

AGROCAMPUS
OUEST

CFR Angers

CFR Rennes



Année universitaire : 2018-2019

Spécialité : Sciences Halieutiques et
Aquacoles

Spécialisation (et option éventuelle) :
Aquaculture

Mémoire de fin d'études

- d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Aquaculture intégrée multi-trophique : Bioremédiation des rejets particulaires en milieu marin

Par : Rania KAROUI



Soutenu à Rennes le 12/09/2019

Devant le jury composé de :

Président : Hervé LE BRIS

Examineur : Christophe JAEGER

Maître de stage : Philippe CACOT

Enseignant référent : Elodie REVEILLAC

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation
« Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France »
disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



Aquaculture intégrée multi-trophique : Bioremédiation des rejets particuliers en milieu marin

❖ Introduction :

Afin d'optimiser la durabilité de son activité et de contribuer à son développement, l'entreprise Les Poissons du Soleil (LPDS) se préoccupe de la réduction de ses rejets aquacoles. Pour se faire, elle conduit depuis 3 ans un programme de recherche et développement sur l'IMTA (systèmes intégrés multitrophiques) ou « projet algues ». Ce programme associe deux autres entreprises du Groupe Aqualande, à savoir la Ferme Marine du Douhet (FMD) et les Truites de la Côte d'Argent (LTCA). Le CIRAD¹ est partenaire du projet ; un chercheur apporte son expertise scientifique.

La présente étude est réalisée chez LPDS sur le site de Salses-le-Château (66600). La pisciculture sur ce site inclue un circuit fermé et un circuit ouvert pour une production annuelle d'environ 65 et 80 tonnes, respectivement. Cette production concerne des bars, des daurades et des maigres. Le site présente plusieurs atouts pour le développement de systèmes IMTA. Il y a 9 grands bassins liner (400 m² pièce) et un réseau de plusieurs hectares de canaux et bassins en terre propices à des productions « bioremédiatrices » associées. Des espèces bioremédiatrices sont déjà abondantes sur le site à savoir des moules, des muges et plusieurs espèces d'algues ; elles prospèrent déjà de manière naturelle sur le site. L'objectif du « projet algues » sur ce site est d'étudier la faisabilité de développer telle ou telle production associée.

En pratique, nous nous sommes penchés durant cette étude sur l'élevage de moules dans l'eau de rejet du circuit fermé. Nous avons utilisé pour cela un dispositif expérimental qui avait été mis en place et testé l'an dernier. Les tests réalisés ont porté sur le nombre de cordes par bac, la fréquence de nettoyage des cordes et le devenir des solides bioremédiés. Les mesures réalisées concernaient les matières en suspension (MES), les sédiments accumulés dans les bacs et les éléments dissous (O₂, CO₂ et sels nutritifs). La croissance des coquillages a également été suivie.

Contexte et objectifs

Développement de la pisciculture

Présentation générale

La production aquacole mondiale est en croissance permanente ; elle s'accroît d'environ 10% annuellement tout en assurant plus de 50 % de la consommation mondiale des protéines aquatiques (FAO, 2018). En 2016, la production aquacole représentait 80 millions de tonnes dont 51,4 millions de tonnes en production continentale et 28,7 millions de tonnes en production marine (FAO, 2018). La Chine reste le 1^{er} producteur et exportateur mondial de produits marins depuis 1989 (Li et al, 2011). En Europe, la Norvège, est considérée comme le 1^{er} exportateur des produits aquacoles, notamment le saumon (Asche et al., 2013). La demande croissante en produits aquatiques va être confrontée à une baisse des produits issus de la pêche à l'horizon de 2030 (FAO,2018). Ceci devrait engendrer une accélération de

¹ Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement.

l'activité aquacole pour satisfaire l'augmentation de la demande (Kobayashi et al., 2015), ce qui implique une augmentation des rejets piscicoles et une nécessité à les traiter.

