

Les systèmes intégrés en aquaculture marine : une solution durable pour un meilleur respect de l'environnement littoral

Jérôme HUSSENOT

Centre de Recherche sur les Ecosystèmes Marins et Aquacoles
UMR CNRS-IFREMER - BP 5 - 17137 L'Houmeau

Résumé

Les formes anciennes de pisciculture marine, de type polyculture extensive, sont majoritairement aujourd'hui remplacées par des monocultures de type intensif (saumon, crevette). Ces systèmes, multipliés dans une même zone littorale, peuvent présenter un impact sur l'environnement significatif. Pour traiter et valoriser les effluents, la conception de nouveaux systèmes intégrés est en cours d'essais à différents échelles. Des exemples de projets à terre et en mer réalisés dans le Monde sont présentés, en particulier le projet européen d'innovation « Genesis » dans lequel plusieurs organismes français publics et privés, nationaux et régionaux, sont représentés (l'IFREMER, le Centre Régional d'Expérimentation et d'Applications Aquacoles du Poitou-Charentes, le bureau d'études IDEE). Des recommandations sont fournies pour favoriser le développement de l'aquaculture intégrée dans le futur.

Mots-clés : aquaculture durable, polyculture, systèmes intégrés, contrôle des déchets.

Abstract

The former extensive polyculture systems of marine fish farming, are today replaced mainly by intensive monoculture systems (salmon, shrimp). These systems, multiplied in the same coastal zone, can present a significant environmental impact. To treat and value fish farming effluents, new integrated systems were constructed and tested to different scales. Some examples of land- and sea-based systems around the world are presented, in particular the European project of innovation "Genesis" in which several French public and private, national and regional organisations are participants (IFREMER, Regional Centre of Experiment and Aquacultural Applications in Poitou-Charentes, IDEE). Recommendations are supplied to promote the development of the integrated fish farming in the future.

Key-words: sustainable aquaculture, polyculture, integrated systems, waste management.

Introduction

La plupart des systèmes de production de nourriture sont aujourd'hui de type monoculture. Les règles du marché libéral incitent les entreprises à la spécialisation et à l'intensification afin d'augmenter leur compétitivité. Dans une politique de profit à court-terme, la conversion de la ressource vers le produit vendable doit se faire le plus directement possible ; ce qui généralement produit un plus grand nombre de déchets et ne permet pas la meilleure valorisation de la ressource. L'aquaculture n'échappe pas à ces règles, et les systèmes intensifs ouverts entraînent des rejets en nutriments (azote et phosphore) beaucoup plus importants que les systèmes extensifs (Hussenot, 1998), ce qui oblige aujourd'hui à imaginer des procédés d'épuration des eaux usées de l'aquaculture (Bergheim et Brinker, 2003; Hussenot et al., 1998; Hussenot, 2003; Piedrahita, 2003; Yan et al., 1998).

Si, au contraire, la production provient d'un système intégré, celui-ci saura transformer les « déchets » en ressource (Lightfoot et al., 1993; Yan et al., 1998). En choisissant plusieurs organismes occupant différentes niches, un « éco-système » pourra être construit où les différentes cultures pourront

interagir entre elles, diminuant leurs impacts sur l'environnement, et optimisant l'utilisation de l'espace et des nutriments, tout en améliorant la production (Hussenot et al., 1998; Neori et al., 2004; Schaber, 1997; Shpigel et Neori, 1996).

L'idée de culture intégrée s'est développée dans la littérature scientifique depuis environ trois décennies dans les pays du Nord (Brune et al., 2003; Chopin et al., 2001; Hussenot et Shpigel, 2003), alors qu'elle était déjà une pratique culturelle profondément ancrée dans les pays du Sud, connue depuis le 15^e siècle (Brezski et Newkirk, 1997) en lagunes d'eau salée ou saumâtre (Indonésie, Afrique de l'Ouest, Hawaï) et depuis même le 5^e siècle avant J.C dans le traité de pisciculture de Fan Li (Billard, 2000) en étangs d'eau douce (Chine, Viet-Nam, Thaïlande,...).

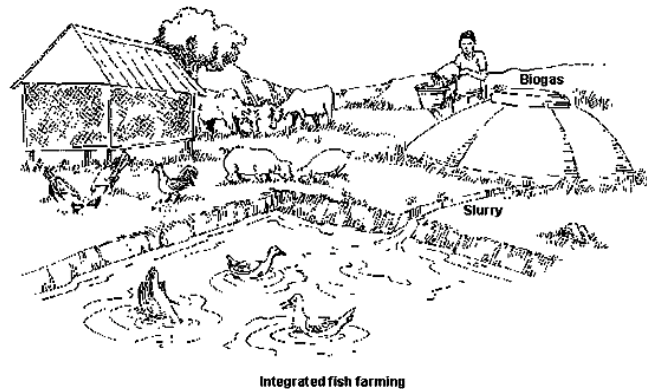


Figure 1 : Un exemple de système d'agriculture-aquaculture intégré en eau douce pratiqué traditionnellement en Asie (IIRR et al., 2001).

La technique de l'acajou, originaire du Bénin (Chitou, 2001; Hem et Avit, 1994; Hem et al., 1990), qui consiste à implanter des pieux ou des branchages dans des lagunes, permet une augmentation de leur productivité naturelle (Welcomme, 1972). Le périphyton (flore et faune épiphyte enveloppée dans une matrice de mucopolysaccharides) développé sur les supports introduits (Guiral et al., 1993) contribue significativement à la nourriture des poissons comme le tilapia lagunaire (*Sarotherodon melanotheron*). Dans des zones fermées par des filets (0,25 à 1 ha) des alevins sont introduits (10 par m²), et une ou deux pêches annuelles sont généralement pratiquées. La production est en moyenne de 1,5-2,0 tonnes de poisson par hectare et par an (Chitou, 2001), pouvant même atteindre dans certains cas jusqu'à 7 à 20 t/ha/an (Hem et Avit, 1994; Kutty et Campbell, 1987; van Dam et al., 2002).

