

Oceans contamination and overexploitation, the end of the fishing? Surexploitation et contamination des océans, la fin de «l'empire pêche? »

Stéphanie Pierre, Nathalie Prévot-D'Alvise, Sandrine Gaillard, Simone Richard,
Daniel Leung-Tack, Josiane Aubert, Stéphane Coupé et Joël-P Grillasca*

Résumé

Depuis plusieurs années les scientifiques tirent la sonnette d'alarme sur l'augmentation permanente de la pollution des océans ainsi que sur l'effondrement des stocks de poissons dans toutes les mers du globe. Avec plus de la moitié de la population mondiale vivant à proximité du littoral, les pollutions d'origine anthropique contaminent de façon pérenne nos côtes. La pollution croissante, la mise sur le marché de poissons issus de la pêche, de qualité sanitaire inconnue (souvent en deçà des critères légaux), l'appauvrissement voire l'épuisement des stocks naturels de poissons sont des problèmes qui tendent à mener vers une origine différente des produits de la mer. L'aquaculture mondiale couvre actuellement 51% de la consommation de poissons dans le monde (FAO, 2006). Elle représente donc aujourd'hui en terme de quantité une source de protéines très importante pour l'alimentation humaine et deviendra certainement, demain, la source prépondérante de protéines animales d'origine aquatique disponible. Cependant, la plupart des fermes se situent dans ces zones littorales fortement polluées, et nous ne savons pas encore quel est le risque de voir nos élevages contaminés. Il faut donc d'abord certifier de la qualité sanitaire de ces élevages en se conformant aux normes rigoureuses mais essentielles imposées par l'Europe. Quelles seraient donc les conditions à mettre en place pour que l'aquaculture puisse devenir la solution permettant de proposer à l'humanité des produits de la mer, indispensables à son alimentation, de qualité sanitaire sûre et contrôlée ?

Abstract: For several years scientists sound the alarm on the permanent increase of pollution of the oceans and the collapse of fish stocks in all the world's seas. With more than half the world population living near the coast, anthropic pollution contaminate our coasts perpetually. The increasing pollution, the marketing of seafood of unknown quality (often below the legal criteria), loss or depletion of natural stocks of fish are problems that tend to lead to a different origin from seafood. World aquaculture currently covers 51% of fish consumption in the world (FAO, 2006). It therefore represents today in terms of protein quantity a source of great importance to human food and will certainly be, soon, the most important source of aquatic animal protein available. However, most farms are located in these coastal areas heavily polluted, thus increasing the risk of seeing our breeding contaminated. We must first certify the good health quality of these farms according to the European standards. What would be the conditions for establishing that aquaculture can become the solution to propose to humanity seafood, essential to its food, safe and sanitary quality controlled ?

Key-words: *Fish farming, fishing, contamination, sanitary quality, stock management*

* Correspondance

Equipe de Biologie Moléculaire marine-PROTEE, Université du Sud Toulon Var, BP 20132, Avenue de l'Université, 83957 La Garde Cedex, France.

Introduction

Durant ces cinquante dernières années, l'Homme a dégradé un quart de la superficie de sa planète, un cinquième de ses terres cultivables et un tiers de ses forêts ! Mais depuis plus longtemps encore, environ deux siècles, il a pillé les océans pour se fournir en poissons et invertébrés marins. L'Humanité a longtemps pensé que les ressources marines étaient inépuisables, vandalisant ainsi les stocks de poissons sans le moindre état d'âme et surtout sans réflexion sur les conséquences futures. Avec le développement des progrès technologiques, le pêcheur traque le poisson dans ses derniers retranchements, de plus en plus longtemps, de plus en plus loin, de plus en plus profond. Paradoxalement, depuis plusieurs années les débarquements restent stables, preuve que les stocks diminuent et ont du mal à se renouveler. D'ailleurs, aujourd'hui tous les organismes de surveillance s'accordent pour dire que le nombre de captures ne pourra plus augmenter et que la pêche sera, dans les années à venir, de moins en moins apte à couvrir les besoins en protéines d'origine aquatique des habitants de cette planète [Ferra, 2008]. Ces faits ne soulèvent pas seulement le problème des stocks de poissons, mais également celui de l'alimentation humaine.

A notre décharge, on peut constater que la gestion durable des pêches est une notion relativement récente, puisque jusque dans les années 80, les gouvernements n'étaient pas très attentifs aux signes de surexploitation des stocks. Fort heureusement, depuis quelques années, les scientifiques, qui avaient déjà perçu les risques encourus suite à cette surexploitation ont enfin été écoutés par les autorités. Le Conseil Européen de la pêche se réunit désormais à Bruxelles, chaque année en décembre, pour mettre en place un certain nombre de règles, tant sur la taille des mailles des filets que sur la taille des flottes ou sur les quantités maximales de débarquement par espèce. Les autorités semblent donc avoir enfin pris conscience de la gravité de la situation mondiale des océans. Elles tendent même à développer des solutions alternatives à la

pêche, comme l'aquaculture. L'aquaculture sera donc d'ici quelques années une des solutions nécessaires pour satisfaire la demande mondiale en produits d'origine aquatique, compte tenu de la stagnation voire de la régression des débarquements des pêches de capture. Au-delà du constat de la mauvaise santé de notre planète, il nous faut améliorer nos connaissances des écosystèmes aquatiques et des animaux qui les peuplent, développer des solutions d'avenir et tout mettre en œuvre pour rattraper nos erreurs. Aujourd'hui, deux problèmes majeurs se posent, qui doivent être résolus à très brève échéance.

Le premier est que l'humanité, avec 6,5 milliards d'individus depuis le 19 décembre 2005, passera à 10 milliards aux alentours de 2075, et manquera de produits d'origine marine pour son alimentation si on ne développe pas l'aquaculture. Cependant, pour qu'une espèce soit mise en élevage, elle doit répondre à de nombreux critères comme un taux de survie correct, une bonne aptitude à vivre et à s'alimenter en captivité avec si possible un régime alimentaire varié, une aptitude aux fortes densités, un taux de croissance élevé et homogène, et la maîtrise de ses cycles biologiques. Son indice de conversion doit être faible et elle doit bien résister aux infections ainsi qu'aux variations de température. Enfin, elle ne doit pas être trop cannibale (espèce grégaire) surtout durant les stades larvaires [Billard, 2005].

Le deuxième est dû au fait qu'en consommant les produits de pêche, l'homme prend aujourd'hui un risque sanitaire. En effet, environ 60% de la population mondiale vit près des côtes et y développe agriculture, industrie et urbanisation. Toutes ces activités anthropiques engendrent une multitude de pollutions qui sont toutes déversées *in fine* dans les mers. En règle générale, seuls quelques lots de poissons, issus de la pêche et commercialisés sur le marché, subissent des contrôles de la part de la DGAL (Direction Générale de l'Alimentation) et de la DGCCRF (Direction Générale de la Consommation, de la Concurrence et de la Répression des Fraudes).

De plus, seuls certains polluants déterminés (molécules émergentes) par la Directive Européenne 96/23/CE sont dosés. Bien plus qu'un danger pour les poissons, la présence de ces polluants dans leur chair représente un réel danger pour l'Homme, dernier maillon de la chaîne trophique. A l'heure actuelle, d'ailleurs, bon nombre des prises ne présente pas toutes les garanties que le consommateur est en droit d'exiger. La multiplicité des scandales liés à l'alimentation ainsi que la mise en avant du principe de précaution nous poussent à repenser notre système de production des produits de la mer avec notamment une meilleure traçabilité, des contrôles sanitaires plus réguliers et le respect de la chaîne du froid.

I- État des pêcheries

1- Situation mondiale des pêches

Depuis le milieu du 19^{ème} siècle, la production mondiale des pêches marines est passée de 1,5 millions de tonnes (Mt) à 84,2 Mt en 2005. Cette même année, la pêche de capture a atteint 81% de la production mondiale de poissons marins contre 19% pour l'aquaculture marine pour un total de 103,1 Mt destinés en quasi totalité à la consommation humaine [FAO, 2006]. En 2005, toujours selon la FAO, l'offre apparente par habitant et par an est de 16,6 kg (équivalent poids vif). Cette domination humaine sur les océans accélère considérablement la disparition des populations et des espèces et les conséquences sont encore largement méconnues [Worm *et al.*, 2006].

En 2005, les dernières estimations de la FAO sur la situation des pêcheries mondiales font état de 3% d'espèces de poissons marins sous-exploitées, 21% modérément exploitées, 52% pleinement exploitées, 16% surexploitées et 7% d'espèces épuisées, alors qu'un seul pour cent est en cours de reconstitution. Cette exploitation intensive des océans contribue de façon significative à l'effondrement de la biodiversité marine dans sa globalité. En effet, les pêcheurs prélèvent de plus en plus loin et de plus en plus profond pour faire face à la forte demande du marché, s'attaquant même désormais aux poissons des grands fonds comme les grenadiers ou les empereurs [Devine *et al.*, 2006]. Il faut savoir qu'en plus, l'activité de pêche

génère, par ses rejets, des pertes énormes, qui ont été estimées à 7 Mt par an entre 1992 et 2004 [FAO, 2006]. En 2006, un article de la revue Science [Worm *et al.*, 2006] a démontré que l'effondrement de la biodiversité marine est directement dû à l'exploitation, la pollution et la destruction des habitats et assez indirectement aux changements climatiques et perturbations biogéochimiques des océans. Bien que ces phénomènes d'extinction semblent se produire de façon lente à l'échelle de l'océan global, certains écosystèmes régionaux comme les estuaires ou les récifs coralliens présentent une diminution rapide des populations et des espèces, voire de certains groupes fonctionnels entiers. Ils concluent même que la quasi totalité des espèces régulièrement pêchées pourrait s'effondrer vers le milieu du 21^{ème} siècle. La perte de la biodiversité marine altère de plus en plus la capacité des océans à fournir de la nourriture, à conserver leur pouvoir de régénération des eaux et à récupérer suite à des perturbations. En effet, l'élimination systématique des populations et des espèces n'altérerait pas seulement la capacité des océans à nourrir la population humaine sans cesse grandissante, mais aussi leur capacité à se régénérer dans un environnement marin en rapide évolution.