Pisciculture dans le bassin Méditerranéen

En Méditerranée, l'élevage marin de daurades royales (*Sparus aurata*) et bars communs (*Dicentrarchus labrax*), est en plein essor (Blancheton et al, 2007). En France, le secteur piscicole marin est orienté vers la production d'alevins en écloséries et de juvéniles en pré-grossissement ; 90% de la production est destinée à l'exportation (Blancheton et al., 2007 ; Lane et al, 2018 ; Rey-Valette, 2014). Seulement 10% des juvéniles produits sont destinés à l'élevage de grossissement réalisé en France (Lane et al, 2018). Ainsi, la production française de grossissement en 2016 était de 1671 T pour la daurade royale et de 1928 T pour le bar, avec un peu de maigre commun (*Argyrosomus regius*, 236 T) (Aubin et al., 2018 ; Lane et al., 2018). L'aquaculture française est en fait dominée par la conchyliculture, avec notamment l'huître creuse (*Crassostrea gigas*) (125 151 tonnes en 2016) et les moules *Mytilus edulis* (Atlantique) et *M. galloprovincialis* (Méditerranée) avec 74 138 tonnes en 2016 au total pour les moules.

Pisciculture en circuit fermé

Présentation générale

Pour les poissons marins cités, la reproduction et l'élevage précoce (larves et alevins) nécessitent un milieu de production aux conditions sanitaires et environnementales bien contrôlées, notamment au niveau de la température ($20 \pm 1^\circ\text{C}$). Ces conditions d'élevage particulières sont assurées par les circuits aquacoles « recirculés » ou RAS (Recycled Aquaculture System, Blancheton et al, 2007). Ces systèmes se basent sur un apport faible d'eau neuve, d'où la réutilisation des eaux après traitement par filtre mécanique pour éliminer les MES et par filtre biologique pour transformer l'ammoniaque en nitrates.

Limites du fonctionnement des RAS et aspects environnementaux

Néanmoins, le système de traitement d'eau en RAS, bien que coûteux, n'élimine du circuit fermé que 50% à 60% de la charge particulaire, incluant fèces et aliments non ingérés (Heerfordt, 1991 ; Hennessy, 1991 ; Blancheton et al., 2004).

Pour des daurades royales en grossissement, l'azote ingéré à partir des aliments est excrété principalement sous forme d'ammoniaque dissous (61%) et secondairement sous forme solide dans les fèces (17%) (Lupatsch et Kissil, 1998). Quant au phosphore, c'est différent puisqu'environ la moitié (52%) est excrété sous forme solide dans les fèces. La désagrégation des fèces peut donc libérer des sels nutritifs dissous qui s'accumulent dans le circuit fermé.

Les MES, si elles ne sont pas bien éliminées du circuit fermé, peuvent impacter la performance du biofiltre bactérien (Han et al., 1996 ; Badiola et al., 2009). Cela se produit en affectant la nitrification de l'ammoniac (Badiola et al., 2009 ; Jokumsen et Svendsen, 2010). Cela provient d'une compétition entre les bactéries hétérotrophes et autotrophes (Sato et al., 2000 ; Zhu et Chen, 2001 ; Leonard et al., 2002 ; Ling et Chen, 2005 ; Michaud et al., 2006 dans Badiola et al., 2009). Cela entraîne la dégradation de la qualité de l'eau et donc la performance de l'élevage (Malone et Pfeiffer, 2006 ; Emparanza, 2009 ; Blancheton et al., 2013). L'ammoniac sous forme non ionisée (NH_3) est considéré comme la forme azotée la plus dangereuse sur les organismes aquatiques (Randall et Tsui 2002 ; Maas et al., 2012 ; Cong et al., 2017). Une grande concentration en ammoniac peut donc affecter la santé des poissons voire entraîner d'importantes mortalités (Arafa et Atteia, 2013 ; Cong et al., 2017).

Pour limiter l'accumulation de MES et de sels nutritifs dissous dans le circuit, l'eau du circuit est changée par de « l'eau neuve » à raison généralement de 100-200%/heure, soit 240-480%/jour (% volume du circuit). L'équivalent de l'apport d'eau neuve est rejeté dans

l'environnement. Cette eau rejetée est très riche en éléments organiques et minéraux azotés (Cong et al., 2017) ; cela peut engendrer une dégradation de l'environnement, notamment sous forme d'eutrophisation via le développement d'algues suivi de leur décomposition (Pillay, 2004 ; Cong et al., 2017). Cela peut aussi augmenter les risques de résistance chez les organismes nocifs (Kerry et al., 1994) et favoriser la pullulation de pathogènes, de parasites et de microbes, ce qui impacte à long terme la biodiversité en milieu naturel, la santé humaine ainsi que la santé des espèces sélectionnées en monoculture (Malone et Pfeiffer, 2006 ; Emparanza, 2009). Ceci a mis en cause l'image de la monoculture par la société (Alexander et al., 2015 ; Alexander et Hughes, 2017). De nouvelles loi et législations plus fermes concernant l'amélioration de la qualité d'eau de rejets en aquaculture, ont été mises en place (Takoukam et Erikstein, 2013 ; Alexander et Hughes, 2017)