En système extensif d'eau douce, aquaculture et agriculture sont largement associées (Billard, 1998; Kumar, 2000; Prein, 2002), (i) traditionnellement (riz et poisson au Vietnam, carpe et polyculture en Chine ou au Bangladesh, poisson chat et poulets en Thaïlande, voir la figure 1), (ii) ou par des techniques plus récentes comme les cultures hydroponiques de laitue, concombre, tomate en aval d'élevages de poisson tilapia (Rakocy, 1989; Seawright et al., 1998). De la même façon, en système d'eau salée, des essais de démonstration à grande échelle associent des plantes halophytes (salicornes, arbres de mangrove) à l'aquaculture marine (Brown et al., 1999).

De nombreux projets pilotes ont été développés sous forme de modèles théoriques ou d'expériences à petite-échelle. Mais il a été souvent constaté que combiner différentes cultures peut rendre ces systèmes plus complexes à gérer techniquement ou économiquement. En effet, il faut trouver les moyens de satisfaire les besoins spécifiques à chaque organisme, de façon à optimiser la croissance de chacun.

Malgré ces difficultés, des installations d'aquaculture marine intégrée, à caractère commercial ou de démonstration, sont aujourd'hui en développement ou pré-développement dans différentes parties du monde en mer ou à terre, en système ouvert ou en système recirculé.

Le développement explosif de l'aquaculture marine dans le Monde

Avant d'examiner quelques cas concrets, rappelons que l'aquaculture marine aujourd'hui, a atteint une phase de développement mondiale conséquente, essentiellement par des systèmes de monoculture intensive. La production de poissons en aquaculture a plus que doublé en dix ans, entre 1991 et 2001 (tableau 1).

Tableau 1 Production mondiale (millions de tonnes) de la pêche et de l'aquaculture entre 1984 et 2001 (FAO, 2002)

	1984	1988	1991	1994	1998	1999	2000	2001
Pêche	78,7	89,8	85,6	92,6	87,4	92,3	96,7	93,7
Aquaculture	10,2	15,5	18,3	27,8	39,4	32,9	45,7	48,4
Total	88,8	105,4	103,9	120,3	126,8	125,2	142,4	142,1
% aquaculture	11,4	14,8	17,6	23,1	31,0	26,3	32,1	34,1

Mais la monoculture intensive peut avoir des effets négatifs nombreux sur le milieu environnant :

- une augmentation de la turbidité dans la colonne d'eau,
- un enrichissement en nutriments (N et P) pouvant provoquer une eutrophisation,
- une baisse du niveau d'oxygène dans les zones confinées,
- une surcharge organique des sédiments et une sensibilité de la faune benthique,
- une diminution de la biodiversité,
- un développement de micro-algues toxiques.

Pour les élevages de poissons 72% de l'azote et 70% du phosphore contenu dans l'aliment utilisé sont rejetés dans l'environnement (Ackefors et Enell, 1990). Pour exemple, une production de 100 tonnes de saumon atlantique entraîne un rejet dans l'environnement de 3,5 tonnes d'azote et 700 kg de phosphore (Chopin et al., 2001).

C'est pourquoi ont été mises en place, récemment, des mesures réglementaires spécifiques (US Environmental Protection Agency, 2002) ou incitatives pour développer des pratiques culturales plus respectueuses de l'environnement : (i) code de conduite (FAO, 2001), (ii) bonnes pratiques de gestion des aquaculteurs de crevette (Boyd, 2003), etc. Ces documents conseillent notamment la réduction et le traitement des eaux usées (Siddiqui, 2003) afin de diminuer les quantités rejetées de matières en suspension, la demande biochimique en oxygène (DBO), les éléments azotés et phosphorés.

Par contre, il existe aussi certains éléments positifs qui sont liés aux élevages intensifs :

- une stimulation de la productivité naturelle autour des élevages,
- un potentiel pour une aquaculture multi-espèces,
- un traitement facilité des effluents dans les systèmes basés à terre.

Il apparaît donc intéressant d'en profiter, et notamment de rechercher à utiliser et valoriser cet enrichissement en nutriments (N et P), de façon à orienter la production végétale vers des macroalgues ou des microalgues particulières, qui auront un double rôle (i) traiter les eaux enrichies des élevages, (ii) produire des algues pour nourrir des animaux herbivores, ou extraire des composés pharmaceutiques ou alimentaires. C'est cela l'aquaculture intégrée.

Quelques exemples actuels d'aquaculture marine intégrée en mer ou à terre

1. Le projet AQUANET saumon-laminaire-moule en baie de Fundy (Canada).

Avec le support du réseau des centres d'excellence pour l'aquaculture au Canada (Aquanet, projet EI 12), il a été développé sous la coordination du scientifique Thierry Chopin un système pilote industriel de culture associée de saumon (*Salmo salar*), laminaire (*Laminaria saccharina*) et moule (*Mytilus edulis*) en baie de Fundy.

La production de laminaires a été augmentée de 46% à proximité d'un élevage de saumons en cage, comparativement à une zone témoin située à 1250 m des cages (17,4 kg par mètre linéaire de filière contre 12,0 kg dans la zone témoin). Les moules, cultivées à 5m de cages à saumon présentent une croissance en taille augmentée de 20% par rapport à des zones témoins distantes de 200 m et 1200 m avec un indice de condition supérieur de 10-35% (Robinson et al., 2003). D'autres essais de ce type sont également expérimentés en Ecosse, Norvège, Chili, Etats-Unis. Les aspects de qualité sanitaire des produits ont été examinés. Aucun produit chimique thérapeutique utilisé dans l'élevage de saumon n'a été détecté dans la chair des moules. Toutefois des toxines (PSP : paralytic shellfish poisoning) produites par des microalgues toxiques (*Alexandrium fundyense*) ont été constatées au dessus des seuils limites à certaines périodes de l'année (Chopin et al., 2003), nécessitant de mettre en place le contrôle régulier des phycotoxines pour pouvoir procéder à des suspensions de commercialisation si nécessaire. D'après Robinson et al. (2003), il faudrait une biomasse de l'ordre de 30 tonnes de moules pour éliminer les déchets produits par 6 tonnes de saumon.