2- Mesures mises en place pour la gestion des stocks naturels

La FAO estime aussi que dans les trois-quarts des régions du globe, la pleine exploitation ou la surexploitation est atteinte. Historiquement, des signes de pleine exploitation et même de surexploitation sont apparus en Mer du Nord concernant progressivement les espèces suivantes, la plie (*Pleuronectes platessa*, L.) dès 1890, l'églefin (*Melanogrammus aeglefinus*, L.) en 1905, la morue (*Gadus morhua*, L.) en 1920 et le hareng (*Clupea harengus*, L.) en 1950. La diminution des stocks de poissons s'est également étendue à l'Atlantique nord et en Mer d'Irlande pour le merlu (*Merluccius merluccius*, L.) en 1925 et en Mer d'Islande pour la plie, l'églefin et la morue en 1930. Le même phénomène a également été observé de part et d'autre de l'Amérique du nord, et dans l'Atlantique comme dans le Pacifique à partir de 1930, concernant le hareng, la morue, le sébaste

(plusieurs espèces du genre *Sebastes*) et le merlu. En Méditerranée, suite à l'effondrement des populations de mérour (*Epinephelus marginatus*, Lowe), un moratoire interdisant toutes formes de pêche a été mis en place depuis 1993. Plus récemment, les captures de thon rouge (*Thunnus thynnus*, L) en Méditerranée ont diminué de moitié suite à l'engouement général pour les sushis, sachant qu'à la criée de Tokyo un individu peut se vendre plus de 50 000 dollars pièce.

En réponse à ces surpêches et à l'écroulement des stocks, des mesures drastiques ont été prises dans de nombreuses pêcheries pour sauvegarder des stocks de poissons ou tout au moins préserver les activités locales. Interdiction de pêche au hareng (*Clupea harengus*, L) par la Communauté Économique Européenne dès 1970, limitation par attribution de quotas de pêche dans la mer d'Islande, interdiction de la pêche au mérour sur le littoral français méditerranéen, suspension saisonnière de pêche au rouget (*Mullus barbatus*, L) dans les eaux italiennes, fermeture de la pêche à la morue sur les bancs de Terre Neuve dans les limites de juridiction de 200 milles, ... Pour illustrer ce dernier exemple, pendant des siècles, la pêche traditionnelle à la morue de Terre Neuve a évolué sans forte fluctuation jusqu'à une production proche des 300 000 tonnes à la fin des années 1950 [Anonyme, 2005]. La pêche au chalut est alors autorisée sur les zones profondes des bancs et en une vingtaine d'années la production a dépassé 800 000 tonnes par an, pour s'écrouler à 150 000 tonnes par an à la fin des années 1970. Malgré une remontée vers 250 000 tonnes durant une dizaine d'années, un moratoire est déclaré en juin 1992 par John Crosbie, ministre fédéral des Pêches et des Océans au Canada. Ce moratoire a été décrété au vu des données scientifiques alarmantes concernant l'état du stock et des baisses dramatiques des captures. En 1998, une pêche à petite échelle, dite « indicatrice », limitée à la zone côtière a été autorisée mais sans capture probante. Cette pêche pourtant extrêmement faible eut des conséquences plus importantes que prévu sur les stocks, ce qui fait qu'en 2003, la pêche a été de nouveau fermée et

ce pour une durée indéterminée. Aujourd'hui la morue, objet de toutes les convoitises, a quasiment disparu [Cury, 2008].

D'autres interventions politiques montrent l'inquiétude grandissante face à l'écroulement des stocks. Ceux de morue, de merluche (*Urophycis sp.*), d'églefin et de flétan (*Hippoglossus hippoglossus*, L.) ont baissé jusqu'à concurrence de 95%, ce qui a suscité des appels en vue de l'adoption de mesures urgentes. D'aucuns recommandent même l'arrêt des prises pour favoriser la reconstitution des stocks, s'attirant ainsi le courroux des professionnels de la pêche. Cependant, un moratoire sur la pêche au flétan et à l'églefin dans la zone américaine de Georges Bank a été adopté, et la fermeture de la pêche est envisagée en mer d'Irlande et en mer d'Écosse. Après le Maroc en 1999, le Sénégal et la Mauritanie remettent en question les accords de pêche avec l'Union Européenne, afin de préserver leurs ressources halieutiques. Une interdiction de la pêche aux requins, aux raies guitares (*Rhinobatos sp.*), aux poissons scies (*Pristis sp.*) est appliquée dans les mers nationales de la Mauritanie et du Sénégal [Mutume, 2002]. Cependant, outre la forte pression exercée par la pêche sur les stocks de poissons marins, d'autres paramètres sont à prendre en compte dans l'effondrement des stocks, comme les changements climatiques ou encore les interactions entre espèces endémiques à un écosystème. Depuis 1995, un projet scientifique de compréhension de la dynamique des océans en relation avec le climat global terrestre [GLOBEC, <http://www.globec.org/>] a été mis en place et doit essayer de répondre à plusieurs questions. Tout d'abord, quelle est la part des changements climatiques induits par les activités anthropiques par rapport à ceux résultants de la variation naturelle du climat. Ensuite, quelle est l'influence des modifications globales du climat sur les cycles annuels connus jusqu'à présent. Enfin quelle est l'implication de la surpêche et des pollutions sur les variations océaniques. Certains éléments de réponse sont déjà apportés via les observations météorologiques : ainsi, par exemple, El Niño serait fortement impliqué dans la disparition des stocks d'anchois et de

sardines le long des côtes du Pérou. Jusqu'à une époque récente, la gestion des pêches ne tenait pas compte des interactions entre les espèces et le milieu à cause de cette complexité propre aux systèmes écologiques liés par différentes interactions à des niveaux et à des échelles multiples. A ce jour, aucune théorie générale ne peut être appliquée au fonctionnement des écosystèmes marins car celui-ci dépend de sa structure, de sa diversité et de son intégrité [Cury *et al.*, 2001]. Il est donc aujourd'hui important de comprendre quels impacts peut tolérer un écosystème avant de subir des changements conséquents dans sa structure et, si de tels changements sont réversibles. Il semble quand même évident que les variations environnementales jouent un rôle majeur sur l'abondance et la distribution des espèces marines, et que les pêches altèrent profondément le fonctionnement et l'état de ces écosystèmes. A cet égard, comprendre la dynamique des écosystèmes est essentiel pour prévoir et contrôler les conséquences de la variabilité environnementale et des impacts humains.

II- État de santé des poissons sauvages

1- Les différentes classes de contaminants

A ce déclin des populations aquatiques, dû à une surexploitation mondiale, viennent s'ajouter l'industrialisation, l'urbanisation et l'agriculture intensive, lesquelles génèrent une contamination chronique d'un grand nombre d'écosystèmes marins. Cette pollution anthropique est retrouvée non seulement aux abords des côtes, où viennent se déverser les effluents, mais également au large. Elle se caractérise par un panel de contaminants chimiques tels les polychlorobiphényles (PCBs), les "Dioxines" au sens large (polychlorodibenzopara-dioxines ou PCDD, polychlorodibenzofuranes ou PCDF), les pesticides organochlorés (lindane, endosulfane, dichlorodiphényltrichloroéthane ou DTT...) et organophosphorés (dichlorvos, malathion, diazinon ...), les métaux, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAPs), les perturbateurs endocriniens au sens large. Bien que la plupart de ces composés chimiques ne se trouve qu'à l'état de traces dans le milieu aquatique, ces faibles concentrations sont suffisantes pour induire des effets néfastes sur

l'ensemble de l'écosystème et de la chaîne trophique. De par leur caractère lipophile, certaines substances comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques halogénés (PCB, PCDD, PCDF) ont tendance à s'accumuler dans les tissus graisseux des poissons. Cette capacité à persister dans les corps graisseux les classe dans la catégorie des "polluants organiques persistants" (POPs). Ainsi, bien que faibles, leurs concentrations chez les poissons et *in fine* chez l'homme, ne font qu'augmenter avec l'âge, l'organisme ne les éliminant que très lentement. Cette bioaccumulation est d'autant plus importante que l'individu se situe en fin de chaîne alimentaire (thon, espadon (*Xiphias gladius*, L.), merlu ...) : on parle alors de bioamplification, phénomène correspondant à l'accumulation progressive d'une substance toxique à chaque maillon de la chaîne alimentaire.

2-PCB et « dioxines » au sens large

L'impact des substances organiques toxiques sur les poissons sauvages a été mis en avant dans de nombreux travaux. Ainsi, l'étendue de la pollution par les PCDDs, les PCDFs et les PCBs coplanaires a été démontrée dans tout l'hémisphère sud du globe en utilisant la bonite (*Katsuwonus pelamis*, L.) comme bioindicateur [Ueno *et al.*, 2005]. L'espadon a quant à lui été utilisé comme bioindicateur pour révéler l'étendue d'une pollution de la mer Méditerranée jusqu'aux Iles des Açores par 34 congénères de PCBs (dont les 7 PCBs "indicateurs" : CB 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180) et par 27 pesticides organochlorés (dont les hexachlorocyclohexanes (HCHs) tels que le lindane, le DDT et ses métabolites, l'endosulfan, le dieldrine) [Stefanelli *et al.*, 2004]. Une campagne conduite de 1995 à 2003 sur les produits de la pêche espagnole a démontré la présence d'une contamination importante par les PCDD/F et les PCBs dioxine-like sur le saumon (*Oncorhynchus sp.*), le thon, les sardines (*Sardinops sagax*, Jenyns), les moules (*Mytilus edulis*, L.) et les palourdes (*Chamelea gallina*, Venus spp) [Gomara *et al.*, 2005]. Ainsi pour le thon et le saumon, dont la masse graisseuse est importante (respectivement 7,1 et 13,7%), la teneur en PCDD/F est supérieure à celle autorisée par la législation européenne (CE n° 1881/2006 : 14 pg

OMS-TEQ/kg pf).