L'aquaculture intégrée multi-trophique

Présentation générale

Pour allier production et protection de l'environnement, des techniques de bioremédiation ont été développées, telles que l'aquaculture intégrée multi-trophique (IMTA). Cette technique, bien que pratiquée depuis des décennies en Chine (Troell et al., 2009 ; Alexander et Hughes, 2017), reste peu pratiquée en Europe, notamment à l'échelle des recherches et des essais pilotes (Beltran et al., 2014 ; Alexander et al., 2015). Le manque de plan de travail, de régulation et surtout de réglementation et de législation restent parmi les obstacles majeurs pour le développement des IMTA en Europe (Alexander et Hughes, 2017). L'IMTA consiste à combiner plusieurs cultures d'organismes marins afin de réduire les déchets solides et dissous des espèces dites nourries par d'autres espèces dites extractives (Chopin et al., 2001 ; Schneider et al., 2005). Les organismes extractifs sont capables de filtrer les rejets particuliers (coquillages) et dissous (algues) des espèces nourries (Chopin, 2006 ; Barrington et al., 2009), tout en permettant d'équilibrer les processus biologiques et chimiques, et d'augmenter et de diversifier la production. En effet, ces systèmes permettent l'utilisation du maximum d'énergie contenue dans les aliments administrés aux poissons nourris, tout en recyclant les effluents riches en éléments nutritifs par leur recirculation vers d'autres espèces au lieu de les rejeter dans la nature (Lander et al., 2012). Cela permet non seulement de traiter les rejets biologiquement, mais aussi de créer de la valeur ajoutée en produisant d'autres espèces commerciales sans ou avec le moindre coût (Troell et al., 2009 ; Chopin et al., 2010).

Biofiltration des matières en suspension

Parmi les espèces extractives commerciales potentiellement utilisées pour les MES, on trouve les bivalves (Dame 1996 ; Prins et al. 1998 ; Strand et al., 2019) dont notamment les moules *Mytilus edulis* et *M. galloprovincialis* en Atlantique (Lindahl et al., 2005 ; Grant et al., 2008 ; Lander et al., 2012 et 2013 ; Cranford et al., 2013) et en Méditerranée, respectivement (Sarà et al., 2009 et 2012 ; Montalto et al., 2017). Ces organismes, ont un important potentiel de filtration des MES contenues dans les rejets piscicoles (Shpigel et al., 1993 ; Lander, 2006, 2012 et 2013 ; Reid et al., 2010). Il a été démontré par Newell et al. (1998) que l'espèce *M. edulis* peut éliminer des particules de taille de 3 à 110 µm. Concernant l'huître creuse *Crassostrea gigas*, elle peut assimiler jusqu'à 71 % de la concentration en MES (Ramos et al., 2009 ; Strand et al., 2019) et des particules au-dessus de 4 et 5 µm (Lefebvre et al., 2000) et même des particules jusqu'à 541 µm (Dupuy et al., 2000 dans Jiang et al., 2013). Une autre espèce d'huître (*Saccostrea commercialis*) peut assimiler jusqu'à 88% de la charge en MES (Jones et al., 2001 ; Strand et al., 2019), 88% de la charge particulaire d'origine bactérienne, 44% de la concentration en P-PO₄ et 33 % de la teneur en azote total (Jones et al., 2002 ; Strand et al., 2019).

Présentation de l'entreprise d'accueil

Présentation générale

LPDS fait partie du groupe coopératif Aqualande qui rassemble plusieurs entreprises piscicoles spécialisées dans la sélection et la reproduction des poissons marins et dulçaquicoles ; dont la Ferme Marine du Douhet (FMD) (écloserie de daurade royale avec plus de 20 M d'alevins produits par an) et les Truites de la Côte d'Argent (LTCA) (production et transformation de truites).