Le projet propose une solution innovante : la mise au point de systèmes d'aquaculture intégrés équilibrés qui combinent, dans des proportions idéales, l'élevage du saumon à la culture des moules et des algues et tiennent compte des caractéristiques du site, des limites d'exploitation ainsi que des lignes directrices et des règlements sur la salubrité des aliments. À l'heure actuelle, l'industrie piscicole canadienne (107 700 tonnes de poisson en 2001) évolue dans un marché des produits de base, et ses marges de profits sont relativement faibles. Le projet permettra à l'industrie salmonicole de diversifier ses activités en prenant de nouvelles orientations environnementales et économiques. Les moyens d'augmenter la rentabilité à long terme par unité de culture seront recherchés en déterminant les meilleurs programmes de nourrissage et en améliorant la conversion des aliments par unité de culture (et non pas par espèce isolée comme c'est le cas avec la monoculture). Les déchets d'un des composants du système (les poissons) sont capturés et convertis en engrais ou en aliments pour les autres composants commercialisables (algues et moules). Le projet fournira un modèle qui servira non seulement à évaluer la faisabilité biologique de l'aquaculture d'espèces multiples, mais également à quantifier (i) l'utilisation et la conversion la plus avantageuse de l'énergie alimentaire; (ii) l'amélioration des aspects environnementaux qui résulte de la culture combinée de plusieurs espèces (dégradation par voie biologique et conformité avec la réglementation à venir concernant le déversement des effluents); (iii) l'accroissement des coûts et des économies d'échelle associé aux activités; et (iv) les répercussions d'une production diversifiée de produits marins sur le flux de trésorerie, la stabilité environnementale et la réduction des risques et des inquiétudes de la population (www.aquanet.ca).

2. Les cultures associées d'algue gracilaire et de crevette péneide à Hawaii

Le projet est en cours de développement sur l'île Molokai (Nelson et al., 2001a; Nelson et al., 2001b) alors que la culture extensive de l'algue rouge (*Gracilaria parvispora*) « long ogo » dans les anciens étangs salés à poissons (appelés localement « loko kuapa ») a été développée depuis les années 1990 en monoculture. L'azote ammoniacal est apparu un des éléments limitant la croissance, ce qui a nécessité l'emploi de fertilisants minéraux. La culture intégrée mise en place est un peu particulière ici, car elle s'effectue en deux phases. Une première phase d'enrichissement de l'algue dans les canaux de rejets de ferme aquacole de crevette intensive, et une deuxième phase pour la croissance, qui s'effectue en monoculture dans les étangs salés. Les résultats montrent que par rapport à une simple fertilisation minérale en N et P, une immersion dans les canaux où s'écoulent des effluents

d'aquaculture de crevette (N-NH₄ : 62μM, P-PO₄ : 3,7μM, turbidité : 4 NTU) permet un taux de croissance deux fois supérieur (9-10% au lieu de 4,6% avec engrais ou 1,7% sans engrais), une fois les algues remises durant 3 semaines en cages flottantes en mer. La récolte hebdomadaire de 100 kg de biomasse permet la fixation de 3 kg d'azote provenant des effluents aquacoles. En 5 jours dans les effluents le contenu en azote des algues passe de 1% à 3% et le rapport C:N de 30:1 à 10:1.

3 Le projet européen SEAPURA pour développer une poly-aquaculture de poissons et macroalgues

Parallèlement, un projet européen RTD en cours SEAPURA (Lüning et al., 2003) travaille sur le choix des espèces et les performances de croissance de macroalgues cultivées sur effluents de pisciculture marine (<http://www.seapura.com>), incluant les aspects sanitaires et économiques. L'objectif du projet (période : février2001- janvier2004 ; 8 participants ; 5 pays : Allemagne, France, Espagne, Portugal, Royaume Uni) est de développer la culture de macroalgues à haute valeur marchande dans des systèmes intégrés de poly-aquaculture associant poissons marins et macroalgues. Le pouvoir d'assimilation des nutriments par les algues comme rôle épurateur est examiné, en recherchant les meilleures techniques permettant d'accroître la période de production. Il sera aussi recherché pour différentes espèces de macroalgues, leur pouvoir antibiotique sur les maladies des poissons, leur valeur nutritive possible en intégrant ces algues dans les aliments des poissons, et l'intérêt économique global de ces systèmes intégrés, grâce à la participation de PME associées dans le projet.

Les premiers résultats montrent que notamment *Falkenbergia rufolanosa* apparaît comme une espèce intéressante en raison de sa grande tolérance aux températures (15 à 29°C) et de sa forte vitesse de croissance (jusqu'à 60g de poids sec par m² et par jour et une vitesse d'assimilation de l'azote de 13 mmol N-NH₄⁺ par m² et par jour). Les espèces envisagées dans cette étude, essentiellement des algues rouges (Lüning et Pang, 2003) présentent une valeur commerciale propre plus grande que les ulves (*Ulva* sp.), souvent associées dans des systèmes intégrés pour servir de nourriture à des mollusques (gastropodes, échinodermes). Les gracilaires (*Gracilaria* spp.) peuvent être utilisées pour la consommation humaine ou dans la nourriture animale, *Falkenbergia* pour des applications pharmaceutiques, *Chondrus* comme source de carragénates.