3- Métaux lourds

Les métaux (cadmium, mercure, plomb, zinc, cuivre) ont également tendance à s'accumuler dans la chair des poissons. C'est généralement par le biais d'une consommation fréquente de poissons, dont la contamination varie selon les espèces (les poissons prédateurs étant là aussi les plus atteints), que les consommateurs sont contaminés. Par exemple, les poissons sont les principaux vecteurs de la forme chimique la plus toxique et la plus bio-assimilable du mercure, le monométhyl-mercure (MMHg). Contrairement aux autres métaux, le MMHg est le seul à être bioamplifié le long de la chaîne trophique [Blackmore et Wang, 2004]. A ce jour, deux cas d'intoxication "massive" se sont

produits : à Minamata (Japon) en 1950 et en Iraq en 1970. En dehors du rejet direct en MMHg, c'est principalement du mercure inorganique qui est relargué dans le milieu aquatique. Ce dernier est alors oxydé par des bactéries et transformé en MMHg lequel s'accumule tout au long de la chaîne trophique. Cette forme méthylée bioamplifiable représente 10 à 30% du mercure total chez les végétaux marins, 20 à 80% chez les invertébrés marins [Claisse *et al.*, 2001] et 90 à 95% chez les poissons et autres super-prédateurs [Storelli *et al.*, 2005b]. Plusieurs travaux ont démontré une contamination chronique de la biocénose méditerranéenne en mercure et cela à tous les niveaux de la chaîne trophique, bien supérieure à la législation CE n° 1881/2006 (MMHg < 1,6 µg.kg ph) (Tableau 1).

Espèces méditerranéennes	Localisation	Hg-T (mg.Kg ⁻¹ p.f. ou p.s.)	MMHg (mg.Kg ⁻¹ p.f. ou p.s.)	Références
Thon Albacore (<i>Thunnus alalunga</i> , L.)	Mer Méditerranée	2,41 p.f.	—	Storelli et Marcotrigiano, 2004
Thon rouge (<i>Thunnus thynnus</i> , L.)	Mer Méditerranée	1,18 p.f.	1,073 p.f.	Storelli <i>et al.</i> , 2002
Petite roussette (<i>Scyliorhinus canicula</i> , L.)	Mer Méditerranée	1,1 p.f.	1,01 p.f.	Storelli <i>et al.</i> , 2005a
Espadon (<i>Xiphias gladius</i> , L.)	Mer Ionienne	0,07 p.f.	—	Storelli <i>et al.</i> , 2005b (Attention: individus de petite taille: 1,3-3,6 kg)
Chinchard à queue jaune (<i>Trachurus mediterraneus</i> , Steindachner)	Mer Méditerranée	0,51 p.f.	—	Storelli <i>et al.</i> , 2006
Congre (Conger conger, L.)	Mer Méditerranée	4,25 p.s.	—	PNUE-IOMC 2005
Merlu (<i>Merluccius merluccius</i> , L.)	Mer Méditerranée	3,2 p.s.	—	PNUE-IOMC 2005
Poulpe musqué (<i>Eledone moschata</i> , Lamarck)	Mer Méditerranée	0,76 p.f.	—	Storelli et Marcotrigiano, 2004
Crevette rouge (Aristeus antennatus, Risso).	Mer Ligurienne	4,75 p.s.	4,23 p.s.	Drava <i>et al.</i> 2004
Huître creuse (<i>Crassostrea gigas</i> , Thunberg)	Mer Méditerranée	0,067 p.s.	—	Claisse <i>et al.</i> , 2001
Moule d'Espagne (<i>Mytilus galloprovincialis</i> , Lamarck)	Mer Méditerranée	0,1 p.s.	—	Casas, 2005 - RNO campagne 2004

Tableau 1 : Les concentrations en mercure total et méthylmercure mesurées dans la chair de plusieurs espèces méditerranéennes révèlent une bioamplification de la forme organique du mercure. [Hg-T : mercure total ; p.f : poids frais ; p.s : poids sec ; En Europe (CEE 93/351), la dose maximale de mercure total est fixée à 0,5 mg.kg⁻¹ (p.f.) pour l'ensemble des organismes marins excepté pour quelques espèces situées en haut de la chaîne trophique : 1 mg.kg⁻¹ (p.f.)].

Se pose ici le problème de la pêche du thon rouge en Méditerranée. En effet, ces poissons sont contaminés au delà des doses maximales légales et ils sont, de plus, en voie de disparition.

4- HAP

L'accumulation et la persistance des HAPs dans les tissus lipidiques dépendent de plusieurs facteurs physiologiques (variations saisonnières, reproduction, nutrition), de caractères environnementaux (température, pression), de leur concentration dans le milieu, de leur hydrophobicité, de leur structure chimique, mais aussi des capacités métaboliques propres à chaque espèce. Plus on s'éleve dans la chaîne trophique, plus les individus sont en mesure de développer des systèmes de détoxification performants. Ainsi, la bioconcentration des HAPs ne concernera généralement que les organismes inférieurs tels que les huîtres ou les moules. Toutefois la métabolisation des HAPs peut conduire à la formation de métabolites plus toxiques. C'est le cas de l'oxygénation du Benzo (a) Pyrène par les CYP450 1A1 en présence de l'époxyde hydrolase qui génère un métabolite hautement cancérigène, le BaP 7, 8 dihydrodiol 9, 10 epoxyde (BPDE) lequel va se lier à l'ADN pour former des adduits [Arinç *et al.*, 2000]. Ces derniers pourront induire des mutations qui seront à l'origine de tumeurs. Chez les poissons benthiques, le rouget barbet, la sole, la limande, la plie, les HAPs sont considérés comme des initiateurs de cancérogenèse [IFREMER, 1994].

5- Perturbateurs Endocriniens

Depuis quelques années, une attention particulière est portée aux perturbateurs endocriniens (PE) encore dénommés modulateurs endocriniens ou xénohormones. Sous cette nomenclature on trouve les hormones naturelles, les hormonomimétiques de synthèse, les alkylphénols, les phtalates, les polybromodiphényles, certains pesticides organochlorés (DDT) etc ... Leurs effets sont multiples mais le principal concerne la modification d'une partie des fonctions du système endocrinien, laquelle aura des conséquences directes sur la

reproduction des individus contaminés. Leur présence dans l'organisme peut inhiber de façon compétitive les récepteurs œstrogènes, interférer avec le métabolisme des œstrogènes endogènes ou encore bloquer l'action des hormones naturelles. Quels que soient leurs modes d'action, leurs effets néfastes sur le système endocrinien sont notables aussi bien chez l'homme que chez les poissons. Ainsi on note chez les poissons, un dysfonctionnement dans le développement des gonades, une diminution de la masse corporelle et du système immunitaire, une baisse de la fertilité et du taux de fécondité, une modification du sex ratio ou encore une "féminisation" des individus mâles. A l'issue de l'état des lieux fait sur l'impact néfaste ou potentiel des PE sur la santé humaine mais aussi sur l'état de santé des écosystèmes aquatiques, la communauté européenne a dressé en juin 2001 une liste de 66 substances reconnues comme ayant un caractère endocrinien. Cette liste n'est pas figée. Parmi les PE les plus étudiés à ce jour sont présents les xénoestrogènes (bisphenol A, alkylphénols, DDT) qui ont la capacité de mimer l'action de l'œstradiol dont le mode d'action est complexe et varié. Selon leur nature, ils peuvent se lier directement aux récepteurs œstrogènes (ER alpha, ER beta ou ER gamma) [Hawkins *et al.*, 2000], inhiber de façon compétitive les récepteurs ER (dérivés des dioxines), interférer avec le métabolisme des œstrogènes endogènes (HAPs) ou encore bloquer l'action des hormones naturelles (p-p'DDE). L'ensemble des travaux réalisés sur les poissons souligne les effets à court et à long terme des xénoestrogènes présents dans les effluents industriels et urbains sur l'ensemble de l'écosystème marin. Ainsi, le phénomène d'intersex (présence simultanée de tissus testiculaires et ovariens chez un même individu) a été observé chez 100% des gardons mâles [Jobling *et al.*, 1998] et 20% des flets mâles dans les rivières anglaises, chez 20% des barbots mâles [Vigano *et al.*, 2001] en Italie ou encore chez 43 à 83% des perches blanches mâles [Kavanagh *et al.*, 2004] dans les grands lacs du Canada. Cette action féminisante a été démontrée chez la truite arc-en-ciel placée en aval des effluents industriels et urbains lesquels contenaient des hormones

femelles (oestradiol et estrone), des hormones synthétiques (éthynylestradiol) et divers alkylphénols (octylphénol, nonylphénol, nonylphénol polyéthoxylate, nonylphénol carboxylate, 4-tert-pentylphénol) [Tyler et Routledge, 1998]. D'une manière générale, les études réalisées sur les effluents démontrent qu'il existe une corrélation étroite entre l'exposition des poissons au large panel de xénoestrogènes et les différents effets observés sur les individus. Ces composés mimétiques oestrogènes peuvent exercer une action féminisante, affectant *a priori* les poissons mâles. Ces derniers ont alors une baisse de fécondité et présentent des ovocytes et des oviductes dans les testicules, ainsi qu'une diminution des caractères sexuels secondaires. Ces xénobiotiques naturels et synthétiques altèrent également le développement des gonades, le taux d'hormones sexuelles stéroïdes chez les juvéniles et les adultes, la différenciation et la maturation sexuelles chez les embryons et les fonctions immunitaires.

L'ensemble des études réalisées jusqu'à ce jour démontre non seulement l'anthropisation croissante des écosystèmes aquatiques mais aussi la contamination des poissons sauvages qui peuplent ce milieu. Or ce sont ces poissons, avec des degrés de contamination plus ou moins élevés, qui sont proposés aux consommateurs.

III- L'aquaculture: une solution d'avenir ?