LPDS possède cinq sites en Occitanie ; Balaruc-Les-Bains avec l'écloserie (et les bureaux) et le site de La Vise (prégrossissement et grossissement), Frontignan (prégrossissement), Salses-Le-Château (prégrossissement et grossissement), et Bouzigues (rotifers). En 2018, LPDS a produit 45 millions d'alevins issue de l'écloserie et 20 millions d'alevins issus du prégrossissement. Environ 90% de la production était destinée à l'exportation vers les pays de la Méditerranée, notamment la Tunisie (58%) et la Grèce (20%). En 2019, l'entreprise comprend 66 employés, dont 9 sur le site de Salses (7 en UTH et 2 en apprentissage).

Productions sur le site de Salses-le-Château

En 2018, le site de Salses -Le-Château, a produit 7 tonnes de bar, 32 tonnes de daurades et 9 tonnes de maigre en prégrossissement (circuit fermé). En grossissement (circuit ouvert), il a produit 48 tonnes de daurades, 43 tonnes de bar et 5 tonnes de géniteurs. Créée en 1972 par M Henri CONTE sous le nom de Méditerranée Pisciculture, la pisciculture de Salses est rachetée par LPDS le 1er janvier 2009. Le circuit ouvert (2 circuits en fait) est rénové par le groupe Aqualande et le circuit fermé est créé.

Présentation du projet bioremédiation de LPDS

Le site de la pisciculture de Salses-le-Château

La pisciculture de Salses est située en zone Natura 2000. L'aspect environnemental est donc important à prendre en compte.

Le site a un potentiel important pour étudier et développer la bioremédiation. Il y a une grande surface de potentiel lagunage algal avec environ 3 ha de bassins en terre, qui pourraient a priori être utilisés pour le traitement des rejets du circuit ouvert. Le site dispose également de 9 bassins de 400 m² chacun recouverts d'un liner en plastique ; ces bassins actuellement non utilisés pourraient recevoir également une culture d'algues relativement intensive pour le traitement du rejet du circuit fermé. Le site dispose également d'un canal de rejet, entre la pisciculture et les bassins en terre, sur environ 500 m de longueur soit environ 2500 m² de surface disponible. Ce canal pourrait servir pour des productions intensives de muges et de coquillages. Par ailleurs, le site dispose d'un environnement technique favorable, avec un savoir-faire de l'entreprise sur les équipements innovants et des contacts avec des conchyliculteurs et des pêcheurs de la région.

Première étude réalisée localement avec des coquillages en 2018

Les tous premiers tests avec des coquillages ont été réalisés à Salses l'an dernier. Ils portaient sur la tolérance de différents coquillages (moules, huîtres, palourdes et, praires) vis-à-vis la qualité d'eau de rejet du circuit fermé, et sur des premiers essais de filtration des MES. Après 25 jours d'essais, il s'est avéré que les moules *Mytilus sp.* présentes sur le site sont les plus résistantes et ont le plus faible taux de mortalité parmi les espèces testées. Pour la présente étude, cette moule locale a donc été choisie pour réaliser les différents tests.

Le projet en 2019

Le projet Bioremédiation a pour principal objectif l'amélioration de la qualité des rejets du circuit fermé, principalement, et du circuit ouvert, en second lieu. Pour se faire, un système IMTA en aval du circuit fermé a été conçu et installé en 2018 et 2019 afin d'étudier les conditions optimales pour deux types de bioremédiation :

- 1) L'absorption des MES par les moules en sortie de circuit fermé. Les moules étaient placées dans des poches standard, elles-mêmes placées dans des bacs qui recevaient l'eau de rejet du circuit fermé. Nous avons étudié l'effet du débit d'eau, de la fréquence de nettoyage et du nombre de cordes par bac. Nous avons également suivi le devenir des MES bioremédiées par les coquillages.
- 2) L'absorption des sels nutritifs dissous par les algues. Les algues recevaient l'eau de rejet du circuit fermé via le passage dans des bacs de moules puis un filtre à tambour. L'algue cultivée était *Chaetomorpha aerea* en bassin ; l'effet de la densité de stockage a été testée. Nous avons également testé la culture en ruissellement d'*Ulva intestinalis*.

L'étude a également porté sur un 3^{ème} point :

- 3) La survie et la croissance des moules dans le canal de rejet de la pisciculture. Ce canal rassemble les eaux de rejet du circuit ouvert et du circuit fermé.