4. Le projet de SEAWATER FARMS en bordure de la Mer Rouge (Eritrée).

Le projet de ferme intégrée en Eritrée a été initié par un groupe de chercheurs du laboratoire de recherche environnementale de l'Université d'Arizona (USA), à la demande du gouvernement eritréen (c'est un projet conjoint 50-50 entre la compagnie US « Seaphire International » et le ministère des pêches eritréen). Ce projet est développé à grande échelle sur les bords de la Mer Rouge (figure 2), en zone désertique. 200 bassins circulaires super-intensifs (2-4 kg/m³) de crevette pénéide (*Penaeus monodon* et *P. vanamei*) constituent la culture noyau (Stolte, 2003). Les eaux usées de cet élevage sont ensuite distribuées par un grand chenal principal (pisciculture extensive de tilapia et milkfish) vers (i) des champs de salicorne (*Salicornia bigelovii*) d'une superficie d'environ 100 hectares, (ii) et une zone de mangrove où de jeunes arbres sont plantés pour la production de bois et de feuilles servant à la nourriture des chameaux (forêt de 50 hectares). L'eau termine sa course vers (i) des salines où sont cultivés du sel et des artémies (*Artemia salina*) pour la production de cystes (Vandevivere et al., 2003), (ii) un marais artificiel (120 hectares) où une aquaculture extensive est pratiquée (crevette, tilapia, milkfish) et où vivent de nombreux oiseaux. L'eau purifiée dans ce complexe parcours est finalement redirigée vers la mer. Des aménagements touristiques ont même été réalisés (restaurant à proximité, visite organisée pour l'observation des oiseaux).

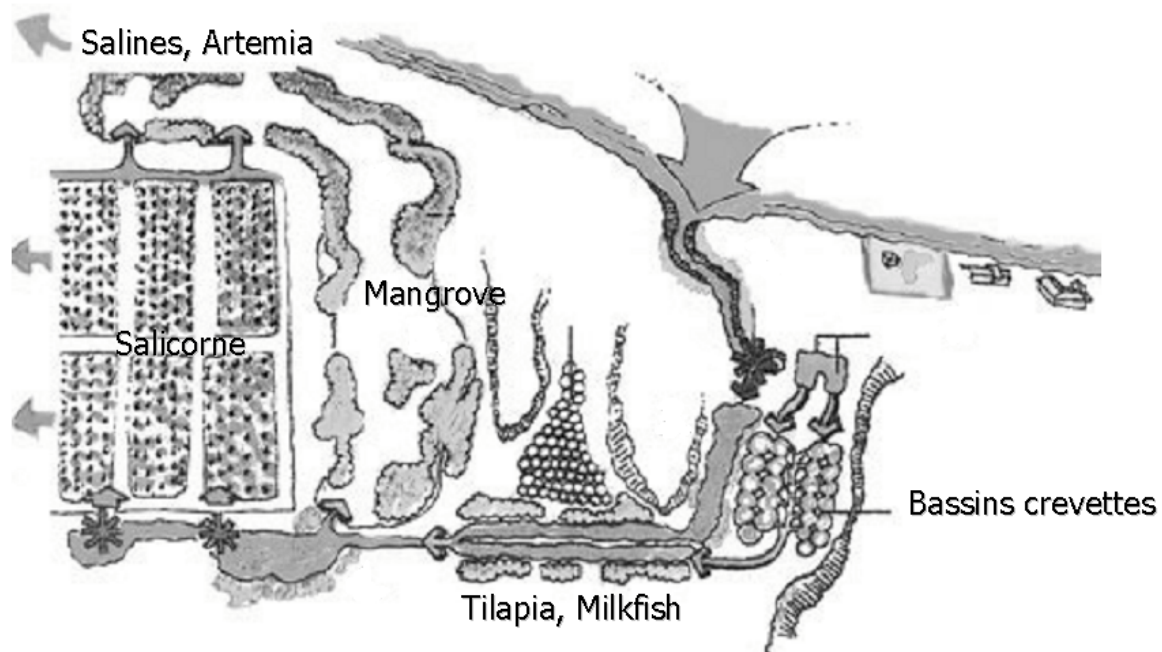


Figure 2 : Vue schématique du système intégré en Erythrée utilisant l'eau de la Mer Rouge pour développer des activités aquacoles (crevette, poissons, artémies) et agricoles (arbres de mangrove, salicornes, sel) en milieu salé (source www.seawaterfarms.com).

5. Le projet d'innovation européen « GENESIS » (Israël, France, Royaume Uni)

Ce projet d'innovation, co-financé par l'Union Européenne (IPS-2000-00102), associe trois instituts de recherche (IFREMER/CREMA, IOLR/CNM, Université de Stirling/Institut d'Aquaculture), quatre petites et moyennes entreprises (SeaOr-Marine, Llyn-Aquaculture, EnviroCentre, IDEE) et une association sans but lucratif (Centre Régional d'Expérimentation et d'Applications Aquacoles du Poitou-Charentes). Il a pour objet le « Développement d'une approche générique de systèmes intégrés d'aquaculture marine durable à terre pour les environnements et les marchés européens. »

Les trois éléments clés du projet « GENESIS » sont de proposer :

- i. une technologie générique, basée à terre, applicable à tous les environnements européens,
- ii. une technologie intégrée capable de produire différents produits marins avec récupération des éléments nutritifs (carbone, azote, phosphore,...) rejetés par le système principal de production,
- iii. une technologie respectueuse de l'environnement, réduisant les besoins en énergie, en aliment et les déchets.

Quatre prototypes ont été conçus, mis en place et évalués, depuis 2001, dans différentes zones géographiques, de façon à valider un système d'eau froide (Pays de Galles), un système d'eau tempérée (marais de la côte atlantique française), un système d'eau tempérée-chaude (côte méditerranéenne de l'Israël), et un système d'eau chaude (côte israélienne de la Mer Rouge). Les systèmes proposés et les espèces élevées sont présentées en figure 3.