I- Situation mondiale de l'aquaculture

Dans le monde, selon la FAO, environ 16% des protéines animales sont d'origine aquatique. Pour un milliard d'hommes, les produits aquatiques constituent la source principale de protéines et pour 50% de la population mondiale, le poisson représente même 56% de l'apport protéique. D'autre part, on constate que les productions animales, et plus spécialement les productions aquacoles, sont surtout destinées à l'alimentation humaine. De plus, parmi tous les secteurs de production alimentaire d'origine animale, l'aquaculture est le secteur dont l'essor est le plus rapide, avec un taux de croissance moyen annuel de 8,8% depuis 1970 contre seulement 1,2% pour les pêches de capture. En termes économiques, la production aquacole (poissons et plantes aquatiques) est

passée de moins d'un million de tonnes au début des années 50 à 59,4 Mt en 2004, pour une valeur de près de 70 milliards de \$US et elle emploie 36 millions de personnes dans le monde, le nombre d'emplois augmentant de 7% par an depuis 30 ans.

C'est dans les pays du Sud-Est asiatique, qualifiés de Nouveaux Pays Aquacoles (NPA), que l'aquaculture s'est massivement développée. Les pays de la région Asie Pacifique représentent, en 2004, 91,5% de la production mondiale et 80,5% de sa valeur [FAO, 2006]. Les plus gros pays producteurs sont la Chine, l'Inde, le Japon, les Philippines, l'Indonésie et la Thaïlande, mais la Chine est de loin le premier producteur tant en tonnage qu'en valeur, avec respectivement 70 et 51% des volumes mondiaux. Vient ensuite l'Europe avec 4% du tonnage, les productions dans les Amériques du Nord et du Sud et en Afrique restant très faibles [Billard, 2005].

Les productions aquacoles sont représentées à 50% par des poissons (26 Mt), 27% par des mollusques et crustacés (14 Mt) et 22% par des algues (11,6 Mt). Le nombre exact d'espèces faisant l'objet d'élevage est difficile à établir, mais selon la FAO on aurait dénombré en 2004 plus de 300 espèces, sachant que pour une centaine d'entre elles la production commercialisée était inférieure à 100 tonnes par an, et qu'une trentaine d'espèces fournissaient chacune plus de 100 000 tonnes annuelles.

Les espèces de poissons élevées sont pour 65% d'entre elles produites en eau douce. Cette pisciculture d'eau douce est largement dominée par une dizaine d'espèces de cyprinidés, à savoir Carpe argentée (*Hypophthalmichthys molitrix*, Valenciennes), Carpe herbivore (*Ctenopharyngodon idella*, Valenciennes), Carpe commune (*Cyprinus carpio*, L.), Carpe marbrée (*Aristichthys nobilis*, Richardson), Cyprin doré (*Carassius carassius*, L.), Carpe indienne rohu (*Labeo rohita*, Hamilton), Carpe indienne catla (*Catla catla*, Hamilton), Brème de Pékin (*Parabrama pекinensis*, Basilevsky), Carpe noire (*Mylopharyngodon piceus*, Richardson) représentant 78% de la production totale et le

Barbeau de Thaïlande (*Puntius gonionotus*, Bleeker). Toutes ces espèces sont herbivores ou omnivores, se caractérisent par une chaîne alimentaire courte et sont produites en étangs [Billard, 2005].

L'aquaculture en eau salée a, quant à elle, enregistré une forte croissance de production avec le saumon de Norvège qui est d'un fort rapport économique. Certes, ces poissons représentent des tonnages inférieurs à ceux des poissons d'eau douce, mais se vendent à des prix plus élevés, d'où leur plus forte valeur ajoutée [Pierre *et al.*, 2008].

2- Diversification des espèces aquacoles

De plus en plus, le nombre d'espèces en aquaculture augmente. Cette diversification présente un intérêt biologique, économique mais aussi industriel avec la formidable évolution des marchés de la transformation. De nombreuses nouvelles espèces intéressent les aquaculteurs mais pour être un bon candidat à l'aquaculture il faut répondre à un certain nombre de critères comme par exemple : bonne vitesse de croissance, robustesse en milieu surpeuplé, bonnes qualités organoleptiques, et transformation facile à réaliser. C'est donc dans le cadre d'une approche pluridisciplinaire (écologie, économie, marché, environnement) que peut s'effectuer la recherche sur de nouvelles espèces aquacoles. Pour l'heure, la production de juvéniles viables reste le principal problème à résoudre. En effet, l'alimentation à l'ouverture de la bouche par des proies vivantes reste très délicate et les taux de mortalité à ce stade sont très élevés. Les essais d'élevage sur les poissons d'eau froide ont principalement lieu dans les pays du Nord. Ils concernent la morue, le flétan, le loup de mer, le lieu jaune, l'églefin ...

Les premiers essais d'élevage sur la morue (*Gadus morhua*) ont eu lieu en Norvège en 1864. Les avancées en matière d'aquaculture sur ce poisson ont bénéficié de la technicité d'élevage des salmonidés (grossissement en cages) et de celle d'autres poissons marins (écloserie) bien que pour le moment les résultats de l'élevage larvaire soient trop alé-

atoires [Omnes, 2002]. Jusque dans les années 1970 des millions de larves étaient relâchées dans le milieu naturel mais sans grande efficacité sur le recrutement. Dans les années 1980, le niveau des recaptures a augmenté mais la taille des stocks n'a pas évolué.

C'est en 1980 qu'ont eu lieu les premiers essais d'élevage sur le flétan (*Hippoglossus hippoglossus*). En 2002 une écloserie islandaise (Fiskey) a produit 500 000 alevins. En 2006 la production aquacole du flétan était inférieure à 1500 tonnes mais les spécialistes estiment à 20 000 tonnes la production pour 2015. Les principaux pays producteurs sont la Norvège, le Canada, l'Islande, l'Écosse et les États-Unis. L'élevage du loup de mer (*Anarhicas minor*) n'est actuellement réalisé que par une seule société : Troms Steinbit AS à Tromsø (Norvège). En 2002, sa production était de 100 000 juvéniles. Le loup de mer est un bon candidat à l'aquaculture de par sa bonne croissance en milieu confiné et la relative simplicité de son élevage.

Les premiers essais d'élevage sur le lieu jaune (*Pollachius pollachius*) ont été effectués en 1994 à l'Ifremer de Brest. Les premiers résultats sont encourageants mais encore limités. Même si sa croissance en élevage est plus faible que celle de la morue c'est un bon candidat à l'aquaculture.

En 2003 la production aquacole de l'églefin (*Melanogrammus aeglefinus*) était d'environ 300 tonnes. En 2002, 20 000 juvéniles ont été produits et ils grossissent actuellement dans les fermes du groupe Aquascot en Écosse.

Les essais d'élevage sur les poissons d'eau chaude qui ont lieu dans le monde entier concernent la daurade coryphène, l'ombrine, les sérioles, le cobia, le thon rouge, le mérrou, la sole, les sparidés, le barramundi, le maigre...

La dorade coryphène (*Coryphaena hippurus*, L) poisson magnifique au demeurant, est un bon candidat pour l'élevage grâce à sa forte croissance (il peut atteindre 1,7 kg en 6 mois, soit une croissance journalière de 8,6%) et à la haute qualité de sa chair. Des essais sont en

cours en Tunisie, en Australie, à Hawaï, aux Caraïbes et aux Barbades. Pour le moment l'élevage larvaire reste délicat mais les prix de vente sur les marchés (de 15 à 32 US\$/kg) motivent les recherches.

L'ombrine tropicale est un poisson mal connu sur nos étals mais son élevage se développe bien à la Martinique, à la Guadeloupe, à la Réunion et à Mayotte. Les débouchés à l'exportation sont nombreux vers les États Unis et l'Europe.

L'élevage des sérioles est présent en Méditerranée, au Japon et en Australie. Les premiers essais ont eu lieu dans les années 1970 au Japon qui est actuellement le premier pays producteur avec 150 000 tonnes par an. Leur croissance rapide en aquaculture semble être un bon atout pour que leur élevage se développe de plus en plus en Méditerranée.

L'élevage du cobia (*Rachycentron canadum*, L) a débuté dans les années 90 à Taïwan. En 2004 la production de l'île était estimée à 5000 tonnes et la production mondiale aurait même dépassée les 20 000 tonnes. Les principaux pays producteurs sont la Chine, le Vietnam, les Philippines et l'Australie. C'est une espèce qui possède de nombreux atouts pour l'élevage.

L'élevage du thon rouge (*Thunnus* sp.) a démarré dans les années 1970 au Japon et au Canada. L'élevage est basé sur le grossissement de juvéniles sauvages en cages en haute mer. C'est un capital génétique perdu, car ces juvéniles ne se reproduiront jamais. L'embouche de thon est un secteur très rentable surtout en Australie qui produit 14 000 tonnes par an et au Japon qui produit 13 500 tonnes par an.

Enfin, le mérrou (*Epinephelus* sp.) est un excellent candidat pour l'aquaculture avec déjà de nombreuses espèces élevées en Asie. Selon Sadovy [2001] une quinzaine d'espèces de mérrou est déjà élevée dans les fermes aquacoles d'Asie du Sud-Est et les espèces dominantes varient selon les pays. Toutefois, les espèces les plus fréquemment capturées en milieu naturel destinées à l'aquaculture, ou élevées en écloseries sont :

Epinephelus coioides, *E. malabaricus*, *E. bleekeri*, *E. akaara*, *E. awoara* et *E. aerolatus*. Sont également élevées, en plus petites quantités, les espèces *E. amblycephalus*, *E. fuscoguttatus*, *E. lanceolatus*, *E. sexfasciatus*, *E. trimaculatus*, *E. quoyanus*, *E. bruneus*, *Cromileptes altivelis*, *Plectropomus leopardus* et *P. maculatus*. De 1991 à 2000, la production annuelle aquacole est passée d'environ 2000 tonnes à plus de 9000 tonnes [Ottolenghi, 2004]. Les principaux pays producteurs sont, par ordre de production (en tonnes/an) : Taïwan (5053), Thaïlande (1250), Malaisie (1217) et Indonésie (1159). Les mérours sont très attrayants d'un point de vue économique car ils se vendent cher sur les marchés et le niveau de la demande est très élevé. En Méditerranée, le mérrou brun (*Epinephelus marginatus*), interdit de pêche et de chasse sur nos côtes suite à l'effondrement de ses effectifs, est sans doute un bon candidat pour l'aquaculture. Il possède une bonne image et a une forte valeur économique [Pierre *et al.*, 2008]. Les équipes italiennes et espagnoles, qui travaillent dessus depuis quelques années ont rencontré de nombreux problèmes lors de la mise en place des protocoles d'élevage mais semblent être sur le point de les résoudre. Ces essais ont permis quelques tentatives de repeuplement mais n'ont pas encore donné lieu à des productions industrielles. Au vu de ces succès, la maîtrise de la reproduction et de l'élevage des espèces méditerranéennes de mérours sera sans doute un enjeu important pour l'aquaculture, combinant l'intérêt des aquaculteurs et des protecteurs de l'environnement, puisque ces espèces sont protégées. Elle permettra de proposer aux consommateurs un poisson goûteux, tout en sauvegardant ces espèces en grand danger, "redorant" ainsi le blason de l'aquaculture par l'élevage d'une espèce mythique à forte valeur ajoutée.

