., Swanson G.A., Winter T.C., Rosenberry D.O. & Nelson R.D., 2004. The wetland continuum : a conceptual framework for interpreting biological studies. *Wetlands*, 24, 448-458.
- FAO, 2009a. La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture 2008. Département des pêches et de l'aquaculture de la FAO. Organisation des nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, 216 p.
- FAO, 2009b. Climate changes implications for fisheries and aquaculture. Overview of current scientific knowledge. Rome, 213p.
- Fausch, K. D., 2007. "Introduction, establishment and effects of non-native salmonids: considering the risk of rainbow trout invasion in the United Kingdom." *Journal of Fish Biology*, 71, 1-32.
- Garcia-Berthou E.;Alcaraz C., Pou-Rovira Q., Zamora L., Coenders G. & Feo C., 2005., Introduction pathways and establishment rates of invasive aquatic species in Europe. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 62, 453–463.
- Gascuel D. & Pauly D., 2009. EcoTroph: modelling marine ecosystem functioning and impact of fishing. *Ecological Modelling*, 220, 2885-2898.
- Gascuel D., 2009. L'approche écosystémique des pêches, une condition pour l'exploitation durable des océans. *Revue POUR. « Le défi alimentaire du XXIe siècle »*, Edition du GREP, Paris, n° 202-203 : 199-206.
- Gerdeaux D., 2007. Impacts du changement climatique sur les milieux aquatiques continentaux européens. *RDV Techniques*, (hors série n°3): 21-26, ONF.
- Gerdeaux, D., 2004. The recent restoration of the whitefish fisheries in Lake Geneva: the roles of stocking, reoligotrophication, and climate change. *Annals Zoologici Fennici*, 41,181-189.
- Gosse Ph., Gailhard J. & Hendrick F., 2008. Analyse de la température de la Loire moyenne en été sur la période 1949 à 2003. *Hydroécologie Appliquée*, 16, 233–274.
- Gouletquer P., 2008. Changement climatique en milieu côtier et littoral : Conséquences sur les peuplements marins. Communication orale +résumé, Colloque HydroEcologie, 16-17 Octobre 2008, Clamart.
- GraphAgri 2009 <http://agreste.agriculture.gouv.fr/reperes/france-graphagri-edition-2009/>
- Green, P. A., Vorosmarty C. J., Meybeck M., Galloway J. N, Peterson B. J. & Boyer F. W., 2004. Pre-industrial and contemporary fluxes of nitrogen through rivers: A global assessment based on topology. *Biogeochemistry*, 68, 71–105.

- Gugger, M., Molica R., Le Berre B., Dufour P., Bernard C. & Humbert J-F., 2005. Genetic diversity of *Cylindrospermopsis* strains (Cyanobacteria) isolated from four continents. *Applied and Environmental Microbiology* 71, 1097-1100.
- Halpern, B. S., Walbridge, S., Selkoe, K. A., Kappel, C. V., Micheli, F., D'Agrosa, C., Bruno, J. F., Casey, K. S., Ebert, C., Fox, H. E., Fujita, R., Heinemann, D., Lenihan, H. S., Madin, E. M. P., Perry, M. T., Selig, E. R., Spalding, M., Steneck, R., and Watson, R. 2008. A global map of human impact on marine ecosystems. *Science* 319, 948-952.
- Hamon K. & Ulrich C., 2007. L'utilisation des FLR dans les évaluations des scénarios de gestion : un choix irréversible ? Communication orale + résumé , « 8^{ème} forum halieumétrique : Changements réversibles et irréversibles dans les ressources et leurs usages « 19-21 juin 2007, La Rochelle.
- Heino J., R. Virkkala & Toivonen H., 2009. Climate change and freshwater biodiversity: detected patterns, future trends and adaptations in northern regions. *Biological Reviews*, 84, 39–54.
- Hermant M., Lobry J., Poulard, J.C., Désaunay Y., Bonhommeau S. & Le pape O. 2010. Impact of warming on abundance and occurrence of flatfish populations in the Bay of Biscay (France). *Journal of Sea Research*, 64, 45-53.
- IPCC, 2007. Climate change 2007: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning (eds.)].
- Juanes F; Gephard S. & Beland K. F., 2004. Long-term changes in migration timing of adult Atlantic salmon (*Salmo salar*) at the southern edge of the species distribution? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 61, 2392-2400.
- Junk W.J., Bayley P.B. & Sparks R.E., 1989. The flood pulse concept in riverfloodplain system. In: Didge (ed) *Proceedings of the International Large River Symposium (Lars)*. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences, Ottawa, Canada, pp.110-127.
- Kaushik S.J. & Troell M., 2010. Taking The Fish-In Fish-Out Ratio A Step Further.... *Aquaculture Europe*, 35: 15-17.
- Lassalle G. & Rochard E., 2009. Impact of twenty-first century climate change on diadromous fish spread over Europe, North Africa and the Middle East. *Global Change Biology*, 15, 1072–1089.
- Lassalle G., Bégue M., Beaulaton L. & Rochard E., 2008. Diadromous fish conservation plans need to consider global warming issues: An approach using biogeographical models. *Biological Conservation*, 141, 1105-1118.
- Marchetti M.P., Moyle P.B. & Levine R., 2004. Alien fishes in California watersheds: Characteristics of successful and failed invaders. *Ecological Applications*, 14, 587-596.
- McCormick S. D., Lerner D. T., Monette M.Y., Nieves-Puigdoller K., Kelly J. T. & Björnsson B. Th., 2009. Taking It with You When You Go: How Perturbations to the Freshwater Environment, Including Temperature, Dams, and Contaminants, Affect Marine Survival of Salmon. *American Fisheries Society Symposium*, 69.
- Médale F. & Kaushik S.J., 2009. Les sources protéiques dans les aliments pour les poissons d'élevage. *Cahiers de l'Agriculture*, 18, 103-111
- Menesguen A., Aminot A., Belin C., Chapelle A., Guillaud J.F., Joanny M., Lefebvre A., Merceron M., Piriou J.Y. & Souchu P., 2001. L'eutrophisation des eaux marines et saumâtres en Europe, en particulier en France. *Rapport IFREMER, Direction de l'Environnement et de l'Aménagement du littoral*, 64 p.