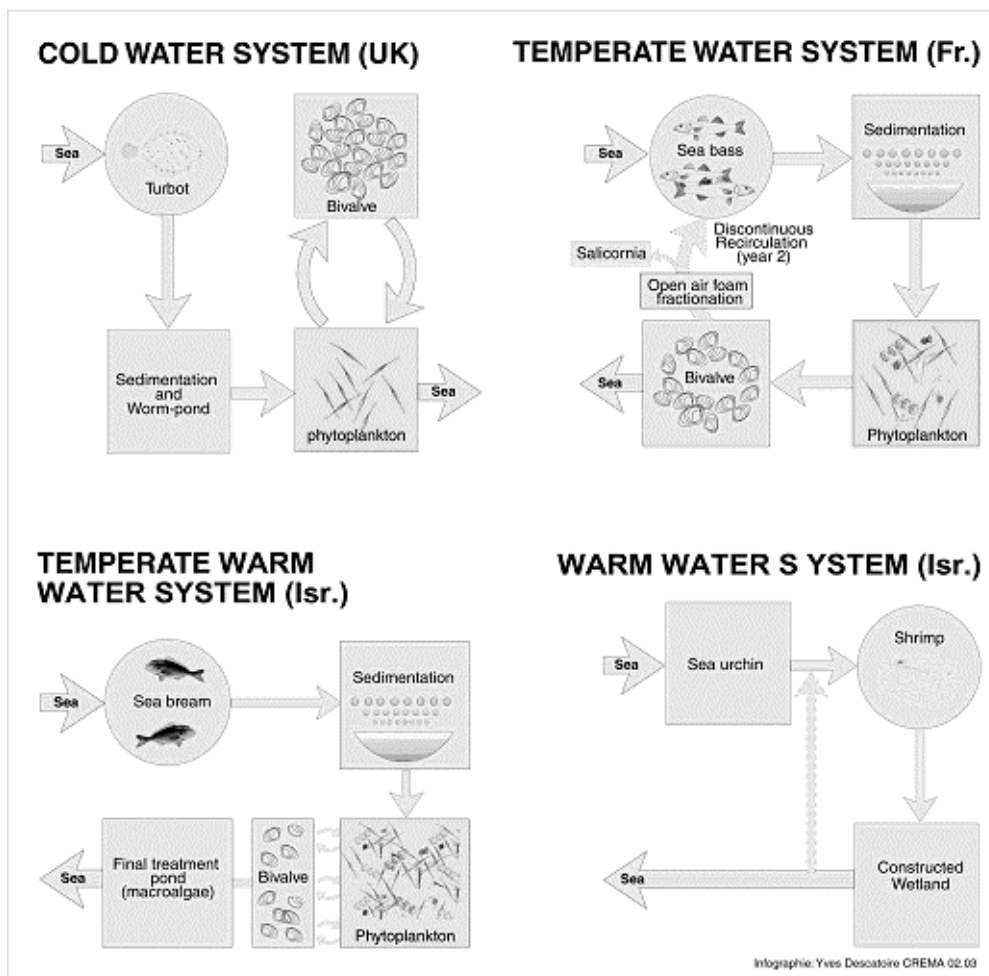


Figure 3: Les quatre différents systèmes d'aquaculture intégrée basée à terre développés dans le projet UE "GENESIS" (GENERIC Sustainable Integrated Systems) en Grande Bretagne, France et Israël.

Le système « eau froide » comporte un élevage en eau recirculée de turbot (*Scophthalmus maximus*), et une unité extérieur de 3 bassins de terre (décantation des boues, production de microalgues, production d'artémies), alimentée uniquement par les eaux de la partie piscicole. Le système « eau tempérée » comporte un bassin semi-intensif de bar (*Dicentrarchus labrax*), un décanteur rapide, deux bassins de production de phytoplancton (culture en continue de diatomées naturelles), et deux bassins de production de bivalves filtreurs (le premier en intensif avec des huîtres creuses *Crassostrea gigas* en casiers superposés, le second avec des palourdes *Ruditapes philippinarum* et des clams *Mercenaria mercenaria*). Le système « eau tempérée-chaude » utilise la même combinaison qu'en France (poisson-microalgue-bivalve), avec comme poisson la dorade royale (*Sparus aurata*). Enfin le système « eau-chaude » associe des crevettes en intensif (*Penaeus semisulcatus*), des oursins (*Paracentrotus lividus*) et un bassin végétal mixte (marais artificiel constitué de macroalgues vertes : *Ulva* sp, *Enteromorpha* sp. et de plantes halophytes : *Salicornia* spp.).

Pour évaluer la faisabilité des systèmes, différentes études ont été entreprises :

- une évaluation technique et une optimisation des systèmes,
- une évaluation de la qualité sanitaire des élevages et des produits,
- une évaluation bio-économique et marketing,
- une évaluation environnementale.

Sur le prototype français, l'IFREMER a mis en place un suivi sanitaire et environnemental régulier. Il apparaît que la qualité des bivalves obtenus est totalement satisfaisante, aussi bien du point de vue des indicateurs microbiologiques : *Escherichia coli*, salmonelles (Chopin et al., 2001; Courtois et al.,

2003), que chimiques (métaux lourds comme le cadmium, le cuivre, le plomb, le zinc). Les nutriments (azote, phosphore) rejetés par le bassin de poisson, et ceux introduits en compléments avant les bassins de phytoplancton pour proposer aux diatomées un rapport atomique N :Si :P convenable (10-20 :5 :1), sont largement utilisés dans le système intégré et une réduction significative de l'azote (N-NH₄ et TDN) est visible en sortie de système (SORTIE en figure 4) par rapport au rejet du premier bassin de bar (Poissons en figure 4).