Dans le même esprit, l'Amérique latine porte un grand intérêt à sa faune aquatique locale comme le pirarucu (*Arapaima gigas*, Schinz), le tambaqui (*Colossoma macropomum*, Cuvier), le cachama (*Piaractus brachypomus*, Cuvier). La Chine, elle, procède à des essais d'élevage plus ou moins avancés sur près de 70 espèces de poissons, le choix se portant sur des

espèces à croissance rapide, bien que ce critère ne soit pas toujours le plus pertinent.

Ailleurs, des filières se mettent en place pour de nouvelles espèces avec un accompagnement important de recherche pour, la sole (*Solea senegalensis*, Kaup) au Sénégal, le vivaneau des mangroves (*Lutjanus argentimaculatus*, Forsskål) en Malaisie, divers fugu et poissons plats en Amérique Centrale et du Sud, et des crustacés comme le crabe de vase (*Scylla paramamosain*, Estampador) en Indonésie.

La production aquacole s'accroît ; ainsi après 2180 tonnes en 2003, la Norvège a dépassée les 3000 tonnes en 2004, et l'Écosse, 6000 tonnes en 2006.

3- Alimentation des poissons d'élevage et pêche minotière

L'une des questions essentielles a trait à l'avenir de la culture des espèces carnivores, demandeuses de protéines animales pour leur alimentation. En effet, ces espèces sont nourries avec des aliments composés de 30 à 60% de farine et d'huiles de poissons [inf'eau n°3]. Depuis l'apparition des aliments composés, fabriqués à partir de ces farines et huile de poissons, on a vu apparaître une autre forme de pêche, celle des espèces dites "fourrages". Ces espèces ne servent qu'à l'alimentation animale et n'entrent pas dans le circuit de l'alimentation humaine. Avec l'explosion de l'aquaculture les espèces fourrages viennent désormais à manquer. Cette pénurie de matières premières pourrait tout d'abord entraîner une hausse importante des prix mais surtout, pouvons-nous continuer à pêcher le cinquième des ressources halieutiques de la planète, pour fournir de la protéine animale à nos élevages ? [Bœuf, 2001]. Aujourd'hui 30 à 40 Mt par an sont destinées à être transformées en farines et 6,2 à 7,4 Mt en huiles [Ferra, 2008]. La culture des espèces carnivores ne pourra donc être viable que si on trouve une autre voie que la pêche minotière. De récents travaux montrent l'effet délétère des pratiques actuelles [Naylor *et al.*, 2000], non seulement sur les pêcheries océaniques mais aussi sur l'activité aquacole elle-même. Par exemple, il faut 10 à 20 kg de

poissons pour produire un kilo de thon rouge en élevage.

L'importance de la Chine dans le développement aquacole pèse ici très lourd. Depuis des millénaires, les chinois nourrissent leur production aquacole avec des rebuts de pêche ou avec des carcasses d'animaux terrestres. Maintenant, la Chine développe de plus en plus de productions extrêmement consommatrices d'aliments composés. Les décisions politiques de la Chine dans ce domaine seront donc très importantes et pèseront lourdement dans l'avenir des espèces fourrages.

Les espèces de poissons pêchées pour fabriquer de la farine se divisent en deux grandes catégories [inf'eau n°1]:

— La famille de l'anchois, comprenant la sardine, le maquereau, le pilchard, se trouve au Chili et au Pérou. Elle est plus riche en matières minérales et plus pauvre en protéines que celle du hareng et ne permet pas de fabriquer des farines de poissons de plus de 68% de protéines.

— La famille du hareng, avec le capelan, le prat, la lingue, l'éperlan, est plus riche en protéines et permet d'obtenir des farines à 71% de protéines. L'huile de poisson est la source principale de lipides dans le régime alimentaire des salmonidés. Les huiles de poissons marins sont en général d'excellentes sources d'acides gras polyinsaturés $\omega 3$ à longue chaîne (EPA et DHA), acides gras "exigés" par les salmonidés. Plusieurs solutions sont envisagées en remplacement de ces produits à base de poisson. On peut, par exemple, penser au développement de l'élevage de tous les maillons de la chaîne alimentaire. Ainsi, la culture d'algues, celle de crustacés ou de poissons herbivores pourront servir ensuite à nourrir les espèces carnivores. Une autre voie possible et relativement prometteuse, est celle du développement des produits d'origine végétale. Sur le plan mondial, la disponibilité en huiles de poisson étant très réduite, l'INRA a montré qu'il était possible de les remplacer, pendant la phase de croissance du poisson, par des huiles végétales (lin, soja, colza...). Toutefois, en fin de période d'élevage, il est nécessaire d'utiliser de l'huile

de poisson pour rétablir la composition naturelle de la chair en acides gras. D'autres types d'huiles et de graisses peuvent donc être employés dans l'alimentation des poissons, comme les huiles végétales et les graisses animales (saindoux, graisse de volaille), sans effet négatifs sur leur croissance et leur santé. A ce stade, seuls se posent des problèmes d'ordre écologique et éthique : dans la nature, à quel moment les poissons mangent-ils de la volaille ... Avec ce type de comportement et d'alimentation, on risque fort de se retrouver face aux mêmes problèmes qui sont apparus avec les vaches à qui l'on donnait à manger de la viande.

Les recherches sur le remplacement partiel ou total de l'huile de poisson par des huiles d'origine végétale sont donc des enjeux majeurs et incontournables pour le développement de l'aquaculture et pour le maintien de la qualité diététique de la chair des poissons d'élevage.

Pour les farines, plusieurs protéines végétales et sous-produits de céréales sont déjà employés régulièrement dans les formules des régimes alimentaires des poissons. Certains produits issus de protéines végétales ont une bonne valeur nutritive et sont économiques (exemple le gluten de maïs), alors que d'autres améliorent les caractéristiques physiques des granulés. Les régimes de poissons formulés avec des taux élevés de protéines végétales semblent généralement nutritionnellement proportionnés. Cependant, l'incorporation de certains produits doit être limitée pour différentes raisons, telles que leur contenu en amidon et en fibres, la présence de facteurs antinutritionnels ou indésirables et de leur appétence. La plupart des ingrédients de protéines végétales sont soumis à un traitement thermique pendant la transformation, ce qui réduit considérablement le niveau de plusieurs de ces facteurs antinutritionnels, tels les inhibiteurs de trypsine de soja. Cependant, une chaleur excessive peut également diminuer la qualité alimentaire des produits de protéines végétales en détruisant des acides aminés. Grâce aux connaissances sur les besoins nutritionnels des poissons, l'INRA [fiche de presse Info 28/04/2008 et 01/09/2004] a pu élaborer des aliments de substitution : soit avec des

sources uniques (concentrés protéiques végétaux, glutens), soit avec un mélange de plusieurs matières premières (blé, soja, colza, pois, lupin, maïs). Cette alimentation d'origine végétale n'affecte ni la croissance, ni la qualité de la chair du poisson. Il est cependant nécessaire de la compléter avec certains acides aminés, moins présents que dans les farines de poisson et de bien veiller à l'absence de facteurs antinutritionnels. Ainsi, à court terme, grâce aux progrès de la recherche, l'aquaculture pourra intégrer et valoriser les matières premières d'origine végétale issues de l'agriculture, tout en préservant les ressources marines traditionnellement sollicitées.

4- Relations avec l'environnement

Une autre question fondamentale concerne l'impact de l'aquaculture sur le milieu et vice-versa. Selon le rapport de Brundtland présenté en 1987 lors de la 42^{ème} session de l'ONU, le Développement Durable est défini comme "un mode de développement apte à répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité à satisfaire ceux des générations futures". Pour le bien de l'humanité il faut préserver l'environnement, développer la croissance économique et la solidarité entre les peuples. Les ressources en eau de notre planète sont mal réparties et souvent mal gérées et l'augmentation croissante des besoins en eau pour les différentes activités humaines (domestique, agricole, industrielle ou loisir) peut altérer la qualité des milieux.

L'un des enjeux essentiels de la production piscicole aujourd'hui est donc la gestion rationnelle de l'eau. Avec une production qui s'accroît d'année en année, il est indispensable de veiller à conserver une eau de bonne qualité. L'aquaculture mondiale qui représente une source majeure de protéines pour le futur doit avant tout se développer dans le respect de la qualité des eaux et doit aujourd'hui résoudre plusieurs problèmes importants.

Le problème majeur est lié aux rejets des fermes aquacoles. Il est clairement établi aujourd'hui, que les systèmes intensifs d'élevage jouent un rôle dans la pollution de l'environnement. Cependant on ne doit pas

oublier que l'aquaculture est loin d'être la plus importante source de pollution des réseaux hydrologiques [inf'eau n° 8]. Les pollutions d'origine piscicoles peuvent être de deux types : matières en suspension et substances dissoutes. Les matières en suspension sont d'origine fécale ou proviennent d'aliments non consommés. Par exemple, les saumons rejettent 70–75 g d'aliments non digérés sur 100 g ingérés. Les substances dissoutes sont quant à elles issues du catabolisme (azote et phosphore). Ces rejets peuvent altérer les sédiments et les organismes benthiques, entraîner une eutrophisation du milieu avec développement d'algues toxiques, augmenter la turbidité de l'eau et diminuer le taux d'oxygène dissous surtout en eau douce [Billard, 2005].