Nous avons suivi la réduction des MES lors du passage dans les bacs coquillages. Nous nous sommes également intéressés aux éléments dissous dont les gaz (O₂ et CO₂) et les sels nutritifs dissous (azote et phosphore). La survie et la croissance des coquillages ont également été suivies.

Démarche expérimentale et résultats

La présente étude a été entamée par une recherche bibliographique et une réflexion sur la bioremédiation particulière et les systèmes IMTA pendant 3 semaines (sur le site de la vise). Environ 2 mois ont été consacrés pour la conception et la construction du système de nettoyage, la fabrication et la mise en place des collecteurs de naissains, à la collecte, au nettoyage et au marquage des moules, ainsi qu'à la mise en place des cordes.

Les tests d'élevage des moules dans l'eau de rejet ont été réalisés dans des bacs sous forme de tubes de 40 cm de diamètre. Ces tubes étaient traversés par le flux d'eau à traiter du bas vers le haut. Les moules étaient disposées sur des cordes, elles-mêmes placées dans ces tubes.

Avant de lancer le 1^{er} test, le système a été bien nettoyé (châteaux d'eau, débits litres...). Les moules ont été mises en acclimatation pendant 5 jours, en recevant un mélange d'eau de rejet et d'eau de canal d'entrée, avec un débit croissant en eau de rejet chaque jour (en passant de 20% d'eau de rejet jusqu'à 100% d'eau de rejet le dernier jour).

L'étude a été réalisée sur le site de LPDS de Salses-le-Château (66600). L'objectif était la bioremédiation des rejets solides d'un circuit fermé de production de 400 m³ de bassin. Des bars seuls ou avec des maigres étaient élevés dans ce circuit en phase de prégrossissement. Des moules ont été utilisées pour absorber les matières en suspension (MES) de l'eau de rejet. Trois tests ont été réalisés avec un dispositif expérimental comportant 12 bacs permettant de tester 4 traitements en tripliquas. Les moules étaient placées sur des cordes d'élevage classiques. Le 1^{er} test a porté le débit d'eau à traiter et le 2^{ème} test a porté sur la fréquence de nettoyage des coquillages. Deux variantes du dispositif de cordes ont également été testées durant le 1^{er} et le 2^{ème} test. Le 3^{ème} test a porté sur le devenir des MES retenues dans les bacs de coquillages. La biomasse initiale des moules par bac était similaire pour chaque test. Les mesures réalisées concernaient la concentration des MES en entrée et sortie

de bacs, l'accumulation des sédiments dans les bacs, les gaz dissous (O₂ et CO₂) ainsi que l'azote et le phosphore dissous. Un abattement des MES a été observé avec un taux de survie important chez les moules. Les résultats obtenus sont la propriété de LPDS et du CIRAD.

Bibliographie :

Alexander, K., Potts, T., Freeman, S., Israel, D., Johansen, J., Kletou, D., Meland, M., Pecorino, D., Rebours, C., Shorten, M., 2015. The implications of aquaculture policy and regulation for the development of integrated multi-trophic aquaculture in Europe. *Aquaculture* 443, 16–23.

Alexander, K. A., & Hughes, A. D., 2017. A problem shared: Technology transfer and development in European integrated multi-trophic aquaculture (IMTA). *Aquaculture*, 473, 13-19.

Arafa M.H. & Atteia H.H., 2013. Sildenafil citrate attenuates the deleterious effects of elevated ammonia. *Toxicol Mech Methods*,23:402–411

Asche, F., Roll, K. H., Sandvold, H. N., Sorvig, A. & Zhang, D. J., 2013. Salmon Aquaculture: Larger Companies and Increased Production. *Aquaculture Economics & Management*, 17(3) : 322-339.

Aubin, J., Fontaine, C., Callier, M., & Roque d'orbcastel, E., 2018. Blue mussel (*Mytilus edulis*) bouchot culture in Mont-St Michel Bay: potential mitigation effects on climate change and eutrophication. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 23, 1030-1041.

Beltran, A.M., Guinée, J., Schenck, R., Huizen, D., 2014. Goal and scope definition for life cycle assessment of integrated multi-trophic marine aquaculture systems. *Proceedings of the 9th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector (LCA Food 2014)*, San Francisco, California, USA, 8–10 October, 2014. Center for Life Cycle Assessment, American.