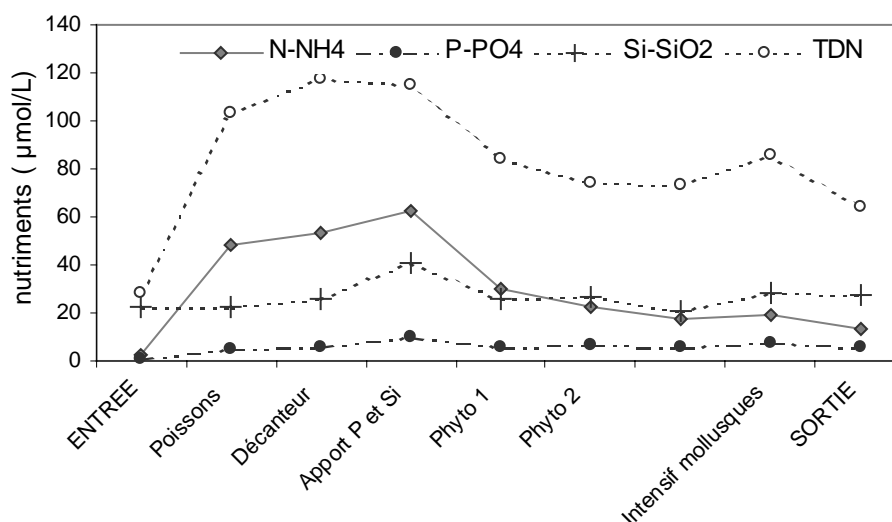


Figure 4: Concentration moyenne des nutriments d'azote (N-NH₄ : ammonium, TDN : azote total dissous), de phosphore (P-PO₄ : orthophosphates), et de silice (Si-SiO₂ ; silicates), mesurés chaque semaine durant l'essai 2003, en différentes stations le long du système d'élevage intégré GENESIS développé en France (données IFREMER/CREMA-L'Houmeau).

La modélisation apparaît être un outil très utile, voire indispensable pour bien comprendre et gérer la complexité d'un système aquacole intégré (Lefebvre, 2003). Le projet « GENESIS » comprend une partie modélisation des systèmes, utilisant un logiciel éducatif et scientifique (Stella Research®), permettant d'une façon simple de faire varier certaines variables comme les biomasses initiales, la taille des bassins ou les débits d'eau de mer. Il a facilité la construction et le fonctionnement du prototype français, (i) pour évaluer la charge en azote et phosphore des effluents du bassin de poisson, (ii) pour dimensionner les volumes et les renouvellements d'eau des bassins de phytoplancton, (iii) pour simuler la biomasse maximale théorique de phytoplancton disponible journalièrement pour les coquillages filtreurs. Le modèle est en cours de validation, et doit permettre à terme d'être un outil de gestion efficace pour les aquaculteurs qui mettraient en œuvre un système intégré du même type.

Conclusion

Il nous semble, à partir de cette rapide approche des systèmes intégrés d'aquaculture marine que pour pratiquer une activité durable vis à vis de l'environnement, l'aquaculture marine devra chercher à aller « au-delà de la monoculture » le plus rapidement possible. L'avantage de ces systèmes est de profiter des déchets et des eaux usées d'une aquaculture intensifiée pour associer à la production, des espèces associées végétales et herbivores. Si l'aquaculture marine, aujourd'hui bénéficie souvent de l'absence de normes de rejets, il n'en sera pas de même dans un futur proche, et des systèmes d'épuration devront être envisagés pour limiter la quantité rejetée de particules (MES), de DBO₅, ou de nutriments (azote, phosphore). L'épuration des eaux d'aquaculture est difficile et coûteuse, si l'on emploie les techniques classiques de l'épuration industrielle, car les effluents d'aquaculture sont constitués de

grands volumes d'eau faiblement concentrés en « polluants » organiques et minéraux, alors que les effluents industriels sont généralement constitués de faibles volumes d'eau très concentrés en matière polluante. La mise en place d'un système d'élevage auto-épurateur, supprimera un coût éventuel de traitement avant rejet, permettant même la réutilisation de l'eau dans le système aquacole en tout ou partie.

Un long chemin reste toutefois à parcourir aussi bien du point de vue technique, que dans la mentalité des producteurs et des consommateurs. L'aquaculture intégrée est toutefois, à notre avis, un pari qui mérite d'être pris au niveau de la recherche aquacole.

Les actions scientifiques à engager sur le long terme devront, à notre avis :

- i. s'assurer que l'expérience acquise sur le court-terme permettra une meilleure compréhension sur le long-terme (stocker et classer les données acquises, partager entre tous les résultats),
- ii. rechercher des systèmes où la totalité de la production aquatique sera optimisée et non une simple espèce maximisée,
- iii. vérifier que les systèmes mis en place auront des effets limités sur le milieu environnant.

Les recommandations que nous souhaitons faire auprès des acteurs (professionnels et décideurs) de l'aquaculture sont de :

- i. conserver et multiplier, en les optimisant zootechniquement et sanitaire, les systèmes intégrés traditionnels de polyculture, dans les pays où ces systèmes sont des activités durables,
- ii. chercher à désintensifier les monocultures intensives en compensant les moins-values par des élevages associés pour maintenir le bilan économique des entreprises et réutiliser les déchets et sous-produits,
- iii. inventer, à moyen terme, de véritables systèmes d'aquaculture intégrée, où non pas une espèce, mais la totalité de la production sera optimisée.

Sous réserve de viabilité économique et d'acceptation du consommateur (qui restent encore le plus souvent à vérifier), les systèmes intégrés d'aquaculture marine seront probablement dans l'avenir des solutions alternatives intéressantes pour :

- i. restaurer des activités dans les marais salés endigués, et zones humides côtières,
- ii. accroître et diversifier les produits aquacoles,
- iii. réduire le besoin en eau et les rejets de particules et matières dissoutes (azote et phosphore),
- iv. protéger et restaurer la qualité des eaux du littoral en réduisant les facteurs d'eutrophisation,
- v. et développer durablement l'aquaculture en Europe et dans le Monde, même dans certaines zones sensibles (zones humides, baies abritées).