En matière de pollution, les grosses concentrations aquacoles peuvent donc poser des problèmes surtout si la masse d'eau n'est pas constamment renouvelée. La réduction de ces rejets repose principalement sur la bonne gestion de l'alimentation. Il faut par exemple contrôler au plus près la distribution de l'alimentation c'est à dire augmenter le temps de nourrissage, vérifier que tout a été absorbé avant d'en redistribuer, mettre en place des cages de nourrissage à l'intérieur des cages à poissons pour les aliments flottants et limiter l'utilisation d'aliment coulant. Il faut également utiliser des aliments moins polluants, de formulation différente pour une meilleure digestibilité. Cependant, à l'heure actuelle, ils sont souvent plus coûteux. La réduction de ces rejets repose sur des bases nutritionnelles et comportementales et sur l'évaluation de l'utilisation digestive des aliments [inf'eau n° 8]. Une autre méthode visant à réduire ces rejets est de développer une autre forme d'aquaculture : la coculture. La coculture est la culture associée de plusieurs espèces marines (poissons, échinodermes, annélides, gastéropodes et autres algues) dans une même ferme. La base de cette coculture repose sur la capacité d'une espèce à épurer le milieu des déchets produits par une autre. La pollution organique est ainsi réduite et l'impact des élevages sur l'environnement est diminué. On associe déjà aujourd'hui plusieurs espèces en élevage pour minimiser les rejets comme par

exemple *Haliotis discus hannai* et *Stichopus japonicus* [Kang *et al.*, 2003] ou encore *Palmaria mollis* et *Haliotis rufescens* [Evans and Langdon, 2000].

Parfois, les aménagements aquacoles eux-mêmes peuvent déstabiliser les littoraux s'ils sont trop importants. Il faut alors intervenir au niveau de l'exploitation elle-même pour essayer de réduire son impact sur l'environnement.

Enfin, pour les piscicultures d'eau douce il faut traiter l'eau au maximum en sortie de la concession. La législation impose des normes de rejets et invite de plus en plus à une minimisation de ces derniers. Jusqu'à une époque, pas si lointaine, l'eau était rejetée en sortie d'élevage, telle quelle, sans traitement particulier. Aujourd'hui divers systèmes sont mis en place afin de minimiser ces rejets de type recyclage, décantation ou épuration. Tous ces systèmes sont assez difficiles à mettre en place si le débit d'eau est trop important et ils ne sont pas, non plus, valables pour les élevages en mer.

A la décharge des aquacultures, une étude récente [Mirto *et al.*, 2009] a montré que la dégradation de l'environnement proche des fermes n'était pas systématique et que les problèmes de rejets restaient très localisés autour des fermes sans perturber l'ensemble de l'écosystème. L'aquaculture change et aujourd'hui, une autre approche est envisagée.

Elle consiste en une amélioration de la gestion des pratiques sur la pisciculture même. Pour cela, un "guide des bonnes pratiques en pisciculture" a été édité et vise à minimiser les pollutions à toutes les étapes de production. Chaque guide est spécifique d'un type d'élevage. Cette démarche, plus qualitative, est plus facile à mettre en place que de faire respecter des normes strictes nécessitant des contrôles réguliers [Billard, 2005]. Cette question de l'impact de l'aquaculture sur le milieu est donc plus que jamais à l'ordre du jour car pour développer l'aquaculture, il faudra d'abord que toutes ces questions soient résolues.

En ce qui concerne l'impact du milieu sur les

élevages, les études à ce propos sont beaucoup moins approfondies que celles visant l'impact des élevages sur le milieu. On sait désormais que la qualité du milieu influence fortement la qualité sanitaire des poissons sauvages mais qu'en est-il de nos élevages ? La plupart des contaminations se fait par la chaîne trophique. En effet il y a bioamplification de nombreux composés chimiques tout au long de la chaîne alimentaire. Or, nos poissons d'élevage sont nourris avec une alimentation exogène qui est contrôlée tout au long de son processus de fabrication. Certaines classes de polluants passent par l'alimentation, ce qui ne concerne pas les élevages et d'autres via l'eau par voie branchiale ou cutanée et sont donc susceptibles de contaminer nos élevages. Il faudra donc encore de nombreuses études pour confirmer quels polluants sont capables de contaminer les poissons d'élevages.

5- Conflits d'usage

Dans le Sud-Est asiatique, où la dépendance en protéines d'origine aquatique est très forte, la priorité est de nourrir l'ensemble de la population, la gestion des espaces aquatiques n'est donc pas sujette à controverse comme en Europe. Dans les pays européens, et c'est le cas en France, le foncier coûte cher et l'accès à la côte est de plus en plus difficile. Sur le littoral l'urbanisation augmente, avec comme conséquence une augmentation des pollutions et de la pression sur un littoral déjà fortement artificialisé menant inexorablement à des conflits d'usage. Les professionnels sont donc confrontés à de nombreux problèmes comme la limitation de l'attribution des concessions, les lourdes contraintes administratives et réglementaires, le peu de soutien des pouvoirs public et des politiques, ou encore la compétition avec les autres pays. De plus, l'acceptation des projets par les autorités n'est jamais garantie bien que ces derniers soient souvent bien construits et présentent des impacts sur l'environnement réduits au maximum. Des études sont ainsi menées pour évaluer l'impact des piscicultures sur le milieu naturel ainsi que les capacités de charge des nouveaux sites. Toutes ces études permettent de mieux cibler les sites capables d'accueillir les activités aqua-

coles. Le littoral de la région PACA est parmi les plus prisés de France ; les conflits entre les pêcheurs, les touristes, les groupes immobiliers et les aquaculteurs y sont très fréquents. Il est donc difficile d'y installer des concessions piscicoles. L'aquaculture française a le plus faible taux de croissance annuel de toute la Méditerranée ; seulement 0,2% (contre 10% pour la Grèce). Pour que l'aquaculture durable se développe en France, il faut déplacer les concessions vers le large (Offshore), augmenter la taille des fermes déjà existantes et développer les récifs artificiels. Avec l'amélioration des techniques offshore d'aquaculture on peut espérer aujourd'hui un nouveau départ pour l'aquaculture française. En effet, il est plus facile aujourd'hui de coloniser ce nouvel espace avec, par exemple, l'apparition de cages dites immergeables résistantes aux tempêtes et se situant entre 1 et 5 miles d'un port. Le choix du site est un élément indispensable dans la viabilité et la rentabilité des installations. Pour déterminer les sites propices à l'installation de sites aquacoles, les études se basent sur le croisement de différentes cartes d'occupation et de contraintes de la zone concernée. Les cartes peuvent concerner des paramètres physiques comme la courantologie, la bathymétrie, l'exposition aux vents, la distance aux ports ; mais aussi les conflits d'usage entre les zones de pêche, les sites de plongée, les aires marines protégées, les zones militaires, les zones comprenant des espèces sensibles (herbier de posidonies ...)... Ces installations ne peuvent pas non plus se faire trop loin des côtes car une maintenance et surveillance journalière sont requises sur les parcs (alimentation, vérification de l'état de santé des poissons, vérification des filets, ...). Et avec la hausse des prix des carburants et le coût carbone de ces allers-retours, ces déplacements en bateau sont comptés et doivent être réduits au maximum. Enfin, la sécurité des installations et des personnes qui y travaillent est un axe prioritaire. Il est, pour le moment, préféré des sites sur des profondeurs entre 15 et 40 m pour faciliter l'accès aux plongeurs pour la vérification de l'ancrage et de l'état global des installations. Il existe donc de nombreuses contraintes qu'il convient de prendre en compte.

C'est donc un nouveau défi que doit relever l'aquaculture que de trouver de l'espace disponible sans dénaturer le littoral et en tenant compte des autres activités. Il en va de même pour l'aquaculture d'eau douce qui, pour se développer, doit composer entre tourisme, et gestion de l'eau de consommation disponible pour l'Homme. Les solutions envisageables sont sûrement la création de zones réservées au développement de l'aquaculture avec une certification qualité obligatoire (label bio, label rouge ...). Cette nouvelle forme d'aquaculture pourra avoir pour buts et effets de développer l'économie locale ; de mettre en place des partenariats avec les clubs de plongée et tour opérateurs, avec les centres de recherche qui travaillent sur le développement des techniques offshore, la qualité, l'environnement ... Ces zones, loin d'accroître la pollution, seront donc bénéfiques pour l'environnement littoral, si elles sont réalisées dans les règles de l'art, et pour le tissu économique régional.

6- Récif artificiel : une nouvelle forme d'aquaculture

Enfin, une piste à développer, est l'implantation de l'aquaculture sur des récifs artificiels. Il y a quelques années, les premiers essais ressemblaient plus à une belle opportunité de se débarrasser à moindre coût de déchets encombrants qu'à une réelle gestion du milieu. Aujourd'hui, les récifs artificiels sont des structures spécialement conçues avec des matériaux neutres et avec des formes et des tailles différentes en fonction des habitats des différentes espèces que l'on veut y attirer. Par exemple, il faut de nombreuses cavités longues et étroites pour les congres, des cavités spacieuses pour les loups et les sars ... Le matériau le plus usité est en général le béton. Il est stable, durable et suffisamment rugueux pour permettre la colonisation [Charbonnel, 2007]. L'emplacement des récifs est un élément déterminant dans la bonne colonisation de ce dernier. Il faut de la lumière, une eau riche en nutriment, il faut que le récif présente suffisamment de points positifs pour attirer les individus. Les premières espèces à coloniser les récifs sont les algues, les coraux, viennent ensuite les herbivores puis les carnivores, le

récif offrant "le gîte et le couvert". Mais le récif doit aussi servir de protection face aux prédateurs ou aux tempêtes.