Badiola M, Mendiola D & Bostock J, 2012 Recirculating Aquaculture Systems (RAS) analysis: main issues on management and future challenges, *Aquacultural Engineering*,51, pp. 26-35.

Barrington, K., Chopin, T., & Robinson, S., 2009. Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in marine temperate waters. *Integrated mariculture: a global review*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 529. FAO, D. Soto. Rom, pp. 7–46

- Blancheton, J.P., Dosdat, A., & Deslous Paoli, J.M., 2004.** Minimisation des rejets biologiques issus d'élevages de poissons. Dossiers de l'environnement de l'INRA, (26), 1–12
- Blancheton, J., Syndhia, M., Chia, E., 2007.** Le développement durable : un défi pour l'aquaculture marine en Méditerranée. Cahiers Agricultures, 16 (4), 301–310.
- Blancheton, J.P., Attramadal, K.J.K., Michaud, L., d'Orbcastel, E.R., Vadstein, O., 2013.** Insight into bacterial population in aquaculture systems and its implication. Aquac. Eng. 53, 30–39.
- Chopin, T., 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., 2006.** Integrated multi-trophic aquaculture. Northern Aquaculture 12, poster.
- Chopin, T., Troell, M., Reid, G. K., Knowler, D., Robinsson, S. M. C., Neori, A., Buschmann, A. H., Pang, S. J. & Fang, J. G. 2010.** Integrated Multi-Trophic Aquaculture - A Responsible Practice Providing Diversified Seafood Products While Rendering Bio mitigating Services through its Extractive Components. In: Franz, N. & Schmidt, C. C. (eds.). Organisation for Economic Co-Operation and Development. Paris OECD. 195-217
- Cong, M., Wu, H., Yang, H., Zhao, J., & Lv, J. 2017.** Gill damage and neurotoxicity of ammonia nitrogen on the clam *Ruditapes philippinarum*. Ecotoxicologie, 26(3), 459-469.
- Cranford, P. J., Reid, G. K. & Robinson, S. M. C., 2013.** Open Water Integrated Multi-Trophic Aquaculture: Constraints on the Effectiveness of Mussels as an Organic Extractive Component. Aquaculture Environment Interactions, 4(2): 163-173.
- Dame R.,1996** Ecology of marine bivalves: an ecosystem approach. CRC Press, Boca Ratonde Azevedo RV, Tonini WCT, Martins Dos Santos MJ, Braga LGT (2015) Biofiltration, growth and body composition of oyster *Crassostrea rhizophoraein* effluents from shrimp *Litopenaeus vannamei*. Rev Ciênc Agron 46(1):193–203
- Dupuy, C., Vaquer, A., Lam-Höai, T., Rougier, C., Mazouni, N., Lautier, J., Collos, Y., Le Gall, S., 2000.** Feeding rate of the oyster (*Crassostrea gigas*) in a natural planktonic community of the Mediterranean Thau Lagoon. Mar. Ecol. Prog. Ser. 205, 171–184.
- Emparanza, E.J.M., 2009.** Problems affecting nitrification in commercial RAS with fixed biofilters for salmonids in Chile. Aquacultural Engineering 41, 91-96.

FAO. 2018. La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture 2018. Atteindre les objectifs de développement durable. Rome. Licence : CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

Grant, J., Bacher, C., Cranford, P. J., Guyondet, T. & Carreau, M. 2008. A Spatially Explicit Ecosystem Model of Seston Depletion in Dense Mussel Culture. *Journal of Marine Systems*, 73(1-2): 155-168.

Han, X., Rosati, R., Webb, J., 1996. Correlation of particle size distribution of solid waste to fish composition in an aquaculture recirculation system, in: Libey, G.S., Timmons, M.B. (Eds.), *Successes and failures in commercial recirculating aquaculture*. Northeast Regional Agricultural Engineering Service, Ithaca, NY, pp. 257-278.

Heerfordt, L., 1991. Test of the efficiency of alternative treatment systems on the effluent from the traditional trout farms in Denmark. *European Society Aquaculture Society* 14, 140.

Hennessy, M., 1991. The efficiency of two aquacultural effluent treatment systems in use in Scotland. *European Society Aquaculture Society* 14, 142.

Jiang, Z., Wang, G., Fang, J., Mao, Y., 2013. Growth and food sources of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) integrated culture with Sea bass (*Lateolabrax japonicus*) in Ailian Bay, China. *Aquac. Int.* 21, 45–52.