Remerciements

Je remercie la Société Européenne d'Aquaculture (EAS) pour m'avoir invité à la conférence « Beyond Monoculture » à Trondheim en août 2003 et avoir pu présenter une « key-note » sur l'aquaculture marine intégrée basée à terre, ainsi que l'Union Européenne pour avoir accepté de co-financer le projet d'innovation « GENESIS ». Que soit aussi remercié mon ami le Pr Roland Billard, spécialiste des systèmes aquacoles en étang, qui m'a fait le plaisir de faire une relecture critique du manuscrit.

Références

Ackefors, H., Enell, M., 1990. Discharge of nutrients from Swedish fish farming to adjacent sea areas. *Ambio* 19, 28-35.

- Bergheim, A., Brinker, A., 2003. Effluent treatment for flow through systems and European environmental regulations. *Aquacultural Engineering* 27, 61-77.
- Billard, R., 1998. Les systèmes de production aquacole : un continuum de l'exploitation en milieu ouvert aux élevages hors environnement. In: Hussenot, J., Buchet, V. (Ed.), *Marais maritimes et aquaculture : activité durable pour la préservation et l'exploitation des zones humides littorales*, Rochefort, France. IFREMER, Actes de Colloques 19, pp. 40-52.
- Billard, R., 2000. Le Traité de Fan Li (5ème Siècle av. JC) et la pisciculture en Chine. *Il pesce février* 2000, 54-61.
- Boyd, C.E., 2003. The status of codes of practice in aquaculture. *World Aquaculture* 34 (2), 63-66.
- Brezski, V., Newkirk, G., 1997. Integrated coastal food production systems - a review of current literature. *Ocean and Coastal Management* 34, 55-71.
- Brown, J.J., Glenn, E.P., Fitzsimmons, K.M., Smith, S.E., 1999. Halophytes for the treatment of saline aquaculture effluent. *Aquaculture* 175, 255-268.
- Brune, D.E., Schwartz, G., Eversole, A.G., Collier, J.A., Schwedler, T.E., 2003. Intensification of pond aquaculture and high rate photosynthetic systems. *Aquacultural Engineering* 28, 65-86.
- Chitou, F., 2001. La pêche et l'aquaculture lagunaires traditionnelles au Bénin et au Togo : étude géographique, Thèse de doctorat de Géographie. Université de Nantes, pp. 440.
- Chopin, T., Alejandro, H., Buschmann, A.H., Halling, C., Troell, M., Kautsky, N., Neori, A., Kraemer, G.P., Zertuche-González, J.A., Yarish, C., Neefus, C., 2001. Integrating seaweeds into marine aquaculture systems: a key toward sustainability. *Journal of Phycology* 37, 975-986.
- Chopin, T., Bastarache, S., Belyea, E., Haya, K., Sephton, D., Martin, J.L., MacDonald, B., Barrington, K., Robinson, S., Lander, T., Martin, J.D., Page, F., Eddy, S., MacDougall, J., Stewart, I., Fitzgerald, P., Ridler, N., Evans, F., Barrow, C., 2003. The integrated aquaculture AquaNet project in the Bay of Fundy, Canada: development of the extractive inorganic component (*Laminaria saccharina*) and monitoring of therapeutants and phycotoxins. In: Chopin, T., Reinertsen, H. (Ed.), *Aquaculture Europe 2003, Trondheim, Norway, August 8-12, 2003: Beyond monoculture*. European Aquaculture Society. EAS Special Publication, 33 : 3-4.
- Courtois, O., Piquet, J.C., Roesberg, D., Hussenot, J., 2003. Microbiological survey of an integrated aquaculture system involving marine fish-microalgae-bivalve mollusc. In: Chopin, T., Reinertsen, H. (Ed.), *Aquaculture Europe 2003: Beyond monoculture, Trondheim, Norway*. European Aquaculture Society. EAS Special Publication, 33 : 158-159.
- FAO, 2001. Code de conduite pour une pêche responsable : développement de l'aquaculture, article 9. <http://www.fao.org/docrep/005/v9878f/v9878f00.htm>
- FAO, 2002. La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture 2002, Sofia, 152 pp. <http://www.fao.org/DOCREP/005/Y7300F/Y7300F00.HTM>
- Guiral, D., Arfi, R., Da, K., Konan-Brou, A., 1993. Algal communities, biomasses and productions in an artificial reef (acadja) built in a brackish tropical lagoon. *Revue d'Hydrobiologie Tropicale* 26, 219-228.
- Hem, S., Avit, J.B.L.F., 1994. First results on 'acadja-enclos' as an extensive aquaculture system (West Africa). *Bulletin of Marine Science* 55, 1040-1051.
- Hem, S., Konan, A.A., Avit, J.B., 1990. Les acadja traditionnels dans le sud-est du Bénin. *Arch-Sci-Cent-Rech-Oceanol* 13, 1-31.
- Hussenot, J., 1998. L'eau et l'aquaculture en marais salé selon le niveau d'intensification : besoins quantitatifs et modifications qualitatives. In: Hussenot, J., Buchet, V. (Ed.), *Marais maritimes et aquaculture. Activité durable pour la préservation et l'exploitation des zones humides littorales*, Rochefort, France. IFREMER, Actes de Colloques 19, pp. 171-179.
- Hussenot, J., Lefebvre, S., Brossard, N., 1998. Open-air treatment of wastewater from land-based marine fish farms in extensive and intensive systems: current technology and future perspectives. *Aquatic Living Resources* 11, 297-304.
- Hussenot, J.M.E., 2003. Emerging effluent management strategies in marine fish-culture farms located in European coastal wetlands. *Aquaculture* 226, 113-128.
- Hussenot, J.M.E., Shpigel, M., 2003. Marine land-based integrated aquaculture systems for European countries and the EU innovation project " Genesis ". In: Chopin, T., Reinertsen, H. (Ed.), *Aquaculture Europe 2003: Beyond monoculture, Trondheim, Norway*. European Aquaculture Society, EAS Special Publication 33, pp. 31-36.
- IIRR, IDRC, FAO, NACA, ICLARM, 2001. Utilizing Different Aquatic Resources for Livelihoods in Asia: a resource book. Network of Aquaculture Centers in Asia-Pacific and International Center for Living Aquatic Resources Management, 416 pp. http://www.iirr.org/aquatic_resources/
- Kumar, M.S., 2000. Proceedings of the National Workshop on Wastewater Treatment and Integrated Aquaculture. South Australian Aquatic Sciences Centre, SARDI, Henley Beach, pp. 191.