Depuis une vingtaine d'années, l'utilisation des récifs artificiels s'est généralisée de manière non négligeable. Les objectifs de cette mise en place se sont maintenant diversifiés. Ils doivent donc toujours favoriser les pêches, mais aussi la conservation de la nature, la protection et la gestion de l'habitat, le développement d'une aquaculture extensive, les activités récréatives ou encore la recherche scientifique. Ces récifs ont été développés pour répondre aux problèmes de dégradation des écosystèmes et d'effondrement des stocks de poissons. La population augmentant sur le littoral, elle entraîne une augmentation de la pollution et de la pression anthropique sur le milieu. Dans ce contexte, les récifs artificiels contribuent à une meilleure gestion des ressources marines. C'est grâce aux découvertes scientifiques que la réalisation des récifs artificiels a évolué permettant ainsi, aujourd'hui, d'augmenter la production biologique et la biodiversité, de protéger et de reconstruire les habitats, au final de redonner vie aux écosystèmes. A l'heure actuelle, les pays qui s'engagent dans cette politique de gestion durable des écosystèmes et de la pêche en installant des récifs artificiels, gagent sur un retour à long terme sur le plan social, économique et politique [site du CIHEAM]. A l'heure actuelle le Japon est le leader incontesté en matière de récifs artificiels lesquels sont faits par les pêcheurs et pour les pêcheurs. C'est le seul pays à avoir restauré sa ressource halieutique. Environ 20 000 sites ont été équipés ainsi de récifs artificiels en 2001. Pour le programme récifs de 2000 à 2006 le gouvernement japonais a même investi près d'un milliard d'euros. Il existe 350 modèles différents de récifs en fonction des espèces visées qui abritent aujourd'hui plusieurs millions de poissons et autres animaux au large du Japon. Les Japonais immergent chaque année environ 2 millions de mètres cubes de récifs. Les plus grands mesurent 80 mètres de hauteur. En Europe, les plus importantes campagnes d'immersion de récifs ont eu lieu en Italie, en Espagne et au Portugal avec plus de 100 000

mètres cubes chacun. L'Union Européenne a financé ces actions à hauteur de 50%. En France, c'est en 1968 que démarrent les premières immersions, sans réflexion poussée, avec des épaves et des pneus. En 1985, avec l'aide de l'Ifremer, les autorités lancent un vrai programme de développement de ces récifs, basé sur des études scientifiques et qui s'intègre parfaitement dans la conservation du littoral et la protection des milieux aquatiques. Ce programme se concentre sur le pourtour méditerranéen avec 21 sites en région PACA et Languedoc-Roussillon. Le volume de ces immersions représente un total de près de 52 000 mètres cubes [Charbonnel, 2007], auquel il faut ajouter les 35 000 mètres cubes du Programme Récifs Prado de Marseille (ville de Marseille 2008).

Ces récifs sont donc considérés comme une nouvelle forme d'aquaculture extensive "auto-gérée", les poissons se nourrissant par eux-mêmes, l'habitat seul étant fourni par l'homme. Il est à noter cependant que certains récifs sont dotés de distributeurs automatiques d'aliments en surface où les poissons peuvent venir s'alimenter, ce qui les rend dépendants. Cette pratique est notamment usitée au Japon où les juvéniles de poissons, élevés en éclosérie, sont nourris en même temps que la diffusion d'un signal sonore. Après quelques mois, les poissons sont relâchés sur le récif et le même signal sonore indique l'heure du nourrissage. Les poissons restent alors plus facilement sur site où la nourriture est fournie et sont ensuite pêchés quand ils ont atteint la taille commercialisable [Billard, 2005]. Il est donc possible d'élever sur les récifs les espèces d'intérêt pour le commerce et les pêcher avec les bateaux de façon traditionnelle mais reconvertis à une gestion durable et rigoureuse des stocks de poissons.

Conclusion

Avec de plus en plus d'interdictions de pêche et de quotas ainsi qu'avec l'effondrement des stocks naturels de poisson, l'aquaculture apparaît de plus en plus comme une solution, voire LA solution pour empêcher que nos mers ne se dépeuplent. La pêche a atteint aujourd'hui

son niveau maximal. Plusieurs espèces se sont déjà raréfiées voire éteintes. Les milieux sont pollués et ont beaucoup perdu de leur biodiversité. Dans ce contexte dramatique l'enjeu de l'aquaculture apparaît comme une évidence. Il faut que l'aquaculture se développe pour contribuer à l'offre mondiale de protéines d'origine aquatique. Cependant, l'accroissement de la production aquacole ne dispense pas les autorités de prendre les mesures nécessaires quant à la gestion durable des stocks et à la préservation de la ressource. Il faut en effet développer l'exploitation durable des stocks en ne pêchant que dans la rente biologique, préserver les nourriceries ainsi que les zones de concentration des juvéniles afin de restaurer les populations naturelles menacées d'extinction. Pour le moment, il ne peut y avoir d'aquaculture sans pêche. Les interactions entre ces deux grands systèmes sont fortes et complexes et cette cohabitation semble vouloir perdurer encore longtemps. L'aquaculture soutient en effet l'effort de pêche et complète les arrivages en tonnages significatifs pour certaines espèces mais ne peut pas rivaliser avec la diversité des espèces débarquées par les engins de pêche [Billard, 2005]. De plus, les circuits de distribution sont les mêmes pour les produits issus des pêcheries que pour les produits issus de l'aquaculture. Ce sont les mêmes réseaux et lieux de vente.

À terme, les débarquements de pêche, qui stagnent depuis plusieurs années, pourront bénéficier des campagnes de repeuplement, mises en place grâce aux écloséries, dans les eaux continentales et en mer pour forcer au recrutement. Ces campagnes pourront servir à la fois pour soutenir l'effort de pêche mais surtout pour sauvegarder les espèces menacées d'extinction. Il est évident que l'accès à cette nouvelle ressource et les droits d'usage devront être très contrôlés [Billard, 2005].

Aujourd'hui, l'aquaculture doit répondre à la demande de plus en plus forte des consommateurs d'un point de vue qualitatif et quantitatif. L'aquaculture doit aussi veiller à renforcer la sécurité alimentaire, la croissance économique, les échanges et l'amélioration du niveau de vie. Les aquaculteurs ont donc un défi de taille à relever, réussir à produire suffisam-

ment pour palier l'effondrement de la pêche, et à des coûts moins élevés pour intéresser les marchés. Il faut donc que les aquaculteurs produisent plus mais pas à n'importe quel prix. L'aquaculture doit se développer dans le respect des notions d'environnement et de qualité sanitaire et organoleptique de leurs produits. Certifier de la qualité sanitaire des produits issus de l'aquaculture est un enjeu important car en bout de chaîne trophique c'est le consommateur qui prend un risque. Bien que les contrôles de la part de la Direction des Services Vétérinaires soient réguliers en France sur les élevages, il n'en va pas de même pour tous les pays. Par exemple suite à des problèmes sanitaires un embargo sur les produits de Thaïlande a été décrété entre 1998 et 2001. En effet, ces produits étaient considérés comme dangereux suite à l'utilisation de pesticides durant l'élevage [Ferra, 2008]. Plus récemment, en octobre 2008, c'est l'aquaculture des mérus à Taïwan qui a été touchée par un problème d'ordre sanitaire. Des traces de mélamine ont été détectées dans l'alimentation destinée aux fermes aquacoles de Pingtung. Cet aliment provenant de Corée du Sud était formulé à partir de calmars auxquels avait été rajoutée de la mélamine afin d'augmenter artificiellement le taux de protéines [Fish Farming, oct. 2008]. Il faudra donc renforcer les contrôles dans de nombreux pays.

Un autre enjeu important est que l'aquaculture doit se développer sans entrer en compétition avec les espèces autochtones en accentuant ainsi la diminution de la biodiversité naturelle des milieux [Ferra, 2008]. De plus, elle ne doit plus dépendre de jeunes individus d'origine sauvage. L'apparition de structures spécialisées dans les techniques d'écloserie a fortement contribué à diminuer cette pression supplémentaire sur le milieu naturel. Ainsi, en maîtrisant la maturation des géniteurs, la ponte, la reproduction artificielle et les différents stades larvaires, on arrive à s'affranchir de cette dépendance vis à vis du milieu naturel et à réduire la pression de pêche, déjà si forte, sur ce milieu. Au XXI^e siècle, il conviendrait de se mettre en position de réensemencer le milieu marin.

Dans les pays en voie de développement l'aquaculture est censée couvrir les besoins de la

population en protéines animales quand la pêche n'est pas suffisante. L'enjeu est donc strictement de survivre en garantissant de l'alimentation pour nourrir une population sans cesse grandissante. A l'inverse, dans les pays développés, le besoin en protéines est déjà largement couvert par les élevages d'animaux terrestres et par la pêche. L'objectif principal est donc économique avec la production d'espèces à forte valeur ajoutée dites nobles (saumon, sole, turbot, loup, daurade ...), mais aussi écologique. De nos jours, l'aquaculture mondiale doit donc se positionner entre sécurité alimentaire, écologie et rendements élevés. L'aquaculture a encore de nombreux détracteurs et rencontre aujourd'hui d'importantes difficultés. Que ce soit en matière d'insertion sur le littoral de certains pays comme c'est le cas en France avec les problèmes d'accessibilité aux sites et de conflits d'usage. A cela s'ajoutent les problèmes de marché et de compétitivité, les problèmes liés à la sécurité alimentaire et aux organisations de défense de la nature qui dénoncent les impacts des piscicultures sur l'environnement. Enfin, plus récemment, viennent se rajouter les questions liées à l'éthique et au bien-être du poisson. L'aquaculture de demain devra donc être bien différente de celle pratiquée aujourd'hui. Elle devra être respectueuse de l'environnement, être pensée et intégrée dans des schémas d'aménagement des littoraux, mais aussi, être capable de proposer des produits de qualité, de diversifier et d'accroître la production. Elle devra aussi permettre la création de nouveaux emplois et s'intégrer de façon harmonieuse dans le tissu économique local [Ferra, 2008].