Jokumsen, A., Svendsen, L., 2010. Farming of freshwater Rainbow trout in Denmark. 4 DTU Aqua, National Institute of Aquatic resources. DTU Aqua report no. 219.

Jones AB, Dennison WC, Preston NP., 2001 Integrated treatment of shrimp effluent by sedimentation, oyster filtration and macroalgal absorption: a laboratory scale study. *Aquaculture* 193(1–2):155–178

Jones AB, Preston NP, Dennison WC, 2002 The efficiency and condition of oysters and macroalgae used as biological filters of shrimp pond effluent. *Aquac Res* 33:1–19.

Kerry, J., Hiney, M., Coyne, R., Cazabon, D., NicGabhainn, S., & Smith, P., 1994. Frequency and distribution of resistance to oxytetracycline in micro-organisms isolated from marine fish farm sediments following therapeutic use of oxytetracycline. *Aquaculture* 123, 43-54.

Kobayashi, M., Msangi, S., Batka, M., Vannuccini, S., Dey, M. M. & Anderson, J. L. 2015. Fish to 2030: The Role and Opportunity for Aquaculture. *Aquaculture Economics & Management*, 19(3) : 282-300.

- Lander, T., 2006.** Integrated Aquaculture in New Brunswick: influence of salmon farms on the growth of *Mytilus edulis*. M.Sc. Thesis, University of New Brunswick, Saint John, New Brunswick, Canada, 178 p.
- Lander, T. R., Robinson, S. M. C., MacDonald, B. A. & Martini, J. D. 2012.** Enhanced Growth Rates and Condition Index of Blue Mussels (*Mytilus edulis*) Held at Integrated Multitrophic Aquaculture Sites in the Bay of Fundy. *Journal of Shellfish Research*, 31(4): 997-1007.
- Lander, T. R., Robinson, S. M. C., MacDonald, B. A. & Martin, J. D. 2013.** Characterization of the Suspended Organic Particles Released From Salmon Farms and Their Potential as a Food Supply for the Suspension Feeder, *Mytilus edulis* in Integrated MultiTrophic Aquaculture (IMTA) Systems. *Aquaculture*, 406: 160-171.
- Lane, A., Chatain, B., & Roque D'Orbcastel, E., 2018.** Aquaculture in Occitanie, France. *World Aquaculture* 49, 12-17
- Lefebvre S., Barillé L., Clerc M., 2000.** Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) feeding responses to a fish-farm effluent. *Aquaculture*, 187: 185-198
- Leonard, N., Guiraud, J.P., Gasset, E., Cailleres, J.P., Blancheton, J.P., 2002.** Bacteria and nutrients – Nitrogen and carbon – In a recirculating system for sea bass production. *Aquacultural Engineering* 26, 111-127.
- Li, X., Li, J., Wang, Y., Fu, L., Fu, Y., Li, B., & Jiao, B., 2011.** Aquaculture industry in China: current state, challenges, and outlook. *Reviews in Fisheries Science* 19, 187-200
- Lindahl, O., Hart, R., Hernroth, B., Kollberg, S., Loo, L. O., Olrog, L., Rehnstam-Holm, A. S., Svensson, J., Svensson, S. & Syversen, U. 2005.** Improving Marine Water Quality by Mussel Farming: A Profitable Solution for Swedish Society. *Ambio*, 34(2): 131- 138.
- Ling, J., Chen, S.L., 2005.** Impact of organic carbon on nitrification performance of different biofilters. *Aquacultural Engineering* 33, 150- 162.
- Lupatsch, I., & Kissil, G. W., 1998.** Predicting aquaculture waste from gilthead seabream (*Sparus aurata*) culture using a nutritional approach. *Aquatic Living Resources*, 11 (4), 265–268.
- Maas A, Seibel BA, Walsh PJ ,2012** Effects of elevated ammonia concentrations on survival, metabolic rates, and glutamine synthetase activity in the Antarctic pteropod mollusk *Clione limacina Antarctica*. *Polar Biol* 35:1123–1128