- Kutty, M.N., Campbell, D., 1987. Pen culture (enclosure culture) as an aquaculture system. FAO ARAC/1987/WP/12618.
- Lefebvre, S., 2003. Modelling of integrated aquaculture systems: the need to understand and to manage. In: Chopin, T., Reinertsen, H. (Ed.), *Aquaculture Europe 2003: Beyond monoculture*, Trondheim, Norway. European Aquaculture Society. EAS Special Publication, 33 : 37-42.
- Lightfoot, C., Bimbao, M.A.P., Dalsgaard, J.P.T., Pullin, R.S.V., 1993. Aquaculture and sustainability through integrated resources management. *Outlook on Agriculture* 22, 143-150.
- Lüning, K., Pang, S.J., 2003. Mass cultivation of seaweeds: current aspects and approaches. *Journal of Applied Phycology* 15, 115-119.
- Lüning, K., Pang, S.J., Garcia Reina, G., Pinchetti, J.L., Santos, R., Sousa Pinto, I., Lòpez-Figueroa, F., Dion, P., Lognoné, V., Dring, M.J., Brown, L., Lindequist, U., Bansemir, A., 2003. Species diversification and improvement of aquatic production in seaweeds purifying effluents from integrated fish farms (EU project SEAPURA 2001-2004). In: Chopin, T., Reinertsen, H. (Ed.), *Aquaculture Europe 2003*, Trondheim, Norway, August 8-12, 2003: Beyond monoculture. European Aquaculture Society. EAS Special Publication, 33 : 249-250.
- Nelson, S.G., Glenn, E.P., Moore, D., Walsh, T., Fitzsimmons, K.M., 2001a. Use of an edible seaweed to improve effluent from shrimp farms. *Journal of Phycology* 37, 38-38.
- Nelson, S.G., Glenn, E.P., Conn, J., Moore, D., Walsh, T., Akutagawa, M., 2001b. Cultivation of *Gracilaria parvispora* (Rhodophyta) in shrimp-farm effluent ditches and floating cages in Hawaii: a two-phase polyculture system. *Aquaculture* 193, 239-248.
- Neori, A., Chopin, T., Troell, M., Buschmann, A.H., Kraemer, G.P., Halling, C., Shpigel, M., Yarish, C., 2004. Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture. *Aquaculture* 231, 361-391.
- Piedrahita, R.H., 2003. Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. *Aquaculture* 226, 35-44.
- Prein, M., 2002. Integration of aquaculture into crop-animal systems in Asia. *Agricultural Systems* 71, 127-146.
- Rakocy, J.E., 1989. Vegetable hydroponics and fish culture--a productive interface. *World Aquaculture* 20 (3), 42-47.
- Robinson, S., Lander, S.T., MacDonald, T.B., Barrington, K., Chopin, T., Martin, J.D., Bastarache, S., Belyea, E., Haya, K., Sephton, D., Page, F., Martin, J.L., Eddy, S., Stewart, I., Fitzgerald, P., 2003. Development of integrated aquaculture of three trophic levels (finfish, seaweed and shellfish): the AquaNet project in the Bay of Fundy, Canada. The production dynamics of mussels as a filter-feeder utilising enhanced seston fields within a salmon aquaculture site. In: Chopin, T., Reinertsen, H. (Ed.), *Aquaculture Europe 2003*, August 8-12, 2003, Trondheim, Norway: Beyond monoculture. European Aquaculture Society. EAS Special Publication, 33 : 65-66.
- Schaber, J., 1997. FARMSIM: A dynamic model for the simulation of yields, nutrient cycling and resource flows on Philippine small-scale farming systems, Institut für Umweltsystemforschung. University of Osnabrück, pp. 114.
- Seawright, D.E., Stickney, R.R., Walker, R.B., 1998. Nutrient dynamics in integrated aquaculture-hydroponics systems. *Aquaculture* 160, 215-237.
- Shpigel, M., Neori, A., 1996. The integrated culture of seaweed, abalone, fish and clams in modular intensive land-based systems: I. Proportions of size and projected revenues. *Aquacultural Engineering* 15, 313-326.
- Siddiqui, S.A., 2003. Wastewater treatment technology in aquaculture. *World Aquaculture* 34 (2), 49-52.
- Stolte, E., 2003. Ocean Farming - Sustainable exploitation of the sea. Part: Aqua-production park. STT document, Den Haag, Netherlands.
http://www.stt.nl/stt2/projecten/ocean/7%20Integrated%20AquaSystems_october2003.pdf
- US Environmental Protection Agency, 2002. Effluent Limitations Guidelines and New Source Performance Standards for the Concentrated Aquatic Animal Production Point Source Category ; Proposed Rules.
- van Dam, A.A., Beveridge, M.C.M., Azim, M.E., Verdegem, M.C.J., 2002. The potential of fish production based on periphyton. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 12, 1-31.
- Vandevivere, P., Negassi, S., Hodges, C., 2003. Artemia cysts without stress in Eritrea. In: Chopin, T., Reinertsen, H. (Ed.), *Aquaculture Europe 2003: Beyond monoculture*, Trondheim, Norway. European Aquaculture Society, EAS Special Publication 33, pp. 346-347.
- Welcomme, R.L., 1972. An evaluation of the acadjas method of fishing as practiced in the coastal lagoons of Dahomey (West Africa). *Journal of Fish Biology* 4, 39-55.
- Yan, J., Wang, R., Wang, M., 1998. The fundamental principles and ecotechniques of wastewater aquaculture. *Ecological Engineering* 10, 191-208.