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le Conseil Régional pour le financement de thèse de Mlle Pierre Stéphanie ; M. Serge Carle, de la société Aqualog, qui a cofinancé cette bourse ; et enfin TPM et TVT pour leurs collaborations précieuses.

Bibliographie

- Anonyme, 2005. Stratégie de rétablissement et de gestion des stocks de morue à Terre Neuve et Labrador. Government of Newfoundland and Labrador, Canada, 82pp.
- Arinç E., Sen A., Bozcaarmutlu A., 2000.

- Cytochrome P4501A and associated mixed-function oxidase induction in fish as a biomarker for toxic carcinogenic pollutants in the aquatic environment. *Pure Appl. Chem.*, 72: 985–994.
- Billard R., 2005. Introduction à l'aquaculture. Collection Aquaculture—Pisciculture. Lavoisier Ed Tec&Doc, 232pp.
- Blackmore G. and Wang W.-X., 2004. The transfer of cadmium, mercury, methylmercury, and zinc in an intertidal rocky shore food chain, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 307: 91–110.
- Boeuf G., 2001. L'aquaculture dans le monde-quel avenir ? Cycle de conférences 2001–2002 — Perspectives-Quel avenir pour l'Homme.
- Casas S., 2005. Modélisation de la bioaccumulation de métaux traces (Hg, Cd, Pb, Cu et Zn) chez la moule, *Mytilus galloprovincialis*, en milieu méditerranéen. Thèse soutenue le 17 mars 2005. Université du Sud Toulon Var. 362pp.
- Charbonnel E., 2007: http://www.futura-sciences.com/fr/doc/t/zoologie-1/r/provence-alpes-cote-dazur/d/les-recifs-artificiels-au-secours-des-poissons_748/c3/221/p1/
- CIHEAM: <http://www.iamz.ciheam.org/frances/curso06-07/arrecifes-07-pub-fra.htm>
- Claisse D., Cossa D., Bretaudeau-Sanjuan J., Touchard G., Bombled B., 2001. Methylmercury in molluscs along the french coast. *Mar. Pollut. Bull.*, 42: 329–332.
- Cury P. 2008. Une mer sans poissons. Edition Calmann-lévy. 284 pages
- Cury P., Shannon L. and Shin Y., 2001. The functioning of Marine Ecosystems. Reykjavik Conference on Responsible Fisheries in the Marine Ecosystem. Reykjavik, Iceland, 1–4 october 2001.
- DEVINE J.A., BAKER K.D., HAEDRICH R.L., 2006. Deep-sea fishes qualify as endangered. *Nature*, 5 january 2006, p29.
- Drava G., Capelli R., Minganti V., De Pellegrini R., Orsi Relini L., Ivaldi M., 2004. Trace elements in the muscle of red shrimp (*Aristeus antennatus*, Risso, 1816) (Crustacea, Decapoda) from the Ligurian sea (NW Mediterranean): variations related to the reproductive cycle. *Sci. Total Environ.*, 321: 87–92.
- Evans F. and Langdon C.J., 2000. Co-culture of dulce *Palmaria mollis* and red abalone *Haliotis rufescens* under limited flow conditions. *Aquaculture*, volume 185, issues 1–2, May 2000, pages 137–158.
- FAO, 2006. la situation mondiale des pêches et de l'aquaculture. 180pp.
- Ferra C., 2008. Aquaculture. Ed Vuibert. 1264pp
- Fish Farming International, Octobre 2008. Taiwan probes aquaculture melamine contamination. P5.
- GLOBEC International Geosphere-Biosphere Programme, 2003. IGBP Science N°5, Marine Ecosystems and Global Change.
- Gomara B., Bordajandi L.R., Fernandez M.A., Herrero L., Abad E., Abalos M., Rivera J., Gonzalez M.J., 2005. Levels and trends of polychlorinated dibenzo-p-dioxins/furans (PCDD/Fs) and dioxin-like polychlorinated biphenyls (PCBs) in spanish commercial fish and shellfish products, 1995–2003. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53: 8406–8413.
- Hawkins M.B., Thornton J.W., Crews D., Skipper J.K., Dotte A., Thomas P., 2000. Identification of a third distinct estrogen receptor and reclassification of estrogen receptors in teleosts. *PNAS*, 97: 10751–10756.
- IFREMER., 1994. Surveillance des effets biologiques par la mesure de l'activité enzymatique EROD. R.N.O., 9–24.
- INF'EAU, n° 1. Nutrition, Alimentation, Le Guessant Aquaculture, 8pp
- INF'EAU, n° 3. Nutrition, Le Guessant Aquaculture, 8pp
- INF'EAU, n° 8. Environnement, Le Guessant Aquaculture, 20pp
- INRA: Fiche info 28/04/08 http://www.inra.fr/presse/utilisation_matiere_premieres_origine_vegetale_dans_alimentation_poissons
- INRA: Fiche info 01/09/04 http://www.inra.fr/presse/une_alimentation_d_origine_vegetale_pour_les_poissons
- Kang K.H., Kwon J.Y. and Kim Y.M., 2003. A beneficial coculture: charm abalone *Haliotis discus hannai* and sea cucumber *Stichopus japonicus*. *Aquaculture*, volume 216, issues 1–4, 10 feb 2003. Pages 87–93.
- Kavanagh R.J., Balch G.C., Kiparissis Y., Niimi A.J., Sherry J., Tinson C., Metcalfe C.D., 2004. Endocrine disruption and altered gonadal development in white perch (*Morone americana*) from the Lower Great Lakes Region. *Environ. Health Persp.*, 112: 898–902.
- Jobling S., Nolan M., Tyler C., Brightly G., Sumpter J.P., 1998. Widespread sexual disruption in wild fish. *Environ. Sci. Technol.*, 32: 2498–2506.
- Mirto S., Bianchelli S., Gambi C., Krzelj M., Pusceddu A., Scopa M., Holmer M and Danovaro R. Fish-farm impact on metazoan meiofauna in the Mediterranean Sea: Analysis of regional vs. Habitats effects. *Marine Environmental Research*. 2009, doi: 10.1016/j.marenvres.2009.07.005.
- Mutume, G., 2002. L'Afrique cherche à préserver ses pêches. *Afrique Relance*, ONU, 16 (1) : 12–14.
- Naylor R.L., Goldburg R.J., Primavera J.H., Kautsky N., Beveridge M.C.M., Clay J., Folke

- C., Lubchenco J., Mooney H., Troell M., 2000. Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature*, 405: 1017–1024.
- Omnes M.H., 2002. La morue (*Gadus morhua*): biologie, pêche, marché et potentiel aquacole. Ressources de la Mer, Ifremer (ed.), Paris, 54 p.
- Ottolenghi F., Silvestri C., Giordano P., Lovatelli A., New M.B., 2004. The fattening of eels, groupers, tunas and yellowtails. *Captured-based aquaculture*. FAO, Rome: 308 pp.
- Pierre S., Gaillard S., Prévot-d'Alvise N., Aubert J., Rostaing-Capaillon O., Leung-Tack D. and Grillasca J.-P., 2008. Grouper aquaculture: Asian success and Mediterranean trials. *Aquatic Conserv: Mar. Freshw. Ecosyst.*, 18: 297–308.
- Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) - Substances chimiques
- Evaluation Mondiale du mercure. Programme Interorganisations pour la gestion rationnelle des produits chimiques, 2005. 306 pp.
- RNO campagne 2004. Les contaminants organiques: quels risques pour le monde vivant ? Fascicule n°13. 35pp
- Sadovy Y., 2001. Summary of regional survey of fry/fingerling supply for grouper mariculture in southeast Asia. SPC Live Reef Fish Information Bulletin, 8: 22–29.
- Stefanelli P., Ausili A., Di Muccio A., Fossi C., Di Muccio S., Rossi S., Colasanti A., 2004. Organochlorine compounds in tissues of swordfish (*Xiphias gladius*) from Mediterranean sea and Azores islands. *Marine Pollution Bulletin*, 49: 938–950.
- Storelli M.M., Giacomini-Stuffler R., Marcotrigiano G.O., 2002. Total and methylmercury residues in tuna fish from the Mediterranean sea. *Food Additives & Contaminants*, 19 (8): 715–20.
- Storelli M.M. and Marcotrigiano G.O., 2004. Content of mercury and cadmium in fish and cephalopods from the south eastern Mediterranean sea. *Food Additives & Contaminants*, vol 21, num 11: 1051–1056.
- Storelli M.M., Busco V.P., Marcotrigiano G.O., 2005a. Mercury and arsenic speciation in the muscle tissue of *Scyliorhinus canicula* from the Mediterranean sea. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 75: 81–88.
- Storelli M.M., Giacomini-Stuffler R., Storelli A., Marcotrigiano G.O., 2005b. Accumulation of mercury, cadmium, lead, and arsenic in swordfish and bluefin tuna from the Mediterranean sea: a comparative study. *Baseline / Marine Pollution Bulletin*, 50: 993–1018.
- Storelli M.M., Giacomini-Stuffler R., Marcotrigiano G.O., 2006. Relationship between total mercury concentration and fish size in two pelagic fish species: implications for consumer health. *J. Food Prot.*, Jun., 69 (6) : 1402–5.
- Tyler C.R. and Routledge E.J., 1998. Natural and anthropogenic oestrogens: the scientific basis for risk assessment. Oestrogenic effects in fish in English rivers with evidence of their causation. *Pure & Appl.Chem.* 70: 1795–1804.
- Ueno D., Watanabe M., Subramanian A., Tanaka H., Fillman G., lam P.K.S., Zheng G.J., Muchtar M., Razak H., Prudente M., Chung K.H., Tanabe S., 2005. Global pollution monitoring of polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDDs), furans (PCDFs) and coplanar polychlorinated biphenyls (coplanar PCBs) using shipjack tuna as bioindicator. *Environmental Pollution*, 136: 303–313.
- Vigano L., Arillo A., Bottero S., Massari A., Mandich A., 2001. First observation of intersex cyprinids in the Po River (Italy). *Sci. Total Environ.*, 269: 189–194.
- 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*, vol 314: 787–790.

Received: May 1, 2009

Accepted: December 17, 2009