- Malone, R.F. & Pfeiffer, T.J., 2006.** Rating fixed film nitrifying biofilters used in recirculating aquaculture systems. *Aquaculture Engineering* 34, 389- 402
- Michaud, L., Blancheton, J.P., Bruni, V., Piedrahita, R., 2006.** Effect of particulate organic carbon on heterotrophic bacterial populations and nitrification efficiency in biological filters. *Aquacultural Engineering* 34, 224-233
- Montalto, V., Martinez, M., Rinaldi, A., Sarà, G., & Mirto, S., 2017.** The effect of the quality of diet on the functional response of *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819): Implications for integrated multitrophic aquaculture (IMTA) and marine spatial planning. *Aquaculture*, 468, 371-377.
- Newell, C.R., Campbell, D.E., Gallagher, S.M., 1998.** Development of the mussel aquaculture lease site model MUSMOD©: a field program to calibrate model formulations. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 219, 143–169.
- Pillay T.V.R., 2004.** *Aquaculture and the environment*, Second edition. Blackwell Publishing Ltd. Editorial Offices. 212p
- Prins T, Smaal A., & Dame R., 1998** A review of feedbacks between bivalve grazing and ecosystem processes. *Aquat Ecol* 31:349–359
- Ramos R, Vinatea L, Seiffert W, Beltrame E, Santos Silva J, Ribeiro Da Costa RH., 2009** Treatment of shrimp effluent by sedimentation and oyster filtration using *Crassostrea gigas* and *C. rhizophorae*. *Braz Arch Biol Technol* 52:775–783.
- Randall, D., & Tsui, T., 2002.** Ammonia toxicity in fish. *Marine pollution bulletin* 45, 17-23.
- Reid, G.K., Liutkus, M., Bennett, A., Robinson, S.M.C., MacDonald, B., Page, F., 2010.** Absorption efficiency of blue mussels (*Mytilus edulis* and *M. trossulus*) feeding on Atlantic salmon (*Salmo salar*) feed and fecal particulates: Implications for integrated multi-trophic aquaculture. *Aquaculture* 299, 165–169.
- Rey-Valette, H., 2014.** Quelques pistes sur l'avenir de l'aquaculture française en 2040. *Cah. Agric.* 23, 34–46.
- Sarà, G., Zenone, A., & Tomasello, A., 2009.** Growth of *Mytilus galloprovincialis* (mollusca, bivalvia) close to fish farms: a case of integrated multi-trophic aquaculture within the Tyrrhenian Sea. *Hydrobiologia*, 636(1), 129-136.
- Sarà, G., Reid, G., Rinaldi, A., Palmeri, V., Troell, M., Kooijman, S.A.L.M., 2012.** Growth and reproductive simulation of candidate shellfish species at fish cages in the southern

Mediterranean: Dynamic Energy Budget (DEB) modelling for integrated multi-trophic aquaculture. *Aquaculture* 324–325, 259–266

Satoh, H., Okabe, S., Norimatsu, N., Watanabe, Y., 2000. Significance of substrate C/N ratio on structure and activity of nitrifying biofilms determined by in situ hybridization and the use of microelectrodes. *Water Science Technology* 41, 317-321

Schneider, O., Sereti, V., Eding, E.H., & Verreth, J.A.J., 2005. Analysis of nutrient flows in integrated intensive aquaculture systems. *Aquac. Eng.* 32, 379–401.

Shpigel M., Lee J., Sooho B., Fridman R., Gordin H., 1993. Use of effluent water from fish-ponds as a food source for the Pacific oyster, *Crassostrea gigas* Thunberg. *Aquaculture and Fisheries Management*, 24: 529-543

Strand, Ø., Jansen, H. M., Jiang, Z., & Robinson, S. M., 2019. Perspectives on Bivalves Providing Regulating Services in Integrated Multi-Trophic Aquaculture. In *Goods and Services of Marine Bivalves* (pp. 209-230). Springer, Cham.

Talla Takoukam P., Erikstein K., 2013. Aquaculture regulatory frameworks. *FAO Legal Papers Online*, 91.30p.: <http://www.fao.org/3/a-bb124e.pdf>

Troell, M., Joyce, A., Chopin, T., Neori, A., Buschmann, A.H., Fang, J.-G., 2009. Ecological engineering in aquaculture—potential for integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in marine offshore systems. *Aquaculture* 297 (1), 1–9

Zhu, S., Chen, S., 2001. Effects of organic carbon on nitrification rate in fixed film biofilters. *Aquacultural Engineering* 25, 1-11.