- Myers R. A. & Worm B., 2003. Rapid worldwide depletion of predatory fish communities. *Nature* 423, 280-283.
- Pauly D., 1994. A framework for latitudinal comparisons of flatfish recruitment. *Netherlands Journal of Sea Research*, 32, 107-118.
- Pimentel D., 2005. Aquatic Nuisance Species in the New York State Canal and Hudson River Systems and the Great Lakes Basin: An Economic and Environmental Assessment. *Environmental Management*, 35, 692–701.
- Planque B. & Frédou T., 1999. Temperature and the recruitment of Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 56, 2069–2077.
- Poirel A., Lauters F. & Desaint B., 2009. 1977-2006 : Trente années de mesures des températures de l'eau dans le Bassin du Rhône. *Hydroécologie Appliquée*, 16, 91–213.
- Polovina, J., Howell E. & Abecassis, M., 2008. Ocean's least productive water are expanding. *Geophysical letter* 35.
- Pont D, Huguency B., Beier U., Goffaux D., Melcher A., Noble R., Rogers C., Roset N & Schmutz S., 2006. Assessing river biotic condition at the continental scale: a European approach using functional metrics and fish assemblages. *Journal of Applied Ecology*, 43: 70-80.
- Quinn T.P., McGinnity P. & Cross T.F., 2006. Long-term declines in body size and shifts in run timing. *Journal of Fish Biology*, 68, 1713-1730.
- Raven, J., Caldeira K., Elderfield H., Hoegh-Guldberg O.; Liss P., Riebesell U., Shepherd J., Turley C. & Watson A., 2005. Ocean acidification due to Increasing Atmospheric carbon dioxide The Royal Society, London, UK.
- Reyjols Y., Léna J.P., Hervant F. & Pont D., 2009. Effects of temperature on biological and biochemical indicators of the life-history strategy of bullhead (*Cottus gobio* L.). *Journal of Fish Biology*, 75, 2880-2880.
- Scheurer K., Alewell C., Bänninger D. & Burkhardt-Holm P., 2009. Climate and land-use changes affecting river sediment and brown trout in alpine countries—a review. *Environmentale Science and Pollution Research*, 16, 232-242.
- Schindler D.W., 2001. Cumulative effects of climate warming and other human stresses on Canadian freshwaters in the new millennium. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 58, 18-29.
- Tacon A.G.J. & Metian M., 2008. Global overview on the use of fish meal and fish oil in industrially compounded aquafeeds: trends and future prospects. *Aquaculture*, 285, 146 – 158.
- U.S. EPA, 2009. Synthesis of Adaptation Options for Coastal Areas. Washington, DC, U.S. Environmental Protection Agency, Climate Ready Estuaries Program. EPA 430-F-08-024, January 2009.
- Wahli T., Bernet D., Segner H. & Schmidt-Posthaus H., 2008. Role of altitude and water temperature as regulating factors for the geographical distribution of *Tetracapsuloides bryosalmonae* infected fishes in Switzerland. *Journal of Fish Biology*, 73, 2184-2197.
- Worm B. , Barbier E.B., Beaumont N, Duffy J.E.; Folke C., Halpern B.S., Jackson J.B.C., Lotze H.K., Micheli F., Palumbi S.R., Sala E., Selkoe K.A., Stachowicz J.J., & Watson R., 2006. Impacts of Biodiversity Loss on Ocean Ecosystem Services. *Science* 314, 787-790.

Glossaire

Assec : Etat d'une rivière ou d'un étang qui se retrouve sans eau.

Tributaire : Se dit cours d'eau qui se jette dans un autre cours d'eau, un lac ou la mer.

Equitabilité : désigne l'égalité plus ou moins grande de la répartition des individus entre les différentes espèces d'un écosystème.

Cadre statistique bayésien : Quantification des incertitudes dans les estimations par les distributions de probabilités mises à jour en passant des prior aux postérieurs

Espèce démersale : poisson adulte vivant près du fond sans pour autant y vivre de façon permanente

Xénobiotique : molécule chimique polluante pouvant être toxique même à faible concentration.

Diadrome : espèce de poisson dont le cycle biologique se déroule en eau douce et en mer

F_{pa} : Mortalité par pêche au seuil de précaution

F_{MSY} : Mortalité par pêche au rendement maximum durable